



ТРУДЫ
ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
«СОВРЕМЕННАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ: АКТУАЛЬНЫЕ
ВОПРОСЫ НАУКИ, ПРАКТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ»

Г. СОЧИ, РОССИЯ 17-23 СЕНТЯБРЯ 2023 Г.

Московский Государственный Университет
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет

Труды
Всероссийской научной конференции
с международным участием
«Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки,
практики и образования»
г. Сочи, Россия 17-23 сентября 2023 г.

Под редакцией
д.г.-м.н. С.П. Позднякова
к.г.-м.н. Е.С. Казак

Технические редакторы
Н.Е. Шиндина
М.Д. Неуважаева

Москва
2023

УДК 556.5

Труды

Всероссийской научной конференции с международным участием «Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования». М.: МГУ, 2023. — 619 с.

Коллективная монография, изданная по материалам докладов участников Всероссийской научной конференции с международным участием «Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования», которая проводилась 17-23 сентября 2023 года на базе пансионата МГУ Буревестник в г. Сочи, Россия и была посвящена 70-летию основания кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Рассмотрен широкий круг вопросов современной гидрогеологии, включая теоретические аспекты формирования ресурсов подземных вод, разработку методов расчетов и моделирования гидрогеологических процессов, проблемы формирования химического состава подземных вод, разработку и обоснование геофильтрационных и геомиграционных моделей конкретных объектов, нефтяную гидрогеологию и современные проблемы гидрогеологического образования.

УДК 556.5

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	12
РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД	16
<i>Л. И. Аузина</i>	
АНАЛИЗ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНО-МОДЕЛЬНОГО ПОДХОДА.....	17
<i>П. Ю. Василевский, И. Н. Дедюлин, О. А. Глумов, В. Н. Самарцев, В. А. Лехов</i>	
ОПЫТ ПОСТКАЛИБРАЦИОННОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	22
<i>В. В. Ведякина, С. П. Поздняков</i>	
МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД В КАМЕННОЙ СТЕПИ	28
<i>С. А. Глухова, Н. А. Харитонова, О. В. Пинигин, Т. В. Суханова, А. В. Расторгуев</i>	
ВЛИЯНИЕ НОВЕЙШИХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА.....	34
<i>С. О. Гриневский, А. С. Даниленко, В. В. Халеский</i>	
МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РЕГИОНАЛЬНОМ МАСШТАБЕ И В МАЛОМ РЕЧНОМ БАССЕЙНЕ	40
<i>Е. В. Дробязко, А. В. Расторгуев</i>	
ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ ВОДОЗАБОРОВ НА ИНТРУЗИЮ МОРСКИХ ВОД НА ПРИМЕРЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ВОДОЗАБОРА	47
<i>Т. С. Егоров</i>	
РЕГИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПЕЧОРСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА	53
<i>Ю. А. Килин, И. И. Минькевич</i>	
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА СЛОЖЕННОГО КАРСТУЮЩИМСЯ ПОРОДАМИ В ЗОНЕ ПОДПОРА КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА.....	60
<i>А. В. Кирюхин, Лемзиков М. В.</i>	
РЕГИОНАЛЬНЫЕ СЕЙСМОГЕННЫЕ РАЗЛОМЫ КАМЧАТКИ И МАГМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ	67
<i>Т. В. Любимова, В. А. Тимошина</i>	
ПРОБЛЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ-КУРОРТОВ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ	73
<i>А. А. Маслов, Е. А. Байдарико, Н. А. Харитонова, Е. И. Барановская, Е. А. Филимонова, Е. С. Максимова, Е. А. Преображенская, А. Ю. Бычков, А. С. Сартыков, С. П. Поздняков</i>	
ОПЫТ ПЕРЕОЦЕНКИ ЗАПАСОВ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ЕССЕНТУКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	78

Л. Э. Оролбаева

УПРАВЛЕНИЕ ПИТАНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕЖГОРНЫХ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ
ТЯНЬ-ШАНЯ..... 84

К. В. Пекпулатова, В. М. Трифаничев

НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАКОЛОННЫХ ПЕРЕТОКОВ НА ВОДОНОСНЫЕ
ГОРИЗОНТЫ НА ПРИМЕРЕ ВЕЛИКОЛУКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД 93

А. М. Плюснин, Е. Г. Перязева, А. Д. Базаров, М. К. Чернявский, А. В. Украинцев

ПРОГНОЗ ПОДТОПЛЕНИЯ ПОБЕРЕЖЬЯ БАЙКАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО УРОВНЯ..... 98

С. П. Поздняков, Н. Л. Фролова, Ван Пинг, С. О. Гриневский

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНОГО СТОКА ПО ГИДРОГРАФУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КРИВЫХ ИСТОЩЕНИЯ 105

П. А. Рыбников, Л. С. Рыбникова

ОБОСНОВАНИЕ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ САРБАЙСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 111

С. Н. Тагильцев, С. В. Сурганов, В. С. Тагильцев, А. А. Куриченко

ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРИБРЕЖНОЙ ЧАСТИ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА
..... 117

Е. Р. Черепанова, Е. П. Жуковская

ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ СРЕДНЕМАСШТАБНОМ КАРТИРОВАНИИ
ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ УРАЛЬСКОЙ СГСО И ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО САБ..... 124

И. А. Чиганов, В. А. Бакиевская, С. П. Поздняков

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РОДНИКОВОГО СТОКА В ТРЕЩИННО-КАРСТОВОМ БАССЕЙНЕ
НА ПРИМЕРЕ ВЕРХОВЬЕВ Р. ЧЕРНАЯ..... 131

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ..... 138

А. А. Арсеньева, П. К. Коносавский, К. В. Титов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ
ОТКАЧКЕ ВОДЫ ИЗ СКВАЖИНЫ В ПРИСУТСТВИИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ
..... 139

С. В. Болдина, Г. Н. Копылова

РАЗВИТИЕ МЕТОДА НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ (НА
ПРИМЕРЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА, ДАЛЬНИЙ ВОСТОК РОССИИ) 145

Б. В. Боровский

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И ПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ..... 151

М. В. Вилькина, А. М. Никуленков, В. Г. Румынин, Л. Н. Синдаловский

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОНИЦАЕМОСТИ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА
ДИСПЕРСИЮ ВЕЩЕСТВА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ (ДОЛИНА р. ДУНАЙ, УЧАСТОК
СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС ПАКШ II)..... 160

Г. Е. Ершов, О. А. Олиферова, А. Л. Язвин

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ
ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД..... 170

Г. Н. Копылова, С. В. Болдина

СЕЙСМОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ: ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ В
СКВАЖИНАХ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА И МИРА 177

С. М. Петухова, А. Н. Беседина, Э. М. Горбунова

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОТКЛИКИ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ТУРЦИИ 6 ФЕВРАЛЯ 2023,
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ НА ТЕРРИТОРИИ ГФО «МИХНЕВО» 183

А. В. Расторгуев, Г. Д. Неуважасев, Д. А. Озерский, К. Д. Смирнов

УТОЧНЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СКАЛЬНОГО МАССИВА УЧАСТКА
«ЕНИСЕЙСКИЙ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ 190

А. В. Расторгуев, А. И. Нурисламов, Я. В. Сорокоумова, А. В. Султанов, И. А. Чиганов

МИГРАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ И ХЛОРОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ 195

К. Д. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ
ПОДОЛЬСКО-МЯЧКОВСКОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА, ИСПОЛЬЗУЯ МЕТОДИКУ
ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ..... 203

С. Н. Тагильцев

ГИДРОГЕОМЕХАНИКА КАК ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПРЕДСТАВЛЕНИЙ
О ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СТРУКТУРЕ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ 208

С. Н. Тагильцев, С. В. Сурганов, В. С. Тагильцев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ ПРИ НАРУШЕНИИ ЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА
ФИЛЬТРАЦИИ..... 215

М. Г. Храмченков, Р. М. Усманов

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГИДРОГЕОМЕХАНИКА – ИСТОКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ..... 222

И. А. Чиганов, С. О. Гриневский, С. П. Поздняков

ГЕОГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ
ИЗМЕНЕНИЙ НА ПИТАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД 227

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОГЕОДИНАМИКА: ПРОГРАММНЫЕ ПАКЕТЫ..... 233

*А. Н. Бахаев, А. Ю. Борляева, И. В. Горев, С. А. Козлова, О. Р. Кошмар, Г. О. Кузина, Е. Н. Лысова,
П. А. Машенькин, В. А. Пронин, М. Л. Сидоров, Л. И. Скрыпник, Т. С. Трушкина, О. А. Чулкова*

ЛОГОС ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ОБЗОР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ..... 234

И. В. Капырин, А. В. Пленкин, Г. В. Копытов

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
GERA..... 240

И. А. Расторгуев, И. В. Литвинова, Н. А. Иост, А. В. Ильин

МОДУЛЬ THAWFROST ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕПЛО-МАССО-ПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ МЕРЗЛОТЫ..... 244

В. С. Рекун, Р. Ю. Жидков

АНАЛИЗ ДАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МОСКВЫ..... 250

В. Г. Румынин, Л. Н. Синдаловский, А. М. Никуленков

О ВОЗМОЖНОСТЯХ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ МИГРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSDIMAT 256

ГИДРОГЕОХИМИЯ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД 264

Р. Ф. Абдрахманов

ГИДРОГЕОХИМИЯ ГЛУБИННЫХ ВОД МАГНИТОГОРСКОЙ МЕГАЗОНЫ ЮЖНОГО УРАЛА. 265

Е. И. Барановская, Н. А. Харитонов, Е. А. Филимонова, Е. С. Максимова, А. А. Маслов

ИЗОТОПНЫЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УГЛЕКИСЛЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ЕССЕНТУКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ 272

Е. В. Домрочева

ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА КУЗБАССА..... 278

В. В. Дребот, О. Е. Лепокурова, С. В. Борзенко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ПО ТРИТИУ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ ВОДА-ПОРОДА НА ПРИМЕРЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РАЙОНА ТОРЕЙСКИХ ОЗЁР 285

А. В. Ермаков

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД РАЙОНА ЗВЕНИГОРОДСКОЙ ПРАКТИКИ..... 292

Д. Г. Заварзина, А. А. Маслов, А. Ю. Merkel, Н. А. Харитонов, А. А. Ключкина, Е. И. Барановская, Е. А. Байдарико, Н. А. Черных, С. Н. Гаврилов

ТЕНЬ МИНУВШЕГО: АНАЛОГИ ДРЕВНИХ БИОЦЕНОЗОВ ЗЕМЛИ В ЕССЕНТУКСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД 298

И. С. Иванова, Ю. В. Колубаева, Н. А. Волкова

ГРУППОВОЙ СОСТАВ РАСТВОРЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ..... 304

Е. С. Казак

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС И МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНТЕРПРИТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОХИМИИ ПОРОВЫХ ВОД СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ОТЛОЖЕНИЙ 310

Т. А. Киреева

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАРИЯ, В СВЯЗИ С ТЕХНОГЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ, ОСЛОЖНЯЮЩИМИ РАЗРАБОТКУ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ..... 317

Ю. В. Колубаева, И. С. Иванова, Н. А. Волкова

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА..... 322

В. В. Кузьмин, К. А. Болдырев

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА УЧАСТКАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ..... 328

В. В. Кулаков

ОПЫТ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ НА ТУНГУССКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ НЕКОНДИЦИОННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД..... 335

В. Ю. Лаврушин, Г. А. Челноков, А. С. Айдаркожина, А. В. Ермаков, Л. А. Лямина

АЗОТНЫЕ И МЕТАНОВЫЕ ТЕРМЫ ПОДВИЖНЫХ ПОЯСОВ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ДАЛЬНЕЙШИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ 346

Е. Е. Лапина, Л. Э. Лапина

ДИНАМИКА ФОСФОРА В РОДНИКАХ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА 353

О. Е. Лепокурова, И. С. Иванова

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ ВОДОРОДА, КИСЛОРОДА И УГЛЕРОДА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА..... 358

А. И. Малов, Е. С. Сидкина, Д. Д. Ершова, Е. В. Черкасова

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ СТРОНЦИЯ В ПИТЬЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ НА УДАЛЕНИИ ОТ МОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ..... 365

Р. М. Манасытов, Д. Г. Курашев, А. Г. Лим, И. В. Крицков, Т. В. Раудина

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ 371

Р. Х. Мусин, А. Р. Галиева, А. Д. Хамитов

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОСТАВА ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН) 378

А. Ю. Озерский

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГИДРОКСИДНЫХ ВОД 385

А. М. Плюснин, А. В. Украинцев

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КАК ИНДИКАТОР ПРОЦЕССОВ ПРОТЕКАЮЩИХ В НЕДРАХ НА ПРИМЕРЕ УГЛЕКИСЛЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ЗАБАЙКАЛЬЯ..... 392

Е. Ю. Потапова

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЮЖНЫХ РАЙОНАХ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ 399

И. А. Родькина, Е. С. Казак

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ В ОБРАЗЦАХ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ 404

Е. С. Сидкина, А. С. Торопов, А. А. Коньшиев

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОД ИСТОРИЧЕСКОГО РУДНИКА «ГЕРБЕРТЦ» (ЮЖНАЯ КАРЕЛИЯ)..... 410

А. Ф. Сухорукова

ГИДРОГЕОХИМИЯ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ГРАНИТНЫХ КАРЬЕРОВ НОВОСИБИРСКОЙ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ 417

Н. А. Харитонова, Г. А. Челноков, Е. И. Барановская, В. Ю. Лаврушин, И. В. Брагин, Д. Д. Луканов

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАССИВОВ ГОРНОСКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ..... 423

Н. Е. Шиндина, Е. С. Казак, П. В. Гуткович

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА ПОРОВЫХ ВОД ДОННЫХ ОСАДКОВ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА НА ПРИМЕРЕ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ..... 428

ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЯ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОГЕНЕЗА 434

В. Л. Воронин

ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ ВОДНОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА К ВОПРОСАМ ИЗУЧЕНИЯ И ДОБЫЧИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД..... 435

Э. М. Горбунова, С. М. Петухова

ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВОВ НА СОСТОЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ..... 443

О. Ю. Дроздова, С. А. Лапицкий

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПРИРОДНЫХ ВОД И ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С МЕТАЛЛАМИ 450

И. А. Костинова, И. А. Позднякова

ОЦЕНКА ДОЛГОСРОЧНОГО ВЛИЯНИЯ СВАЛКИ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД..... 456

М.Д. Курбонов, А.В. Расторгуев

ОЦЕНКА БАРЬЕРНОЙ РОЛИ АДЫРНОЙ ГРЯДЫ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАЙОНЕ ДИГМАЙСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА, СЕВЕРНЫЙ ТАДЖИКИСТАН 462

Н. В. Кутяйкин, П. К. Коносавский, А. А. Потапов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ОТРАБОТКЕ СКРУ-2 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ..... 467

Р. А. Магомедов

ГЕОСЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО СЕГМЕНТА ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА..... 473

Н. Г. Максимович, В. Т. Хмурчик, А. Д. Деменев, О. А. Березина

СОЗДАНИЕ КИСЛОРОДНОГО БАРЬЕРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ РАСТВОРЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ 480

И. А. Расторгуев, И. В. Литвинова, Н. А. Иост, И. А. Хилько

РАСЧЁТ ЗАКАЧКИ РАССОЛОВ В МНОГОЛЕТНЕ-МЁРЗЛЫЕ ПОРОДЫ НА УЧАСТКЕ ЛЕВОБЕРЕЖНЫЙ С УЧЕТОМ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА 485

Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников

ПОСТМАЙНИНГ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ: ОТ ОЦЕНКИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ К МЕТОДАМ РЕАБИЛИТАЦИИ..... 491

Н. Е. Сизов, А. В. Расторгуев

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ 499

Я. В. Сорокоумова, А. В. Расторгуев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ТЕРРИТОРИИ БАЙКАЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА 504

Е. А. Филимонова, А. Е. Преображенская, Л. О. Гутникова, А. В. Чистякова, Е. С. Казак, А. А. Маслов, Р. В. Веселовский

МИКРОПЛАСТИК В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ 512

А. П. Хаустов

ПОЧВЫ КАК КОМПОНЕТ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 518

М. Ю. Ширнин, Г. Д. Неуважаев, Ф. В. Григорьев, В. Ю. Коновалов

ПРОВЕДЕНИЕ РАМОЧНЫХ ГЕОМИГРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПЗРО СКВАЖИННОГО ТИПА..... 524

А. М. Янников

СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ДРЕНАЖНЫХ РАССОЛОВ, РЕАЛИЗУЕМЫЕ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АК «АЛРОСА» В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КРИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ..... 530

НЕФТЯНАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ..... 536

Н. И. Акзигитов, В. Ю. Мастеркова

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ..... 537

О. В. Голованова

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА НЕОПЛЕЙСТОЦЕНА В РЕГИОНЕ РАЗРАБОТКИ АСТРАХАНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (АГКМ) 543

Е. С. Казак, А. С. Семанова, Н. В. Морозов, А. В. Мосеев, Д. А. Севрюков

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАСТОВЫХ ВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КЕРНА И ШЛАМА ЛЕСКИНСКОЙ СКВАЖИНЫ ЗАПАДНО-ТАЙМЫРСКОГО ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РАЙОНА 549

М. М. Меликов, Я. М. Меликов

МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ В РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НА ПРИМЕРЕ РАВНИННОГО ДАГЕСТАНА 557

И. В. Попков, В. И. Попков

МЕТАЛЛОНОСНЫЕ РАССОЛЫ И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ ДОПЛИТНОГО КОМПЛЕКСА
СКИФСКО-ТУРАНСКОЙ ПЛАТФОРМЫ..... 565

А. С. Семанова, Е. С. Казак

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПОРОВЫХ ВОД СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ
ПОРОД АЧИМОВСКОЙ СВИТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ 571

**ИСТОРИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРЕПОДАВАНИЯ
ГИДРОГЕОЛОГИИ 577**

С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева

ВЫПУСКНИКИ МГУ В СИБИРСКОЙ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЕ. 40 ЛЕТ
ИССЛЕДОВАНИЙ И ВАЖНЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ 578

С. О. Гриневский, А. В. Лехов, В. А. Лехов, Е. В. Кортуннов, Я. В. Сорокоумова

ЗВЕНИГОРОДСКИЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ПОЛИГОН КАФЕДРЫ ГИДРОГЕОЛОГИИ –
ЗАПОВЕДНЫЙ ИСТОЧНИК ПРАКТИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ
РАЗМЫШЛЕНИЙ..... 584

Е. М. Дутова, К. И. Кузеванов, А. Н. Никитенков

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА HYDROGEO В НАУЧНОМ И
УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ 592

Т. А. Киреева, А. В. Лехов, Н. А. Харитонова, Е. С. Казак, Е. И. Барановская

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ И СТРУКТУРА ПРЕПОДАВАНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ «ГИДРОГЕОХИМИЯ»
НА КАФЕДРЕ ГИДРОГЕОЛОГИИ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА 598

Е. Ю. Потапова, А. В. Корзу, Т. С. Егоров

КУРС «РЕГИОНАЛЬНАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ» – ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ..... 604

А. Е. Преображенская, С. О. Гриневский, Р. С. Штенгелов, Е. А. Филимонова

ДЕЛОВАЯ ИГРА КАК ФОРМА ПОСТРОЕНИЯ КУРСА «ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД»
..... 609

В. В. Хаустов

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СТРУКТУРЕ И СОДЕРЖАНИЮ УЧЕБНОГО КУРСА
«РЕГИОНАЛЬНАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ» 615

ПРЕДИСЛОВИЕ

История развития гидрогеологии, как науки и как системы преподаваемых дисциплин гидрогеологического цикла в МГУ им. М.В. Ломоносова, неразрывно связана с геологическим факультетом и кафедрой гидрогеологии этого факультета, которой исполняется в 2023 году 70 лет. Однако, справедливости ради, следует отметить, что первое упоминание о гидрогеологии в МГУ датируется 1943 годом в связи с приказом Всесоюзного Комитета по делам Высшей Школы (ВКВШ) при СНК СССР от 23.03.1943 г. об организации в составе МГУ Геологоразведочного факультета. Создание этого факультета связано с эвакуацией в Казахстан Московского геологоразведочного института (МГРИ). Не эвакуированных и находящихся в Москве студентов МГРИ приняли на Геологоразведочный факультет МГУ и обучали по учебным планам 1941–1943 гг. существовавшего во МГРИ отделения инженерной геологии и гидрогеологии. Заведующим кафедрой гидрогеологии Геологоразведочного факультета МГУ был профессор Г.В. Богомоллов (1905–1981). Уже летом 1943 г. (приказ ВКШ от 8.07.1943 г.) было принято решение о возобновлении работы МГРИ в Москве. В связи с этим профессоров и преподавателей Геологоразведочного факультета МГУ с июля 1943 года перевели обратно во МГРИ (приказ по МГУ № 212 от 31.07.1943 г.).

Следующие систематические упоминания о гидрогеологии в МГУ начинаются после десятилетнего перерыва в 1953 году и связаны с созданием кафедры гидрогеологии геологического факультета выдающимся гидрогеологом профессором О.К. Ланге (1883–1975). Он и был ее первым заведующим с 1953 по 1964 год. Именно с 1953 года и отсчитывается история кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ.

Профессор О.К. Ланге – один из патриархов советской гидрогеологии, крупный организатор науки и учебного университетского процесса. За свою долгую жизнь он организовал в СССР три кафедры гидрогеологии: в 1920 году в Московской горной академии, в 1924 году в Среднеазиатском университете (ныне Национальный Университет Узбекистана им. Улугбека), а 29 лет спустя – в МГУ на геологическом факультете. Он возглавлял эту кафедру до 1964 года в **период ее зарождения** как научного и образовательного коллектива. Именно в этот период была заложена стратегия преподавания и научной деятельности в области гидрогеологии в МГУ как науки геологического цикла. Эта стратегия включала три основных направления учебной и научной деятельности кафедры – региональная гидрогеология; динамика подземных вод и гидрогеохимия.

После О.К. Ланге в 1964 г. заведующим стал профессор Б.И. Куделин, возглавлявший вплоть до его кончины в 1972 г. кафедру в **период ее становления**. Под руководством Б.И. Куделина на кафедре сформировалось новое научное направление региональных гидрогеологических исследований – учение о подземном стоке. Развитие исследований

подземного стока и связанных с ним ресурсов подземных вод зоны активного водообмена практически невозможно без изучения взаимосвязи поверхностных и подземных вод, то есть без глубокой интеграции гидрогеологических и гидрологических исследований. Б.И. Куделин разработал метод расчленения гидрографов рек для оценки их питания за счет подземного стока, носящий сегодня его имя. Этот метод и был важным инструментом в работах кафедры по изучению региональной изменчивости подземного стока. На кафедре при Б.И. Куделине развивались региональные исследования по оценке естественных ресурсов подземных вод. Эти исследования лежат в основе создания под руководством Б.И. Куделина карт подземного стока (СССР и Восточной Европы), не потерявших своей актуальности и сегодня. Школу полевых исследований и картирования подземного стока под руководством Б.И. Куделина прошли выпускники факультета, сформировавшие впоследствии костяк преподавательского и научно-исследовательского состава кафедры тех времен, когда кафедра была лидером в подготовке специалистов-гидрогеологов в СССР.

Б.И. Куделин в 1960 г. пригласил на кафедру В.М. Шестакова (1927–2011) - молодого и яркого представителя знаменитой школы инженерной гидрогеологии ВНИИ ВОДГЕО, который уже в 60-х годах становился одним из ведущих ученых в стране в области гидрогеодинамических исследований. В 1973 г. В.М. Шестаков стал заведующим кафедрой и был им до 1988 года, в период, который можно назвать **периодом развития кафедры**. В.М. Шестаков привнес в университетскую гидрогеологию в МГУ свое видение гидрогеолога, как специалиста, работающего на перекрестке наук о Земле - геологического, гидрологического циклов, понимающего и умеющего применять модели и методы науки механики, а именно теории фильтрации для получения количественных оценок и результатов, связанных с прикладными практическими задачами использования и охраны подземных вод. Он уже в 70-х годах прошлого века успешно создал на кафедре направление математического моделирования, без которого сегодня не обходится практически ни одна наука о Земле. В этот период кафедра выпустила больше всего выпускников – 348 из более тысячи выпускников за весь период ее существования, были созданы фундаментальные курсы общей гидрогеологии, гидрогеодинамики, поисков и разведки подземных вод и гидрогеохимии, явившиеся базой, на развитии которой строится современное гидрогеологическое образование на геологическом факультете МГУ. В период с 1988 по 2009 гг. кафедру возглавлял ее выпускник, профессор В.А. Всеволожский, ученик и соавтор Б.И. Куделина, выдающийся специалист по естественным ресурсам подземных вод и региональной гидрогеодинамике артезианских бассейнов, автор классического университетского учебника по общей гидрогеологии. Этот, объективно **наиболее трудный, период в истории кафедры** совпал не только со временем кардинальных изменений в жизни российского общества, но и с перестройкой университетского образования и переходом с систему обучения бакалавр – магистр. В течение этого периода удалось сохранить коллектив

кафедры, создать серию новых оригинальных курсов, разработать новые программы двухуровневого университетского гидрогеологического образования.

Современный этап развития кафедры - этап работы учебного и научного коллектива, занимающего лидирующие позиции в России в подготовке специалистов-гидрогеологов и проводящего научно-прикладные исследования на самом современном уровне по широкому спектру проблем, требующих оценки и анализа роли подземных вод.

В научном плане исследования кафедры сегодня развивают все то лучшее, что было заложено в советский период ее истории, но с использованием самых современных модельно-ориентированных подходов. Так, например, исследования взаимосвязи поверхностных и подземных вод и формирования ресурсов подземных вод проводится на основе геогидрологических моделей, описывающих трансформацию осадков в поверхностный и подземный сток. При решении практических задач охраны подземных вод от загрязнения применяются модели физико-химической гидрогеодинамики - развиваемого на основе объединения гидрогеохимии и гидрогеодинамики направления. Традиционное для кафедры прикладное направление работ - оценка запасов пресных подземных вод для хозяйственно питьевого водоснабжения сегодня основано на создании и использовании систем геофильтрационных и геомиграционных моделей разного масштаба – от одиночного водозабора до региональной модели масштаба субъекта федерации. Развиваются также направления, которые ранее на кафедре были недостаточно представлены. Это прежде всего гидрогеологические проблемы нефтяной гидрогеологии и минеральных вод в масштабах от фундаментальных гидрогеохимических аспектов их формирования до оценки запасов. В последние годы на кафедре проводятся исследования видов воды, процессов фильтрации и миграции загрязнения в глинистых породах для решения задач нефтяной гидрогеологии и безопасного захоронения ядерных отходов.

В учебном плане сегодня кафедра развивает и поддерживает две магистерские программы, одна из которых готовит специалистов по ресурсам и охране подземных вод зоны активного водообмена, а вторая – специалистов по нефтяной гидрогеологии.

В современной жизни кафедры важное место занимают научные исследования, необходимой составляющей которых являются научные конференции в исследуемой области. К сожалению, в последние десятилетия в нашей стране не так много академических конференций именно гидрогеологической направленности. По-моему, единственным всероссийским значимым событием является проходящее раз в три года Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Несмотря на ярко выраженный региональный характер в названии это Совещание давно уже по существу превратилось во Всероссийскую гидрогеологическую конференцию. Других масштабных научных конференций, на которых рассматривается весь спектр научно-прикладных и образовательных проблем в гидрогеологии,

по-видимому, сегодня в России нет. В тоже время злободневные вопросы развития гидрогеологии как науки и как области прикладных исследований, требующие обсуждения, только нарастают. Именно поэтому основной формой празднования 70-летнего юбилея кафедры гидрогеологии МГУ было выбрано проведение научной конференции, материалы которой представлены в данном сборнике. Задумывая данную конференцию, оргкомитет хотел в наибольшей степени представить срез сегодняшнего состояния гидрогеологических исследований в России. Во многом это удалось, так как мы получили около ста статей, затрагивающих различные аспекты гидрогеологических исследований, проводимых сегодня в нашей стране. С определенным удовлетворением мы отметили, что несмотря на разный научный уровень представленных статей, спектр гидрогеологических исследований в нашей стране достаточно широк. Анализируя и рецензируя присланные работы члены оргкомитета убедились, что они достаточно органично группируются в следующие разделы:

Региональные проблемы формирования и использования ресурсов подземных вод;

Модели и методы моделирования гидрогеологических процессов;

Вычислительная гидрогеодинамика: программные пакеты;

Гидрогеохимия и изотопный состав подземных вод;

Гидрогеоэкология и гидрогеологические проблемы техногенеза;

Нефтяная гидрогеология.

Ну и конечно, ряд авторов, в том числе и сотрудники кафедры гидрогеологии, учитывая, что конференция собирается в честь юбилея кафедры гидрогеологии МГУ, прислали работы, связанные с образовательными проблемами и процессами в гидрогеологии. Это позволило выделить специальный раздел настоящего сборника:

История, методология и современные проблемы преподавания гидрогеологии.

Зав. кафедрой гидрогеологии,

д.г.-м.н. С.П. Поздняков

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ФОРМИРОВАНИЯ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

УДК 556.3.01.06:553.31

АНАЛИЗ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНО-МОДЕЛЬНОГО ПОДХОДА

Л.И. Аузина*¹

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, E-mail: lauzina@mail.ru

Аннотация

В условиях сложной геолого-структурной обстановки, недостаточности и неравномерности изученности месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири, весьма остро стоит вопрос оптимизации гидрогеологических работ. Наиболее рационально решить эту задачу на начальных стадиях исследований путем выделения ряда легко определяемых, косвенных показателей, предопределяющих выбор участков, перспективных для бурения гидрогеологических скважин. В работе использовался метод системно-модельного анализа, в результате реализации которого исследуемые объекты классифицируются в соответствии с поставленной задачей. Разработанная методика получила применение, при структурно-гидрогеологическом районировании Илим-Ленского плато, к которому приурочены основные железорудные месторождения Восточной Сибири, типизации россыпных месторождений Ленского золоторудного района по степени сложности инженерно-гидрогеологических условий, при выделении участков повышенной водообильности на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири и т.д.

Ключевые слова: системно-модельный анализ, оптимизация, гидрогеологические условия

ANALYSIS OF MINERAL DEPOSITS HYDROGEOLOGICAL FEATURES ON THE SYSTEM MODEL APPROACH BASIS

L.I. Auzina*¹

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, E-mail: lauzina@mail.ru

Abstract

The complex structural and tectonic setting, insufficiency and uneven geological and hydrogeological exploration of mineral deposits in Eastern Siberia determine the relevance of the issues of optimization of hydrogeological works. The main purpose of the study is identification of a number of readily defined, indirect indicators that predetermine the selection of sites promising for drilling hydrogeological wells. Here, method of system-model analysis has been used. As a result of the method implementation, the investigated objects are classified in accordance the goal. The developed methodology is used for various purposes: for the structural hydrogeological zoning of the Ilim-Lena

plateau with associated main iron ore deposits of Eastern Siberia, for typification of alluvial deposits of the Lena gold ore region according to the complexity degree of engineering hydrogeological conditions, for the identification of sites featuring increased water abundance in the fields of the oil and gas complex of Eastern Siberia.

Key Words: system-model analysis, optimization, hydrogeological conditions

Введение

В условиях сложной структурно-тектонической обстановки, недостаточности и неравномерности геолого-гидрогеологической изученности, которые характерны для месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири, значительные трудности возникают при схематизации природных условий, оптимизации видов и объемов гидрогеологических исследований. В этих случаях весьма эффективно применение метода системно-модельного анализа.

Разработанная для реализации поставленной задачи методика анализа данных базируется на методах многомерной статистики [1; 2].

Методы исследований

При превалировании качественных признаков над количественными, что характерно для геолого-гидрогеологической информации исследуемого региона, применяется эвристический алгоритм, включающий два основных этапа работы.

Первый этап – обучение, в процессе которого создаются два файла: F1 – файл, представляющий собой совокупность исходных данных по всем точкам объектов-эталонов (то есть участков, наиболее полно изученных в гидрогеологическом отношении); F2 – файл градаций, являющийся комплексом пронумерованных диапазонов изменений всех параметров. В результате совместной работы файлов F1 и F2 создается файл F, в котором вся исходная информация представляется в качественном виде по номерам градаций файла F2. Заканчивается процесс обучения составлением классификационной таблицы объектов-эталонов.

Второй этап – распознавание или прогноз, то есть выявление принадлежности объектов-аналогов (слабо или вообще не охарактеризованных в гидрогеологическом отношении) к тому или иному классу, в результате чего объекты-аналоги классифицируются, и начатая на первом этапе таблица завершается.

Результаты и их обсуждения

Описанная методика получила при типизации россыпных месторождений Ленского золоторудного района по степени сложности гидрогеологических условий и выделении

участков повышенной водообильности на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири.

Месторождения Ленского золоторудного района, находящиеся на площади Бодайбинского синклиория, приурочены к поверхностным водотокам различного порядка. Рудовмещающими породами являются песчано-гравийно-галечные четвертичные отложения, перекрывающие коренные породы архейско-протерозойского возраста. В соответствии с описанной методикой выделено три основных типа месторождений, характеризующихся различной степенью сложности инженерно-гидрогеологических условий [3]: месторождения I типа включают россыпи с простыми условиями, II типа - инженерно-гидрогеологические условия средней сложности, к последнему, к III типу, отнесены объекты со сложными условиями (Табл.1).

Табл. 1 Характеристика месторождений Ленского золоторудного района.

Тип сложности месторождений	Основные признаки			
	Гипсометрическое положение россыпи относительно уреза воды, м	Процент мерзлых пород, %	Абсолютные отметки поверхности, м	Порядок водотока, к которому приурочена россыпь
I	От положительных величин до 0	Более 30–35	360–580	V, VI и выше
II	0...-15	-"-	670–750	IV порядок
III	-15...-30	Менее 30–35	580–670	Приустьевая часть водотоков IV порядка

На конечном этапе составлена схема типизации месторождений Ленского золоторудного района по сложности инженерно-гидрогеологических условий. Конкретно нужно ее показать и комментировать...

Аналогичная работа, направленная на оптимизацию размещения поисково-разведочных скважин на воду, реализована на месторождениях углеводородов Чонской группы, расположенных в пределах Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции и характеризующихся весьма сложными геолого-гидрогеологическими условиями [4], обусловленные разломно-блоковым строением.

В структурном отношении территория приурочена к Непско-Ботуобинской антиклинали, находящейся в Центральной части Непского свода. В геологическом строении исследуемой площади принимают участие образования архея, протерозоя, кембрийской системы, четвертичные отложения, а также триасовые интрузивные образования [5].

В силу слабой изученности выделение зон повышенной водообильности для последующего бурения по прямым гидрогеологическим признакам практически невозможно. В связи с этим разработан принцип оптимизации поисково-разведочного бурения на базе оценки комплексного показателя водообильности с применением системно-модельного

анализа, определение которого производится по косвенным признакам методом экспертных оценок [6; 7; 8].

Анализ исходной информации, представленной в виде базы знаний, включающей как фактографические данные, так и существующие аналитические и вероятностно-статистические модели, работающие на этапе распознавания, позволил выделить ряд косвенных показателей и факторов, в наибольшей степени влияющих на водообильность перспективных подразделений и не представляющих особой сложности при их определении: модуль трещиноватости, линейный и площадной модули подземного стока, ряд аквальных и морфоскульптурных показателей, в том числе превышение и расстояние точек наблюдения над главной и ближней дренами, угол уклона рельефа, индекс пересеченности рельефа. Количественная дифференциация перечисленных показателей методом экспертных оценок и их последующее суммирование явились основой расчета комплексного показателя водоносности, в соответствии с которым выделены наиболее перспективные для бурения разведочных скважин участки [9], что позволило сократить первоначально намеченный объем бурения почти на 30 %.

Заключение

Реализация системно-модельного анализа гидрогеологической обстановки на месторождениях полезных ископаемых позволяет рекомендовать его к широкому внедрению в практику гидрогеологических исследований на начальных стадиях изучения.

Техническая реализация разработанной методики выполнена на базе открытых геоинформационных технологий в среде QuantumGIS, что значительно повысило экономическую эффективность ее применения. Таким образом, описанная методика может быть реализована средствами любого универсального ГИС-приложения.

Список литературы

1. Burges C.J.C. A Tutorial on support vector machines for pattern recognition // Data Mining and Knowledge Discovery. 1998. V. 2. pp. 121–167.
2. Bateman R.M. Openhole log analysis and formation evaluation. – Society of Petroleum Engineers, 2012. 668 p.
3. Аузина Л.И. Опыт применения системно-модельного анализа в гидрогеологии // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых: сб. науч. тр. – Иркутск: Изд-во ИПИ, 1990. С. 138–145.
4. Коробова И.В., Макеев В.М. Оценка неотектонических движений в центральной части Восточно-Европейской платформы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2021. № 6. С. 17–27.
5. Самсонов В.В., Ларичев А.И. Перспективные нефтегазоносные комплексы и зоны южной части Сибирской платформы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. Т. 3. № 4. С.183-191.

6. Budyak A., Parshin A. GIS mapping of geological features of the Baikal mountain region based on integrated geochemical indicators // Goldschmidt 2013 Conference Abstracts. Mineralogical Magazine. 2013. V. 77. № 5. 788 p.
7. Аузина Л.И. Опыт применения системно-модельного анализа в гидрогеологии // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых: сб. науч. тр. – Иркутск: Изд-во ИПИ, 1990. С. 138–145.
8. Геоинформационный подход к оценке ресурсной перспективности площадей (на примере месторождений подземных вод Восточной Сибири) / А.В. Паршин, Л.И. Аузина, С.Н. Просекин, А.В. Блинов, А.Н. Костерев, Г.С. Лоншаков, А.М. Усманова, С.А. Шестаков, Ю.А. Давыденко // Геоинформатика. 2017. № 1. С. 11–20.
9. Аузина Л.И. Один из подходов к оптимизации поисково-оценочных работ на воду на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения секции наук о земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 6. С. 82–88.

УДК 502.51, 556.3.02, 622.277

ОПЫТ ПОСТКАЛИБРАЦИОННОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

П.Ю. Василевский*^{1, 2}, И.Н. Дедюлин², О.А. Глумов², В.Н. Самарцев¹, В.А. Лехов¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: valenciacf@mail.ru, v.lekhov@gmail.com, vnsamartsev@gmail.com

²АО «ВНИПИПромтехнологии», Москва, Россия, E-mail: Vasilevskiy.P.Y@vnipipt.ru, Dedyulin.I.N@vnipipt.ru, Glumov.O.A@vnipipt.ru

Аннотация

Для решения проблемы недостаточной обводненности залежей гидрогенных месторождений урана, обрабатываемых методом скважинного подземного выщелачивания, разработана технология управления ресурсами подземных вод. Инструментом для реализации этой технологии была выбрана гидрогеодинамическая модель месторождения, а объектом исследования – Хиагдинское месторождение урана. Модель была откалибрована с использованием замеров уровней подземных вод, полученных на этапе разведки месторождения и послужила основой для создания модели-врезки палеодолина Х4, которая была выбрана в качестве опытного полигона для реализации технологии управления ресурсами подземных вод. В результате проведения опытного налива в семь заводняющих скважин и наблюдений за реакцией уровня подземных вод в наблюдательных скважинах, были получены данные для верификации и последующей корректировки модели залежи Х4. На верифицированной модели был выполнен прогнозный расчет рекомендуемого режима заводнения залежи Х4.

Ключевые слова: месторождение урана, гидрогеодинамическая модель, калибрация, налив в скважину, коэффициент фильтрации, водоотдача

CASE STUDY: EXPERIENCE OF THE GROUNDWATER FLOW MODEL POSTCALIBRATION VERIFICATION USING FIELD EXPERIMENT DATA

P.Y. Vasilevskiy*^{1, 2}, I.N. Dedyulin², O.A. Glumov², V.N. Samartsev¹, V.A. Lekhov¹

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: valenciacf@mail.ru, v.lekhov@gmail.com, vnsamartsev@gmail.com

²JSC «VNIPIPROMTEKNOLOGII», Moscow, Russian Federation, E-mail: Vasilevskiy.P.Y@vnipipt.ru, Dedyulin.I.N@vnipipt.ru, Glumov.O.A@vnipipt.ru

Abstract

A groundwater resource management technology was developed to solve the problem of insufficient water cut of the hydrogenous uranium deposits developed by the in-situ leaching method. The groundwater flow model of the uranium deposit was chosen as a tool for implementing this technology, and the research object was the uranium deposit. The model was calibrated using groundwater level measurements obtained during the geological exploration and served as a basis for development of a X4 paleovalley sub-model, which was selected as a test site for the implementation of groundwater resource management technology. As a result of experimental slug test in seven injection wells and groundwater level reaction observations in observation wells, data for verification and subsequent adjustment of the deposit X4 model were obtained. Finally, the predictive calculations of the recommended injection regime for deposit X4 were performed on the verified model.

Key Words: uranium deposit, groundwater flow model, calibration, slug test, hydraulic conductivity, specific yield

Введение

Хиагдинское месторождение – гидрогенное урановое месторождение палеодолинного типа, расположенное на юго-восточном склоне Байсыханского поднятия, в левобережье р. Витим. Рудоносные неогеновые палеодолины, выполненные аллювиальными, пролювиальными и делювиальными отложениями, врезаны в преимущественно гранитный фундамент и перекрыты водоупорной вулканогенно-осадочной толщей и покровом трещиноватых неоген-четвертичных эффузивов Амалатского плато базальтов.

Отличительной чертой Хиагдинского месторождения является суровый климат территории, обуславливающий низкую температуру подземных вод продуктивного водоносного горизонта (2-4 °C) и сплошное распространение ММП на глубину от 40 до 90 м [2]. Кроме того, значительная часть рудоносных отложений (20-30%) находится в безнапорных или безводных условиях, что делает их непригодными для отработки методом СПВ. Для вовлечения в отработку этих рудных залежей была разработана технология управления ресурсами подземных вод, реализуемая с использованием региональной гидрогеодинамической модели

Региональная гидрогеодинамическая модель

Региональная геофильтрационная модель разработана с помощью кода Modflow-2005 [6]. В модели семь разобщенных погребенных палеодолин II порядка и их притоки в совокупности с участком Амалатской стволовой палеодолины I порядка рассматриваются как единая гидродинамическая система. Модель воспроизводит среднемноголетнее стационарное состояние геофильтрационного потока до начала промышленной отработки урана. В геофильтрационной схеме выделено пять расчетных слоев (Табл. 1).

Табл. 1 Расчетные слои региональной геогидродинамической модели Хиагдинского месторождения.

№	Возраст	Слой	Характеристика	Мощность, м
1	(N ₁ ³ -N ₂ ¹)dz ₂	ММП вулканогенно-осадочной толщи	Водоупор	50
2		Трещиноватые базальты	Водоносный горизонт	0,1-70
3	(N ₁ ² -N ₁ ³)dz ₁	Массивные базальты	Водоупор	0,1-100
4		Терригенные отложения палеодолин I-III порядков	Водоносный горизонт	1-50
5	PR ₁ -K ₂	Кора выветривания по гранитам	Водоупор	5

На поверхности модели, построенной по данным радарной топографической съемки SRTM [8], задано инфильтрационное питание, оцененное по карте ресурсного потенциала пресных подземных вод [1]. Нижняя граница модели задана непроницаемой. Для второго и третьего слоев плановые границы выбраны по границам поверхностных водосборов. Четвертый модельный слой активен в области распространения палеодолин I-III порядков.

По результатам геостатистического анализа выделенным литологическим разностям присваивались значения коэффициентов фильтрации от 0,5 до 4 м/сут. Полученное пространственное распределение коэффициента фильтрации продемонстрировало увеличение его значений от бортов палеодолины к ее оси, без явной изменчивости от верховьев к низовьям. Хиагдинский разлом схематизирован как слабопроницаемый барьер с различным фильтрационным сопротивлением для каждой залежи.

В ходе калибровки уточнялись значения геофильтрационных параметров и параметров разлома. На откалиброванной по данным 555 замеров статических уровней модели получено распределение напоров с учетом напорно-безнапорного характера фильтрации (Рис. 1).

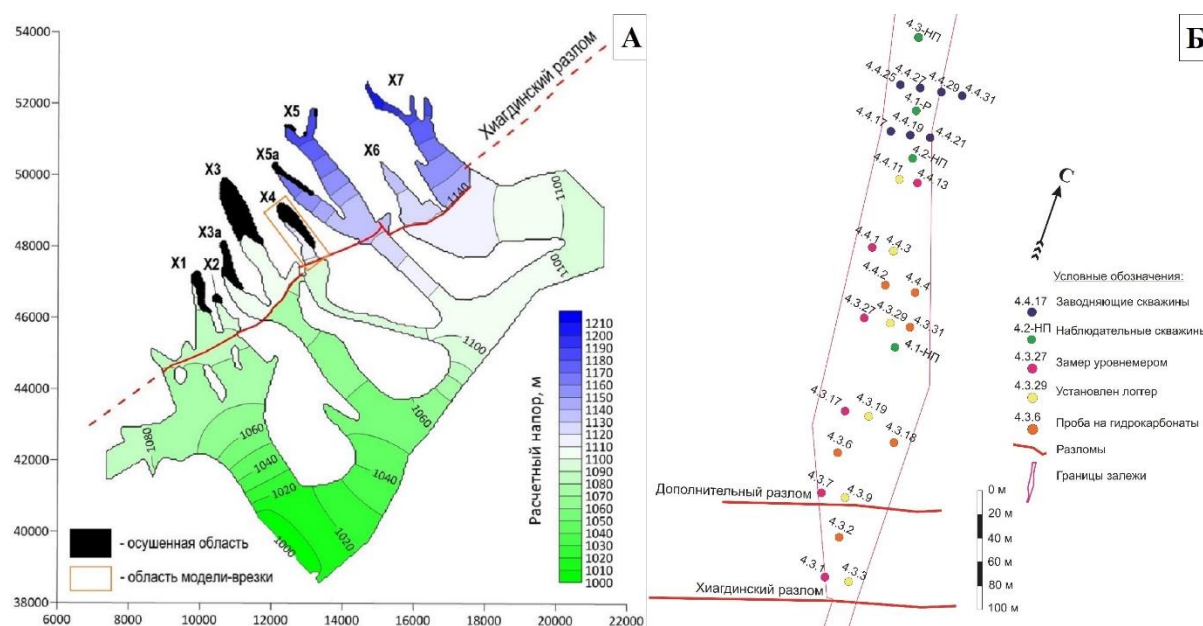


Рис. 1 А - Распределение напоров по результатам моделирования Б – Расположение скважин залежи Х4.

Стандартная ошибка калибровки составила около 2 % от существующего перепада напоров, что свидетельствует об успешности калибровки региональной модели [5] и возможности ее использования как основы для прогнозных расчетов.

Модель-врезка залежи Х4

В плане модель-врезка занимает площадь залежи Х4 от верховий до Хиагдинского разлома. В разрезе модель-врезка соответствуют четвертому слою региональной, который разбит на 10 подслоев. Активная область модели имеет размер 1170×1860 м, размер расчетного блока 5×5 м.

Величина инфильтрационного питания, оцененная по величине суммарного расхода перетекания из вышележащего горизонта в региональной модели, составила 10^{-5} м/сут. По результатам калибровки региональной модели коэффициент перетока Хиагдинского разлома составил 9×10^{-5} сут⁻¹. Отметка напора на границе ниже разлома задана равной 1090 м. Заводняющие скважины заданы с помощью пакета MNW2 [7].

Опытный кустовой налив в залежь Х4

Налив растворов осуществлялся в семь скважин с дебитом около 0,6 м³/ч на одну скважину в течение восьми суток. В скважинах ниже по потоку осуществлялся замер уровней подземных вод. В ходе опыта была отмечена реакция уровня подземных вод по всем скважинам блоков 3 и 4 залежи Х4 (от 0,5 м в скважине 4.3.3 до 12,3 м в скважине 4.4.11).

Обработки результатов налива графоаналитическим способом по квазистационарному периоду повышения уровня проводилась для схемы однородного изолированного напорного пласта. По данным площадного прослеживания проводимость продуктивного водоносного горизонта составила 4,4 м²/сут, что соответствует коэффициенту фильтрации 0,1 м/сут, пьезопроводность - $2,4 \cdot 10^4$ м²/сут.

Верификация и корректировка модели-врезки

Повторная калибровка проводилась при воспроизведении опытного налива на модели. В ходе повторной калибровки модели-врезки уточнены фильтрационные параметры продуктивного горизонта – коэффициент фильтрации, упругоёмкость, Фильтрационная неоднородность была задана путем создания 60 зон с различными значениями горизонтального коэффициента фильтрации и упругоёмкости.

Подбор параметров производился в автоматическом [4] и ручном режимах. Пределы изменения фильтрационных параметров выбраны по результатам обработки опытного налива. После этого была запущена автоматическая калибровка с оценкой чувствительности модели к изменению параметров. Итоговые значения параметров уточнялись в ручном режиме.

Значения коэффициентов фильтрации составили от 0,02 до 2 м/сут, причем наблюдается подтверждаемое по данным геологоразведочных работ увеличение значений коэффициентов фильтрации при движении от верховьев к низовью палеодолины. Значения упругоёмкости составили от $1,5 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-5} 1/м. Значение коэффициент перетока Хиагдинского разлома составило $5,3 \cdot 10^{-2}$ сут⁻¹. В итоге анализа реакции уровня подземных вод в скважинах и имеющейся геологической информации выше по течению был введен дополнительный разлом с коэффициентом перетока $4,7 \cdot 10^{-3}$ сут⁻¹ (Рис. 1Б).

По результатам калибровки коэффициент корреляции модельных и наблюдаемых уровней составил от 0,94 до 0,99, среднеквадратичное отклонение составило от 0,3 до 1,3 м, что свидетельствует о высокой достоверности модельных расчетов.

Прогнозные расчеты

На основании откалиброванной модели были рассчитаны несколько вариантов дальнейшей эксплуатации залежи и выбран оптимальный режим заводнения. Согласно данным мониторинга, уровень по всем скважинам на момент начала опытного налива находился выше кровли пласта. По ряду наблюдательных скважин (4.1-р, 4.1-НП – 4.3-НП) отмечалось наличие ледяных пробок. Подобный подъем уровня и замерзание воды произошли после эксплуатации залежи в течение нескольких месяцев с положительным дисбалансом закачки и откачки более 200 м³/сут. По результатам прогнозного моделирования при дебите заводнения 100-150 м³/сут также отмечается превышение предполагаемой подошвы ММП подземными водами. Рекомендуемый положительный дисбаланс закачки-откачки растворов - 50-80 м³/сут.

Обсуждение результатов

В целом по результатам обработки проведенных опытных работ графоаналитическим методом и путем решения обратной задачи на модели получены более низкие значения коэффициента фильтрации и упругой водоотдачи по сравнению с полученными ранее в ходе предварительной разведки на залежи Х4. Так, по данным обработки двух кустовых откачек и одной одиночной проводимость составила 38-55 м²/сут [3]. Коэффициент фильтрации принимал значения от 1 до 2 м/сут, пьезопроводность - от $4,9 \cdot 10^4$ м²/сут до $1,5 \cdot 10^5$ м²/сут.

Полученный результат может объясняться выпадением в осадок малорастворимых соединений (в частности кальцита) в ходе проведения закачки и откачки растворов, что подтверждается отсутствием гидрокарбонатов в пробах подземных вод (точки отбора проб показаны на Рис. 1Б), в то время как до начала эксплуатации их содержание составляло 683 мг/л [3]. Дополнительно отмечено увеличение приемистости и дебитов скважин после проведения РВР в них, а также после запуска узла подкисления закачиваемых растворов. Для проверки данного предположения необходимо проведение гидрогеохимического моделирования.

Заключение

В результате проведенных исследований была разработана региональная гидрогеодинамическая модель Хиагдинского месторождения урана, которая послужила основой для создания модели-врезки палеодолины Х4, выбранной в качестве опытного для реализации технологии управления ресурсами подземных вод. В результате проведения опытного налива были получены данные для верификации и последующей корректировки модели залежи Х4.

Графоаналитическая и модельная обработка результатов налива показали более низкие значения фильтрационных свойств пласта по сравнению с полученным в ходе геологоразведочных работ, что вероятно объясняется химической кольматацией пласта, обусловленной режимом его эксплуатации методом СПВ. На верифицированной модели был выполнен прогнозный расчет режима заводнения залежи Х4, который показал необходимость снижения положительно дисбаланса закачки-откачки растворов для предотвращения замерзания воды в наблюдательных скважинах вследствие достижения уровня подземных вод подошвы ММП.

Проведенные исследования подчеркивают необходимость постановки опытных гидрогеологических работ для верификации прогнозных моделей в сложных геолого-структурных, геокриологических и гидрогеологических условиях, характерных для месторождений Витимского урановорудного района.

Список литературы

1. Боровский Б.В., Зекцер И.С., Язвин А.Л. и др. Карта ресурсного потенциала пресных подземных вод России. Масштаб 1:5 000 000. ЗАО "ГИДЭК". М. 2013.
2. Геотехнология урана (российский опыт): монография. Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. / М.: «КДУ». «Университетская книга». 2017. 576 с.
3. Пешков П.А., Грязнов В.П., Ган В.Н. Отчет о результатах предварительной разведки месторождений Хиагдинского рудного поля в Центральном Забайкалье. ГПП «Сосновгеология». Иркутск, 1993.
4. Doherty J. PEST Groundwater Data Utilities / Watermark Numerical Computing. Australia. 2001.
5. Groundwater flow modelling guideline / Aquaterra Consulting Pty Ltd. November. 2000.
6. Harbaugh A. W. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2005. С. 6-A16.
7. Konikow, L.F., Hornberger, G.Z., Halford, K.J., Hanson, R.T. Revised multi-node well (MNW2) package for MODFLOW ground-water flow model. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 2009. №6. 67 p.
8. SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1. CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). URL: <https://cgiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>.

УДК 556.3

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД В КАМЕННОЙ СТЕПИ

В.В. Ведяшкина^{*1}, С.П. Поздняков²

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

E-mail: vedyashkina.valera@mail.ru

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: sppozd@mail.ru

Аннотация

В работе проводится анализ многолетних и внутригодовых колебаний уровня грунтовых вод в природном заповеднике Каменная Степь по данным мониторинга Докучаевского колодца. Докучаевский колодец является уникальным объектом для исследования взаимосвязи динамики уровня грунтовых вод и климатических изменений, так как помимо длительного ряда наблюдений, проводимых в нем более 130 лет, существует целый комплекс метеоданных с 1904 года, а также данные о поверхностном стоке на территории Каменной Степи. Такой обширный комплекс данных, замеряемых в течение длительного времени, позволяет проанализировать зависимость поведения уровня грунтовых вод от режимобразующих факторов. При анализе был использован целый комплекс методов, включающий в себя статистический анализ временных рядов, расчет водного баланса в программе SURFBAL, моделирование влагопереноса в зоне аэрации и фильтрации в водонасыщенной части разреза, сравнение результатов моделирования с данными дистанционного зондирования MODIS [3]. По результатам статистического анализа временных рядов было выявлено, что уровень грунтовых вод в многолетнем разрезе формируется за счет инфильтрационного водообмена, однако, в последние годы ведущую роль в экстремальном понижении уровня воды в колодце играет повышенная эвапотранспирация. Результаты моделирования трансформации осадков на поверхности земли показали, что с середины прошлого века в Каменной степи меняются условия формирования поверхностного стока и впитывания влаги в холодный период года.

Ключевые слова: уровень грунтовых вод, инфильтрационный водообмен, модельный анализ, эвапотранспирация.

MODEL ANALYSIS OF MULTI-YEAR GROUNDWATER LEVEL FLUCTUATIONS IN THE KAMENNAYA STEPPE

V.V. Vedyashkina^{*1}, S.P. Pozdniakov²

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: vedyashkina.valera@mail.ru

²Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: sppozd@mail.ru

Abstract

It was analyzed the long-term and annual groundwater level fluctuations in the Kamennaya Steppe Nature Reserve based on monitoring data from the Dokuchaevsky pit. This pit is a unique object for researching the interaction between the groundwater level dynamics and climate change. A long series of observations have been conducting in Dokuchaevsky pit for more than 130 years. Also, there is a whole complex of meteorological data since 1904 and surface runoff data in the Kamennaya Steppe. Such an extensive set of data, measured over a long time, allows us to analyze the dependence of the groundwater level behavior on the regime-forming factors. In the analysis, a variety of methods were employed, including statistical analysis of time series, water balance calculation using the SURFBAL program and simulation of saturated-unsaturated vertical water flow with Hydrsus-1D. The results of the water balance simulation were compared with data from MODIS remote sensing [3]. The statistical analysis of time series revealed that the groundwater level in the long-term section is formed by infiltration water exchange. However, in recent years, increased evapotranspiration has played a leading role in the extreme lowering of the water level in the well. The simulation results indicated that conditions for surface runoff formation and water infiltration from surface during the cold period of the year have been changing in the Kamenaya Steppe since the middle of the 20th century.

Key Words: groundwater level, recharge exchange, model analysis, evapotranspiration.

Введение

Климатические изменения, происходящие во второй половине XX - начале XXI вв. являются предметом активных споров и исследований в области оценки их экологических, экономических и социальных последствий. Изменения климата влияют и на ресурсы подземных вод зоны активного водообмена. Это влияние связано с возможными изменениями гидрологического цикла, проявляющегося в изменении инфильтрационного водообмена поверхностных и подземных вод. Так, например, вследствие увеличения температуры и связанного с ней повышения суммарного испарения происходит понижение уровня грунтовых вод, что в свою очередь непременно отражается на сельском и водном хозяйстве. Поэтому важно понимать основные тенденции изменения климатических условий для осуществления прогноза поведения уровня грунтовых вод.

Исследуемым объектом является Докучаевский колодец, широко известный своим длительным опытом мониторинга подземных вод, начатым еще в 1892 г. Помимо замеров уровня воды в Докучаевском колодце, на метеостанции Каменная Степь регулярно проводится замер осадков, температуры воздуха и почвы, скорости ветра и влажности. Также на территории заповедника существовали стоковые площади, по которым измерялось формирование поверхностного стока в период весеннего половодья и дождевых паводков. Такой обширный

комплекс данных, замеряемых в течение длительного времени, позволяет проанализировать зависимость поведения уровня грунтовых вод от режимобразующих факторов.

Целью работы является выявление зависимости между многолетней динамикой уровня грунтовых вод в Докучаевском колодце и климатической изменчивостью, обуславливающей изменением режимобразующих факторов инфильтрационного водообмена.

Для выявления этих зависимостей использовались методы статистического анализа и моделирование инфильтрационного водообмена в системе «ландшафт – зона аэрации – подземные воды» для участка расположения Докучаевского колодца.

Исходные данные, методика исследования

В качестве исходных для моделирования данных использовались временные ряды мониторинга уровней подземных вод и метеорологических наблюдений. Данные замеров глубин уровней в Докучаевском колодце предоставлены ТЦ «Воронежгеомониторинг». Суточные данные температур воздуха, осадков, влажности и скорости ветра взяты из базы данных ВНИИГМИ-МЦД [1].

Моделирование водообмена на поверхности земли, в зоне аэрации и насыщенной части разреза состоит из двух взаимосвязанных субмоделей. Первая субмодель – модель трансформации влаги на поверхности земли, реализованная с помощью программы SurfBal [1]. Результаты расчетов по ней определяют граничное условие для второй субмодели представленной моделью одномерного вертикального влагопереноса в насыщенно-ненасыщенной среде от поверхности почвы до подошвы моренных отложений. Вторая субмодель реализована с помощью программы Hydrus-1D [4].

Потенциальная и реальная эвапотранспирация, полученная по результатам моделирования были сопоставлены с данными дистанционного зондирования реанализа MODIS [3] для ближайшего к колодцу узла 500-метровой сетки спутниковой съемки.

Результаты и их обсуждения

Для моделирования трансформации осадков на поверхности земли устанавливались параметры поверхностного стока, растительности, промерзания и протаивания, характерные для лесного ландшафта и суглинистой почвы. Калибрация модели по почвенным температурам на разных глубинах, высоте снежного покрова и поверхностному стоку.

По результатам калибровки была получена модель, которая воспроизводит основные закономерности трансформации осадков на поверхности земли. При сравнении результатов моделирования, относящимся к периодам до 1965 года и после, можно выявить уменьшение глубины сезонного промерзания (0): максимальное среднемноголетнее значение в первом периоде составляет 0,55 м, во втором – 0,4 м. Также происходит изменение внутригодовой структуры впитывания влаги в почву (0): в период с 1965 – 2022 г.г. наблюдаются более высокие

значения в осенне-зимний период и весной. Летом же среднегодовые значения впитывания в период после 1965 г. несколько меньше чем в период до этого года.

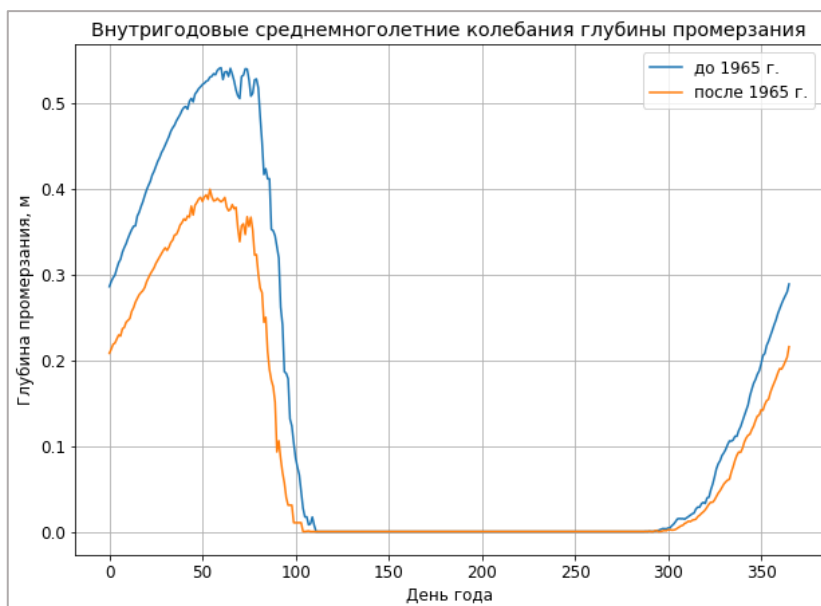


Рис. 1 Среднегодовая внутригодичная изменчивость глубины промерзания (до 1965 г. и после) по результатам моделирования.

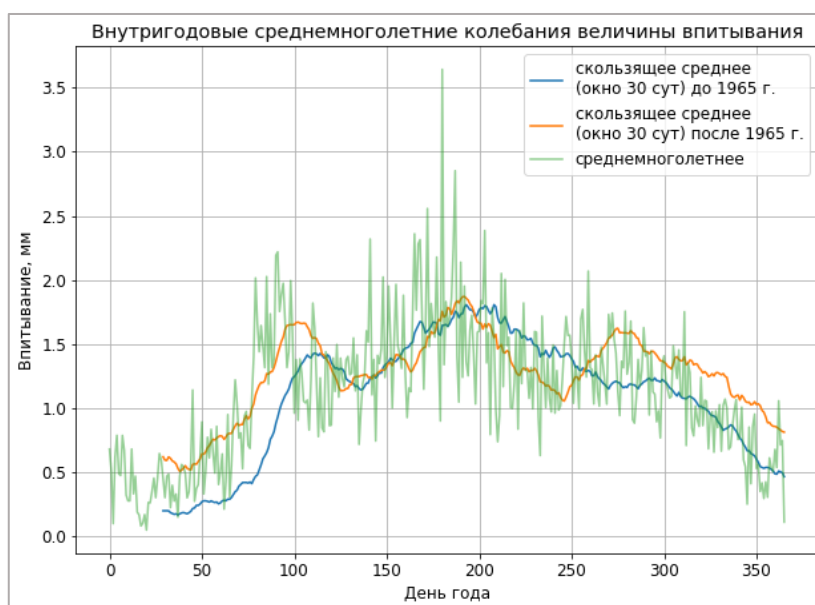


Рис. 2 Среднегодовая внутригодичная изменчивость впитывания влаги в почву (до 1965 г., после, и за весь период) по результатам моделирования.

Далее моделирование влагопереноса происходило в системе поверхность земли – подошва водоносного горизонта (субмодель 2). Одномерный вертикальный профиль, в котором происходит насыщенно-ненасыщенная фильтрация представлен колонной мощностью 16 м, разделенной на 4 слоя, заданных в соответствии со слоями водовмещающих пород морены. Граничное условие на поверхности земли представлено расходом влаги, полученным

в результате расчета суточного впитывания или испарения в субмодели 1. Граничное условие снизу формирует свободный режим фильтрации – дождевание на границе морены и нижележащих отложений. В модельной колонне существует источник стока – транспирация влаги корнями растений.

Калибровка модели проводилась полуавтоматическим способом. Подбору подлежали параметры ван Генухтена для трех верхних слоев модели, где фильтрация происходит в насыщенно-ненасыщенной среде, и коэффициент фильтрации нижнего слабопроницаемого слоя, который на протяжении всего периода наблюдений находится ниже зеркала грунтовых вод. В качестве информации, по которой проводилась калибровка использовалась высота давления на глубине 10 метров.

По результатам калибровки было получено распределение уровней во времени, соответствующих, в целом, наблюдаемым данным (среднеквадратичная ошибка 1,24 м, нормализованная среднеквадратичная ошибка 17%). По графику (0) видно, что модельные уровни не удовлетворяют наблюдаемым в периоды 1940 – 1960 гг. и 2008 – 2020 гг.

Несоответствие модельных уровней наблюдаемым в указанные периоды может быть связано с рядом причин: неучет плановой фильтрации и процессов тепломассопереноса, акселерация понижения уровня водоотбором для сельскохозяйственных нужд в последние годы.

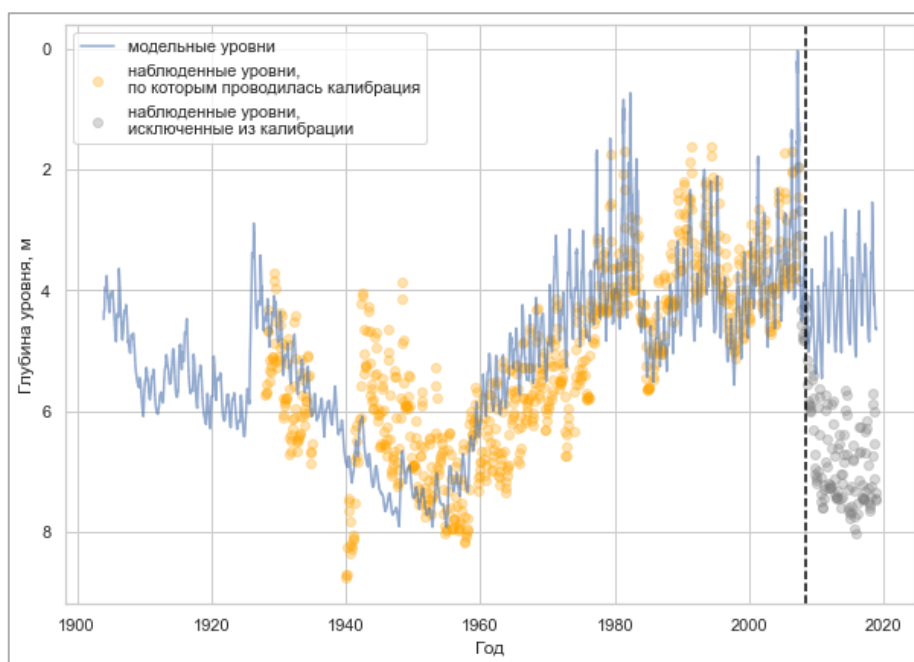


Рис. 3 Модельные и фактические уровни грунтовых вод по результатам калибровки.

Заключение

В результате численного моделирования инфильтрационного водообмена в системе ландшафт – зона аэрации – подземные воды, состоящего из блоков расчета трансформации

осадков и собственно моделирования инфильтрационного водообмена в насыщенно-ненасыщенной среде были сделаны следующие выводы:

- наблюдаемая динамика уровня воды в колодце наследует в многолетнем разрезе ход основных режимообразующих факторов – осадков и потенциальной эвапотранспирации;
- с середины прошлого века в Каменной степи меняются условия формирования поверхностного стока и впитывания влаги в холодный период года: происходит уменьшение глубины сезонно-мерзлого слоя, длительности периода его существования и увеличение впитывания влаги в почву в осенне-зимний период;
- последние 15 лет отмечается экстремальное снижение уровней воды в колодце, плохо воспроизводимое на модели. Остается неясным, является ли это осушение результатом только экстремально низкой серии величин среднегодового инфильтрационного питания последних лет, или этот процесс ускоряется увеличением местного водоотбора для полива огородов в летние засушливые периоды.

Авторы благодарны Поздняковой Н.И. (ТЦ «Воронежгеомониторинг») за предоставленные данные для проведения анализа в рамках исследования.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-47-00008.

Список литературы

1. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR)» Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942, <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>. Дата обращения (27.01.2023)
2. Гриневский С. О., Поздняков С. П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 543–557.
3. Mu Q.Z., Zhao M., Running S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Remote Sensing of Environment Vol. 115. Issue 8. 2011. pp. 1781–1800.
4. Simunek J., Sejna M., Van Genuchten M. Th. Hydrus-1D Manual version 4.16, Department of environmental sciences, university of California, Riverside, California. 2008.

УДК 551.24.01 + 556.3.01

ВЛИЯНИЕ НОВЕЙШИХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА

С.А. Глухова*¹, Н.А. Харитонов², О.В. Пинигин³, Т.В. Суханова⁴,
А.В. Расторгуев⁵

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail:
koval.sa95@yandex.ru

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: tchenat@mail.ru

³Индивидуальный предприниматель, Москва, Россия, E-mail: 7178973@mail.ru

⁴Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: tanikamgu@mail.ru

⁵Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: alvr9@mail.ru

Аннотация

При помощи применения метода дешифрирования космических снимков и карт оцифрованного рельефа в Московском регионе выявлены узкие линейные впадины, выраженные морфологически в рельефе. Выдвинуто предположение, что впадины могут иметь тектоническое происхождение и являются структурами присдвигового раздвиг.

К областям развития впадин приурочены куполообразные поверхности уровня подземных вод каменноугольных отложений, которые в свою очередь на большей части территории отделены от четвертичных водоносных горизонтов региональным юрским водоупором. Положение уровня подземных вод первого водоносного горизонта, приуроченного к каменноугольным отложениям, близко к уровням вод озер, расположенных в пределах впадин. Предполагается, что впадины могут быть приурочены к ослабленным тектоническим зонам и являются областями питания или разгрузки подземных вод.

В районе расположения одного из объектов исследования выполнено гидрогеохимическое опробование с целью установления области питания подземных вод.

Ключевые слова: тектоническая структура, область питания подземных вод, область разгрузки подземных вод, Московский регион

INFLUENCE OF THE MODERN TECTONIC STRUCTURES FOR THE HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE MOSCOW REGION

S.A. Glukhova*¹, N.A. Kharitonova², O.V. Pinigin³, T.V. Sukhanova⁴,
A.V. Rastorguev⁵

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: koval.sa95@yandex.ru

²Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: tchenat@mail.ru

³Individual entrepreneur, Moscow, Russian Federation, E-mail: 7178973@mail.ru

⁴Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: tanikamgu@mail.ru

⁵Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: alvr9@mail.ru

Abstract

Using the method of deciphering satellite images and digitized relief maps in the Moscow region, narrow linear depressions were identified, expressed morphologically in the relief. It has been suggested that the depressions may be of tectonic origin and are structures of strike-slip faults.

Domed surfaces of the groundwater level of Carboniferous deposits are confined to the areas of depression development, which, in turn, are separated from the Quaternary aquifers by a regional Jurassic aquiclude in most of the territory. The position of the groundwater head of the first aquifer, confined to the Carboniferous deposits, is close to the water head of the lakes located within the depressions. It is assumed that depressions can be associated with weakened tectonic zones and are areas of groundwater recharge or discharge.

In the area where one of the research objects is located, hydrogeochemical testing was carried out in order to establish the area of groundwater recharge.

Key Words: tectonic structure, groundwater recharge area, groundwater discharge area, Moscow region

Введение

В Московском регионе выделены тектонические структуры, влияющие на гидрогеологические условия и выраженные в рельефе в виде понижений узкой линейной формы, в пределах которых находятся цепочки озер и болот. В рамках исследования рассматривается два объекта: Тростенская впадина и Клепиковский прогиб.

Тростенская впадина расположена в пределах Смоленско-Московской возвышенности на территории Рузского и Истринского районов и к ней приурочены озера Тростенское и Глубокое.

Клепиковский прогиб локализован в Мещерской низменности, расположен на границе Московской области с Рязанской и Владимирской областями, в пределах него находятся озера Великое, Дубовое, Иваньковское и др.

С областями развития данных понижений связаны куполообразные пьезометрические поверхности первых водоносных комплексов каменноугольных отложений, которые в свою очередь отделены от водоносных комплексов четвертичных отложений келловей-киммериджским региональным водоупорным комплексом. При этом в пределах куполов

положение уровня поверхностных вод озер практически совпадает с максимальным положением уровня подземных вод водоносных комплексов каменноугольных отложений.

Выдвинуто предположение, в соответствии с которым Тростенская впадина и Клепиковский прогиб возможно ограничены тектоническими нарушениями на всем протяжении. За счет наличия ослабленной зоны в келловей-кимериджском водоупорном комплексе, возможно наличие избыточного питания водоносных комплексов каменноугольных отложений из вышележащего четвертичного водоносного комплекса. Таким образом, наличие ослабленной зоны может обуславливать формирование куполообразной пьезометрической поверхности. Следовательно, выявленные структуры могут быть рассмотрены как области питания подземных вод.

Методы исследований

С целью выявления кинематики новейших разрывов выполнено дешифрирование космоснимков и цифровых моделей рельефа по методике М.Л. Коппа [3]. Для выявления линейных элементов выполнен морфоструктурный анализ рельефа территории исследования.

Математическое геофильтрационное моделирование выполнено для оценки условий формирования пьезометрических куполов подземных вод.

Для установления области питания подземных вод на территории Тростенской впадины проведено площадное гидрогеохимическое опробование подземных и поверхностных вод, выполнены химический и изотопный анализы.

Результаты и их обсуждения

Тростенская впадина

Впадина развита над древним Рузским поднятием южного крыла Московской синеклизы. Фундамент сложен породами разного генезиса архейского возраста и залегает на глубине около 1,5 км. Выше залегает осадочный чехол мощностью около 1,3 км, представленный формационными комплексами верхнего докембрия, палеозоя (девонская и каменноугольная системы), мезозоя (юрская и меловая системы) и кайнозоя (неоплейстоцен, голоцен). Тростенская впадина (название условное), пространственно приурочена к юго-западному замыканию Клинско-Дмитровской гряды — крупнейшей положительной структуры Смоленско-Московской возвышенности [2].

Занимая водораздельное пространство, впадина протягивается в субмеридиональном направлении от истоков рек Малиновка и Жуковка на юге до стрелки рек Озерна и Разварня на севере. Длина ее составляет 32 км при ширине 0,5–5,0 км. Дно впадины заболочено и имеет слабый наклон с юго-востока (абс. отм. 205 м) на северо-запад (абс. отм. 195 м). В пределах

впадины расположены озера Тростенское и Глубокое, последнее из которых является самым глубоким озером Смоленско–Московской возвышенности [2].

Результаты морфоструктурного анализа показывают, что в плане Тростенская впадина имеет Z-образную конфигурацию. Возможно, впадина ограничена тектоническими разрывами на всем своем протяжении, а также, сегментирована тектоническими нарушениями северо-восточной ориентировки. Склоны сегментов впадины асимметричны. Кулисное строение разрывов, ограничивающих впадину, указывает на сдвиговую составляющую. Дугообразные ограничения впадины могут указывать на сбросовую компоненту бортовых разрывов. Таким образом, выдвинуто предположение, что структура исследуемой впадины может быть охарактеризована как присдвиговый раздвиг или локальный грабен. Сдвиг, намеченный в литифицированном каменноугольном основании, может быть проявлением разлома фундамента [2].

Для оценки условий формирования купола питания подземных вод выполнено геофильтрационное моделирование в классической версии Visual MODFLOW. Результаты моделирования показывают, что формирование купола питания подземных вод подольско-мячковского водоносного комплекса возможно только за счет наличия зоны повышенной проницаемости келловей-кимериджского водоупорного комплекса в пределах выявленной структуры [2].

Предварительные результаты гидрогеохимического опробования показывают различия в химическом и изотопном составе подземных вод в границах развития Тростенской впадины, по сравнению с периферийной частью.

Клепиковский прогиб

Район исследования находится в Центральной части Русской равнины в пределах Мещерской низменности. В геологическом строении принимают участие породы архея-нижнего протерозоя, слагающие кристаллический фундамент, а также верхнепротерозойские, палеозойские, мезозойские и кайнозойские отложения, входящие в состав осадочного чехла.

Территория исследования находится в пределах новейшей Мещерской впадины, являющейся северной частью Окско-Донского субмеридионального прогиба [4]. Впадина дифференцирована на поднятия и прогибы более высокого порядка, при этом поднятия маркируются останцами ледниковых отложений, а к прогибам приурочены речные долины и озерные впадины.

Объектом исследования является Клепиковский прогиб длиной около 100 км, который протягивается субмеридионально от пос. Ягорный (устье р. Польша) на севере до пос. Спас-Клепики на юге. Высота снижается к югу от 130 до 115 м абс. отм. Ширина прогиба изменяется от 6 до 12 км. К прогибу приурочены долины рек Бужа и Пра с цепочкой озер Святое, Дубовое, Великое, Ивановское, Белое. Здесь прогиб частично наследует древнюю юрскую долину, а

южнее он отклоняется от нее к востоку. В районе пос. Спас-Клепики прогиб сливается с Туголесским прогибом и меняет ориентировку на юго-восточную. Возможно, изменение ориентировки вызвано ростом небольших поднятий, отделяющим его от обширного Рязановского прогиба. С последним он сливается в районе пос. Бельское, где прогиб становится широтным, практически наследуя древнюю юрскую долину, и протягивается до меридионального отрезка Оки и Окско-Цнинского вала.

В пределах исследуемой территории выделены линеаменты, проявленные в современном рельефе преимущественно эрозионной сетью – прямолинейно вытянутыми ложбинами, оврагами, руслами ручьев и рек, а также спрямленными участками озерной береговой линии и цепочками озер. Хорошо выражены линеаменты, которые дешифрируются по отдельным отрезкам крупных рек – Оки, Клязьмы, Гуся, Цны, Пры, Бужи, Поля.

Проведенный анализ линеаментов и разрывных нарушений фундамента, выделенных по геофизическим данным, показывает, что наиболее интересной с тектонической точки зрения является долина р. Пры в ее верхнем и среднем течении. Кулисность расположения линеаментов в озерной группе свидетельствует о нескольких направлениях левосдвиговых деформаций в долине р. Пры.

Таким образом, Клепиковский прогиб представляет собой новейшую структуру, развитую в пределах Мещерской впадины. Он наследует древнее дочетвертичное понижение, местами – дочетвертичную долину. В строении прогиба большое значение имеет состав пород. Широкое развитие глинистых отложений обуславливают интенсивную заболоченность территории. С новейшей тектоникой связана морфология прогиба, связь его с соседними прогибами. Современная тектоника определяет его дифференциацию (прямолинейность озерных впадин). Даже небольшие локальные поднятия, еще не отчетливо выраженные в рельефе, изменяют простираание русла и очертания прогиба.

По гидрогеологическим условиям район исследования приурочен к юго-восточной части Московского артезианского бассейна. Водоносные горизонты и комплексы приурочены к различным по генезису, литологии и условиям залегания породам четвертичного, мезозойского, палеозойского и протерозойского возраста [1]. В северной части Клепиковского прогиба первым водоносным комплексом, приуроченным к каменноугольным отложениям, является гжельско-ассельский. Комплекс отделен от вышележающих водоносных горизонтов четвертичных отложений келловей-кимериджским водоупорным комплексом, распространенным в пределах района практически повсеместно. Келловей-кимериджский водоупорный горизонт отсутствует в северной части района исследования около г. Гусь-Хрустальный, где гжельско-ассельский горизонт перекрыт татарскими отложениями, а также на юге Клепиковского прогиба, в долине р. Пра. По данным гидрогеологической съемки м-ба 1:200 000 [1] в северной части прогиба фиксируется куполообразная пьезометрическая поверхность гжельско-ассельского водоносного

комплекса. При этом положение центральной часть купола тяготеет не к зоне отсутствия келловей-кимериджского водоупорного комплекса, а к осевой части прогиба. В южной части прогиба касимовский водоносный комплекс является первым водоносным комплексом каменноугольных отложений, который отделен от вышележающих водоносных горизонтов четвертичных отложений келловей-кимериджским водоупорным комплексом. В районе Спас-Клепиковских озер фиксируется куполообразная пьезометрическая поверхность, протягивающаяся до р.п. Черусти, где келловей-кимериджский комплекс отсутствует. При этом положение уровня подземных вод сопоставимо с уровнем воды в озерах. В северной части прогиба также фиксируется куполообразная уровенная поверхность, наследующая тенденцию в положении купола гжельско-ассельского водоносного комплекса.

Заключение

Результаты дешифрирования топокарт, космоснимков и цифровых моделей рельефа показывают, что выявленные новейшие структуры ограничены, а также сегментированы тектоническими нарушениями. Кулисное строение впадин, Z- или S-образная конфигурация, асимметрия склонов и дугообразные ограничения указывают на возможную приуроченность Тростенской впадины и Клепиковского прогиба к структурам присдвигового раздвиги.

Модельные оценки, выполненные для одной из структур, Тростенской впадины, подтверждают наличие на ее территории увеличенного питания подольско-мячковского водоносного комплекса через келловей-кимериджские слабопроницаемые отложения.

Результаты исследования показывают, что в пределах центральной части Московского региона, вероятно, существуют присдвиговые структуры растяжения, а некоторые из впадин и озер, традиционно считающихся ледниковыми, могут иметь и тектоническое происхождение. Структурный и морфологический изоморфизм подобных структур позволяет выделять их и дает поисковый критерий для обнаружения областей питания или разгрузки подземных вод [2].

Список литературы

1. Гидрогеологическая карта СССР масштаба 1:200000: Объяснит. записка / М-во геологии СССР. ЦЕНТРОГЕОЛОИЯ. М., 1981. 111 С.
2. Глухова С.А., Пинигин О.В., Расторгуев А.В. Роль присдвиговых структур растяжения в субвертикальной фильтрации водонапорной системы Московского артезианского бассейна // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. №1. С.
3. Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2005.
4. Макаров В.И., Бабак В.И., Гаврюшова Е.А., Федонкина И.Н. Новейшая тектоническая структура и рельеф Москвы. Геоэкология. № 4.1998. С.3-20.

УДК 556.3

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РЕГИОНАЛЬНОМ МАСШТАБЕ И В МАЛОМ РЕЧНОМ БАССЕЙНЕ

С.О. Гриневский^{*1}, А.С. Даниленко¹, В.В. Халеский¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: sogrinev@mail.ru

Аннотация

Региональная оценка влияния наблюдаемых и прогнозных климатических изменений на формирование инфильтрационного питания подземных вод на территории Европейской части России проведена на основе моделирования водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации с использованием многолетних рядов метеорологических характеристик по метеостанциям. Прогнозные климатические сценарии построены на основе наблюдаемых трендов изменения метеорологических характеристик, а также с использованием глобальных климатических моделей. Детальный анализ климатических изменений инфильтрационного питания и подземного стока проведен на площади бассейнов рек Ваймуга и Пачуга Архангельской области с привлечением фактических данных о меженном стоке разных лет. В докладе рассматриваются региональные широтные закономерности современных и прогнозных климатических изменений инфильтрационного питания и их ландшафтная неоднородность.

Ключевые слова: инфильтрационное питание, изменение климата, моделирование

MODEL ANALYSIS OF CLIMATE CHANGES IN GROUNDWATER RECHARGE ON A REGIONAL SCALE AND IN A SMALL RIVER BASIN

S.O. Grinevskiy^{*1}, A.S. Danilenko¹, V.V. Khaleskii¹

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: sogrinev@mail.ru

Abstract

A regional assessment observed and predicted climate changes impact on groundwater recharge in the European part of Russia was carried out on the basis of modeling the water balance on the earth's surface and in the vadose zone using long-term series of meteorological characteristics from weather stations. Predictive climate scenarios are built on the basis of observed trends in meteorological characteristics, as well as using global climate models. A detailed analysis of climatic changes in groundwater recharge and runoff was carried out for the Vaimuga and Pachuga river basins in the

Arkhangelsk region, using actual data on low-water runoff in different years. The report discusses regional latitudinal patterns of current and predicted climatic changes in groundwater recharge and their landscape heterogeneity.

Key Words: groundwater recharge, climate change, modeling

Введение

Анализ многолетних рядов метеорологических данных показывает статистически значимые тренды увеличения среднегодовой температуры воздуха и уменьшения скорости ветра на территории Европейской части России (ЕЧР) с начала 1980-х годов при менее выраженном увеличении годовой суммы осадков [5]. Наблюдаемые климатические изменения, которые максимальны в зимний период, проявляются в увеличении годового и минимального речного стока [4], что подтверждает их значимое влияние на процессы формирования всего водного баланса речных бассейнов и инфильтрационного питания подземных вод. Задачами исследований, результаты которых рассматриваются в докладе, являлся модельный анализ широтных закономерностей влияния наблюдаемых и прогнозных климатических изменений на формирование среднемноголетней инфильтрации в региональном масштабе территории ЕЧР, а также проявления этого влияния в масштабе малого речного бассейна.

Региональная оценка климатических изменений инфильтрационного питания подземных вод

Оценка влияния наблюдаемых и прогнозных климатических изменений на инфильтрационное питание подземных вод проведена на основе моделирования процессов трансформации осадков на поверхности земли (программа SurfBal) [3; 6] и влагопереноса в зоне аэрации с учетом испарения и отбора влаги корнями растений (программа HYDRUS-1D) [9].

Исходными данными для моделирования являлись фактические и прогнозные многолетние ряды суточных метеорологических характеристик (осадки, температура и влажность воздуха, скорость ветра) по 22 метеостанциям, широтно расположенным с юга на север ЕЧР. Ландшафтные различия условий формирования инфильтрации в расчетных моделях характеризовались четырьмя типами, представленными сочетанием древесной («лес») или травянистой («поле») растительности на песчаной или суглинистой почве, при их характерных параметрах [1; 2].

Сопоставление среднемноголетних значений инфильтрационного питания за современный (1989-2019 гг) и предшествующий (1965-1988гг) периоды показало, что, несмотря на увеличение температуры воздуха, среднемноголетнее инфильтрационное питание в современный период на юге ЕЧР практически не изменилось, а в зоне избыточного увлажнения

с индексом аридности (отношение потенциальной эвапотранспирации ET_0 к осадкам O) меньше 1 даже возросло до 50-60 мм/год (рис. 1а).

Детальный анализ процессов формирования водного баланса показал, что увеличение среднемноголетней инфильтрации происходит за счет «зимнего» питания, вызванного существенным ростом зимних температур и осадков и уменьшением глубины сезонного промерзания. При этом в теплый период года изменения инфильтрации незначительны, поскольку увеличение температуры воздуха существенно «компенсируется» снижением скорости ветра, что не приводит к существенному росту суммарной эвапотранспирации [5]. При этом в зоне избыточного увлажнения проявляются существенные ландшафтные различия изменения инфильтрации, обусловленные нелинейностью процессов трансформации водного баланса под влиянием климатических изменений – рис. 1а.

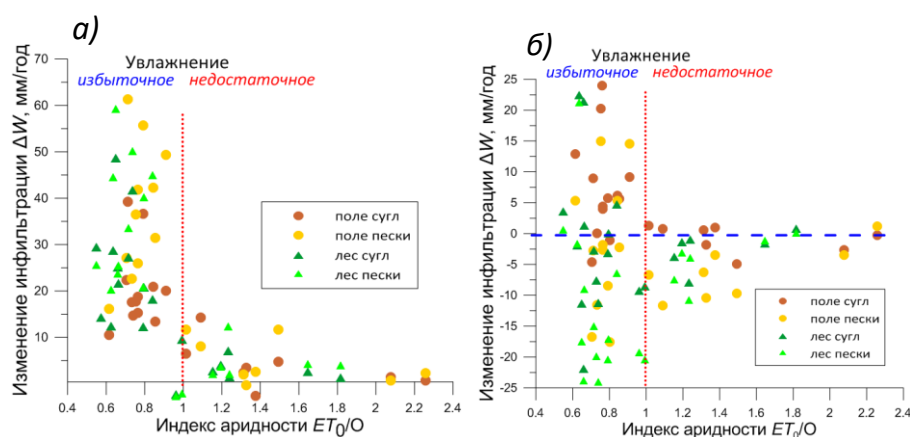


Рис. 1 Связь климатических изменений среднемноголетнего инфильтрационного питания на территории ЕЧР с индексом аридности: а) в современный период (1989-2019) по сравнению с предшествующим (1965-1988); б) в прогнозный период (2020-2042) по сравнению с современным.

Прогнозная оценка климатических изменений инфильтрационного питания проведена в двух постановках.

Краткосрочный климатический сценарий на ближайшие 25 лет построен на основе экстраполяции фактических рядов метеоданных периода 1989-2019 гг при условии сохранения наблюдаемых линейных трендов изменения месячных значений. Согласно результатам моделирования, при таком климатическом сценарии для южных регионов ЕЧР с недостаточным увлажнением прогнозируется преимущественное незначительное уменьшение инфильтрационного питания до 10 мм/год (рис. 1б). Для северных территорий в зоне избыточного увлажнения прогнозное изменение среднемноголетней инфильтрации резко различается в зависимости от ландшафтных условий – на открытых полевых ландшафтах инфильтрация преимущественно возрастает, а на закрытых лесных – уменьшается (рис. 1б). При этом ландшафтная вариация изменения питания составляет ± 25 мм/год, и в средних

значениях его изменения незначительны. Детальный анализ формирования водного баланса при таком климатическом сценарии показал, что относительная «стабилизация» среднегогодового инфильтрационного питания происходит за счет опережающего тренда роста температуры по сравнению с другими метеорологическими характеристиками, что приводит к увеличению эвапотранспирации, компенсирующей рост зимнего впитывания влаги.

Долгосрочные прогнозы на конец XXI века (2070-2090 гг) построены на основе 5-ти глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) семейства CMIP5 при экстремальном сценарии эмиссии парниковых газов RCP8.5 [8]. Их адаптация для территории ЕЧР проведена на основе стохастического генератора LARSWG 6.0 [7], который позволяет моделировать прогнозные ряды метеорологических характеристик суточного разрешения для различных МОЦАО из ансамбля CMIP5 на основе статистических параметров фактических рядов метеоданных по станциям.

Сопоставление полученных прогнозных климатических сценариев на уровне изменений среднегогодовых метеорологических характеристик относительно современных (1989-2019) показывает, что по всем 5-ти моделям прогнозируется однозначное увеличение среднегогодовой температуры воздуха, однако диапазон ожидаемых изменений по разным моделям существенно различен – от 3-4°C до 6-8 °C (рис. 2а). Еще более существенными различиями характеризуются изменения среднегогодовых осадков (рис. 2б). При этом в разных моделях они различаются не только величиной и направленностью прогнозных изменений, но и широтными закономерностями – согласно одним моделям максимальные изменения осадков прогнозируются на юге ЕЧР, а минимальные – на севере, а по другим прослеживается обратная закономерность (рис. 2б).

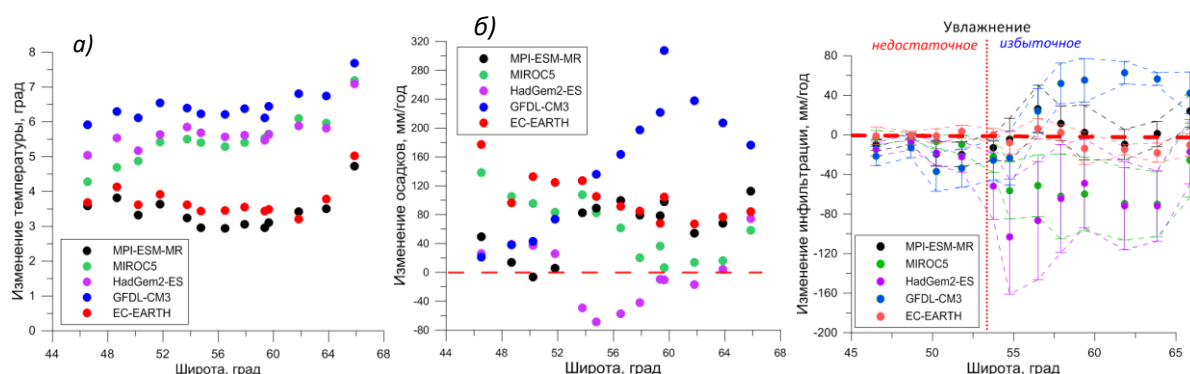


Рис. 2 Прогнозные широтные изменения среднегогодовой температуры воздуха (а), осадков (б) и расчетных значений инфильтрации (в) по пяти МОЦАО на конец XXI в по сравнению с современными.

Следствием неоднозначности климатических сценариев на конец XXI века явились и существенные различия прогнозных изменений среднегогодового инфильтрационного питания по результатам моделирования. При этом, однако, в зоне недостаточного увлажнения, несмотря на различие климатических сценариев, прогнозируется преимущественное

уменьшение среднесуточной инфильтрации при относительно небольших вариациях на разных ландшафтах, а в зоне избыточного увлажнения прогнозные изменения инфильтрации резко различаются и в средних значениях, и в зависимости от ландшафтных условий (рис. 2в).

Таким образом результаты исследований показывают, что основное влияние современных и прогнозных климатических изменений на процессы формирования инфильтрационного питания проявляется в условиях избыточного увлажнения, где направленность и масштаб прогнозных изменений инфильтрации существенно различаются в зависимости от модельных климатических сценариев и ландшафтных условий.

Анализ климатических изменений инфильтрационного питания и подземного стока в масштабе бассейна малой реки

Основываясь на результатах региональных оценок, показавших, что основные климатические изменения инфильтрационного питания характерны для северных территорий избыточного увлажнения, детальные исследования проведены в бассейнах рек Ваймуга и Пачуга Архангельской области с похожими климатическими, ландшафтными и гидрогеологическими условиями, в границах которых находятся разведанные, но не освоенные Пермиловское и Пачужское месторождения подземных вод.

На основе детального районирования бассейна р. Ваймуга по характеру растительного, почвенного покрова и строения зоны аэрации проведено моделирование формирования инфильтрационного питания для выделенных типов ландшафта на основе многолетних рядов фактических метеоданных за период 1965-2019 гг, а также на прогнозный период до 2050 г при условии сохранения наблюдаемых линейных трендов метеорологических характеристик. При этом для моделирования использованы гидрофизические параметры почвы и пород зоны аэрации, полученные по результатам лабораторных определений на образцах, отобранных в шурфах в ходе экспедиционных работ 2021 г и дополненные характеристиками соответствующих типов почв из базы данных БД Soil Почвенного института им. В.В. Докучаева. По результатам моделирования были рассчитаны среднесуточные величины инфильтрационного питания в современный (1989-2019 гг), предшествующий (1965-1988 гг) и прогнозный (2020-2050 гг) периоды и построены соответствующие карты для площади бассейна. Их сопоставление показало, что в современный период среднее инфильтрационное питание на площади бассейна увеличилось незначительно - со 119 мм/год до 129 мм/год, однако на прогнозный период оно возрастет до 168 мм/год. При этом, несмотря на небольшую площадь бассейна р. Ваймуга (1200 км²) с относительно схожими ландшафтными условиями здесь также проявляется существенная ландшафтная неоднородность климатической изменчивости инфильтрации – ее вариации в зависимости от типа растительности, почвы и пород зоны аэрации составляют 1-20 мм/год - в современный и 20-50 мм/год - в прогнозный период.

Анализ проявления современных климатических изменений подземного стока в бассейнах рек Ваймуга и Пачуга также проведен на основе архивных данных меженных гидрометрических съемок при разведке Пермилковского (1980-1985 гг) и Пачужского (1999-2001 гг) месторождений и результатов детальных измерений меженного речного стока в 2021-2022 гг, которые были приведены к многолетним минимальным значениям соответствующих периодов с использованием данных по ближайшим стационарным постам ГМС. Сопоставление рассчитанных таким образом модулей подземного стока по частным водосборам показало, что в бассейне р. Пачуга модули стока увеличились в среднем на 1,5-2 л/с км², в то время как в бассейне р. Ваймуга незначительно уменьшились по сравнению с архивным периодом, что противоречит общей тенденции климатических изменений и результатам моделирования и может быть связано с погрешностью приводки из-за неудачного расположения поста-аналога.

Заключение

- Наиболее значимые климатические изменения инфильтрационного питания подземных вод на территории ЕЧР формируются в зоне избыточного увлажнения, где в современный период оно имеет тенденцию к увеличению, главным образом, за счет зимнего впитывания влаги в периоды оттепелей. При сохранении наблюдаемых климатических трендов на ближайшие 25-лет эта тенденция будет замедляться за счет опережающего роста температуры воздуха и связанного с ней увеличения эвапотранспирации.
- Ландшафтные различия климатической изменчивости инфильтрационного питания весьма существенны и проявляются даже на площади малых речных бассейнов, что обусловлено нелинейными процессами климатической перестройки воднобалансовых процессов на поверхности земли и в зоне аэрации.
- Долгосрочные прогнозы на основе глобальных МОЦАО показывают большую вариативность возможных изменений инфильтрации за счет существенного различия климатических сценариев, что затрудняет их использование на региональном уровне.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-47-00008.

Список литературы

1. Гриневский С.О. Схематизация строения и параметров зоны аэрации для моделирования инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 6, с. 56-67.
2. Гриневский С.О. Моделирование поглощения влаги корнями растений при расчетах влагопереноса в зоне аэрации и инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та, сер. 4. Геология. 2011. № 3, с. 41-52.

3. Гриневский С. О., Поздняков С. П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5, с. 543–557.
4. Фролова Н. Л., Магрицкий Д. В., Киреева М. Б., Григорьев В. Ю., Гельфан А. Н., Сазонов А. А., Шевченко А. И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т 49, № 3, с. 251–269
5. Grinevskiy, S.O.; Pozdniakov, S.P.; Dedulina, E.A. Regional-Scale Model Analysis of Climate Changes Impact on the Water Budget of the Critical Zone and Groundwater Recharge in the European Part of Russia. // Water 2021, 13, 428. <https://doi.org/10.3390/w13040428>
6. Pozdniakov S. P., Vasilevskiy P. Y., Grinevskiy S. O. Estimation of groundwater recharge by flow in vadose zone simulation at the watershed with different landscapes and soil profiles // Engineering geology and Hydrogeology. Bulgarian academy of Sciences. ISSN 0204-7934. 2015. №. 29, p. 47–58.
7. Semenov M.A., P. Stratonovitch The use of multi-model ensembles from global climate models for impact assessments of climate change // Climate Research, 2010. Vol. 41, p. 1–14.
8. Semenov M.A., P. Stratonovitch Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections // Climate Research, 2015. Vol. 65, p. 123–139, doi: 10.3354/cr01297
9. Šimůnek J., Šejna M., Saito H. et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Ver. 4.08. // Prepr. Depart. of Environ. Sci. University of California Riverside. California, Riverside, 2009. 296 p.

УДК 556.332.72

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ ВОДОЗАБОРОВ НА ИНТРУЗИЮ МОРСКИХ ВОД НА ПРИМЕРЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ВОДОЗАБОРА

Е.В. Дробязко*¹, А.В. Расторгуев¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: levic.kate@gmail.com

Аннотация

В скважинах водозаборов подземных вод, расположенных вблизи берега моря, в ходе эксплуатации может отмечаться ухудшение качества воды, выражающееся ростом минерализации, общей жесткости, а также содержания хлоридов. Данная проблема может быть связана с интрузией морских вод (ИМВ) – внедрением клина соленых морских вод в прибрежные напорные или безнапорные водоносные горизонты, которое происходит из-за различия плотности соленых и пресных вод [1]. При ненарушенных гидрогеологических условиях длина клина соленых вод, продвинувшегося глубь водоносного горизонта, определяется естественным потоком подземных вод. Однако при оборудовании подземного водозабора в прибрежной зоне возникает серьезный риск увеличения длины морской интрузии из-за частичного или полного перехвата естественного потока пресных подземных вод, разгружающегося в море.

В качестве объекта изучения был выбран прибрежный водозабор, на котором по причине интенсивной эксплуатации стало отмечаться ухудшение качества подземных вод, связанное с фильтрацией морских вод вглубь водоносного горизонта. Для изучения влияния величины водоотбора из прибрежных скважин на динамику интрузии морских вод была разработана на основе кода SEAWAT [2] трехмерная численная модель. Это позволило обосновать связь эксплуатируемого водоносного горизонта с морем. Было получено сопоставимое с данными химического опробования модельное изменение минерализации в скважинах, а также дан прогноз изменения качества подземных вод при продолжении эксплуатации водозабора.

Ключевые слова: водозабор, интрузия, морские, воды, минерализация, численная, модель.

IMPACT OF COASTAL WATER INTAKES ON SEA WATER INTRUSION USING A NUMERICAL WATER INTAKE MODEL AS AN EXAMPLE

E.V. Drobiazko*¹, A.V. Rastorguev¹

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: levic.kate@gmail.com

Abstract

In wells of groundwater intakes located near the seashore, deterioration of water quality may be observed during exploitation, expressed as an increase in salinity, water hardness, and chloride content. This problem may be related to seawater intrusion – the intrusion of a wedge of saline seawater into coastal aquifers, which occurs due to differences in saline and freshwater densities [1]. Under undisturbed hydrogeological conditions, the length of the saline water wedge that has intruded deep into the aquifer is determined by natural groundwater flow. However, when equipping a groundwater intake in the coastal zone, there is a serious risk of increasing the length of the marine intrusion due to partial or complete interception of the natural flow of fresh groundwater discharging into the sea.

A coastal intake was chosen to study began to experience groundwater quality deterioration due to intensive pumping related to seawater filtration deep into the aquifer. A 3-D numerical model was developed to study the effect of coastal well pumping rates on seawater intrusion dynamics. This made it possible to substantiate the connection of the exploited aquifer with the sea. A model change of salinity in the wells was obtained that was comparable to the chemical sampling data.

Key Words: intake, sea, water, intrusion, salinity, numerical, model

Введение

Проблема интрузии морских вод актуальна для всех стран, имеющих выход к морским акваториям. Интенсивный водоотбор из прибрежных водоносных горизонтов приводит к ухудшению качества подземных вод, связанному с подтягиванием морских вод к водозаборным скважинам. Одним из таких примеров является Орловский водозабор города Севастополя, в скважинах которого в ходе химического опробования были отмечены превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) по содержанию хлоридов, общей жесткости и минерализации. Помимо данных показателей, на наличие интрузии морских вод в районе Орловского водозабора указывают значения хлор-бромного коэффициента (показателя, позволяющего определить наличие ИМВ), определенные для нескольких скважин водозабора – 350-392 при величине хлор-бромного коэффициента Черного моря 316 [3]. Фоновое значение для подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта, полученное при химическом опробовании гидрогеологической скважины, расположенной выше по потоку, составляет 616.

Для изучения влияния величины водоотбора из прибрежных скважин на динамику интрузии морских вод была разработана на основе кода SEAWAT [2] трехмерная численная модель.

Геофильтрационная схематизация

Эксплуатационные скважины Орловского водозабора оборудованы на водоносный горизонт серравальско-мессинских отложений, представленных трещиноватыми известняками [5].

Плановые границы геофильтрационной модели были выбраны исходя из основных гидрогеологических областей питания и разгрузки подземных вод.

Верхняя граница модели соответствует абсолютным отметкам рельефа территории. В качестве нижней границы модели была выбрана кровля серравальских глин, залегающих в основании эксплуатируемого водоносного горизонта.

Особенностью данного района является ограниченная область распространения серравальско-мессинских известняков, к которым приурочен эксплуатируемый водоносный горизонт (полоса вдоль моря шириной 10-25 км). Существует вероятность, что область распространения серравальско-мессинских известняков и является областью питания водоносного горизонта. В связи с этим в качестве границы модели на востоке и юге была выбрана граница распространения серравальско-мессинского водоносного горизонта, вдоль которой было реализовано условие второго рода с величиной расхода, которая будет уточнена в процессе калибровки модели.

На западе подземные воды связаны с морем. На модели эта связь была реализована граничным условием первого рода в полосе в пределах области развития песчаных отложений (отсутствии слабопроницаемых илов) на дне моря [6].

В гидрогеологическом строении исследуемой области принимают участие породы четвертичного, неогенового, палеогенового, мелового и юрского возрастов. Орловский водозабор оборудован для эксплуатации серравальско-мессинского водоносного горизонта, приуроченного к отложениям неогенового возраста. В ходе анализа строения было принято решение по выделению 5 модельных слоев. В качестве первого модельного слоя был выделен четвертичный водоносный комплекс, второго – занкл-пьянчецкий водоупорный горизонт, третьего, четвертого и пятого – серравальско-мессинский водоносный горизонт, разделенный по степени проницаемости по результатам резистивиметрии.

Коэффициенты фильтрации серравальско-мессинского водоносного горизонта были приняты по ранее проведенным исследованиям [4]. Согласно проведенным опытно-фильтрационным работам, водопроводимость на участке изменяется в широком диапазоне и составляет от менее 50 м²/сут до более 10 000 м²/сут. Распределение водопроводимости уточнялось в ходе калибровки модели.

Геомиграционная модель

Для расчета интрузии морских вод в районе Орловского водозабора были построены связанные модели геофильтрации и миграции.

На имеющейся расчетной области море было задано в качестве зоны с постоянной концентрацией – в данном случае задана минерализация Черного моря в районе Орловского пляжа, полученная по результатам химического опробования. Значение минерализации составило 18,4 г/л, которое было задано на модели в ячейках, расположенных под морем.

Величина продольной дисперсивности составила 20 м, поперечной – 2 м.

Уточнение связи эксплуатируемого водоносного горизонта с морем

Морские донные отложения представлены песками, благодаря чему связь подземных вод с морем должна быть хорошей. Однако помимо четвертичных отложений между серравальско-мессинским водоносным горизонтом и морем залегают плиоценовые отложения (закл-пьяченский относительно водоупорный горизонт). Согласно данным бурения, плиоценовые отложения представлены глинами, но вблизи моря в них отмечаются литологические окна-прослои песков с галькой. Поскольку скважины пробурены только в сухопутной части района, состав отложений плиоцена под морем остается неизвестным.

Оценка связи морских вод с эксплуатируемым водоносным горизонтом была выполнена на основе численного моделирования. Было сопоставлено продвижение интрузии, полученное на 2-х профильных моделях, отличающихся лишь проницаемостью плиоценовых отложения под морем: в первом случае были заданы низкие фильтрационные свойства, соответствующие глинам, во втором высокие, характерные для песков.

Наилучшие совпадения распределения напоров и минерализации были достигнуты при составе плиоценовых отложений, представленном песками, что позволяет предположить прямую связь моря с подземными водами.

Модельный анализ формирования интрузии морских вод

Эксплуатация Орловского водозабора с течением времени производилась с различной интенсивностью. На начальных этапах водоотбор был весьма интенсивным (до 53,8 тыс. м³/сут), вследствие чего спустя 14 лет эксплуатации минерализация в некоторых скважинах стала достигать 2-6 г/л. Следствием значительного ухудшения качества подземных вод стало сокращение величины водоотбора из скважин (до 0,21 тыс. м³/сут). Данные меры привели к постепенному уменьшению минерализации в скважинах водозабора до 0,98-1,5 г/л.

В настоящее время снова отмечается увеличение интенсивности эксплуатации водозабора, в 2020 г. величина водоотбора составила 18,7 тыс. м³/сут. Изменения связаны с улучшением качества подземных вод на Орловском водозаборе.

На модели были воспроизведены все этапы эксплуатации Орловского водозабора и получено модельное распределение величин минерализации подземных вод, соответствующее современным условиям.

Согласно моделированию, превышение минерализации над фоновой в связи с интрузией морских вод в ближайшей к морю скважине составляет порядка 0,3-0,5 г/л. При фоновом значении минерализации 0,6 г/л [5], минерализация в скважине будет составлять 0,9-1,1 г/л (что подтверждается результатами химического опробования, проведенного в июле 2021 года – минерализация воды в скважине составила 0,95 г/л).

Решение численной модели также подтверждается значениями хлор-бромного коэффициента, полученными в ходе химического опробования скважин Орловского водозабора, а также скважин сети мониторинга, расположенных поблизости (Рис. 1).

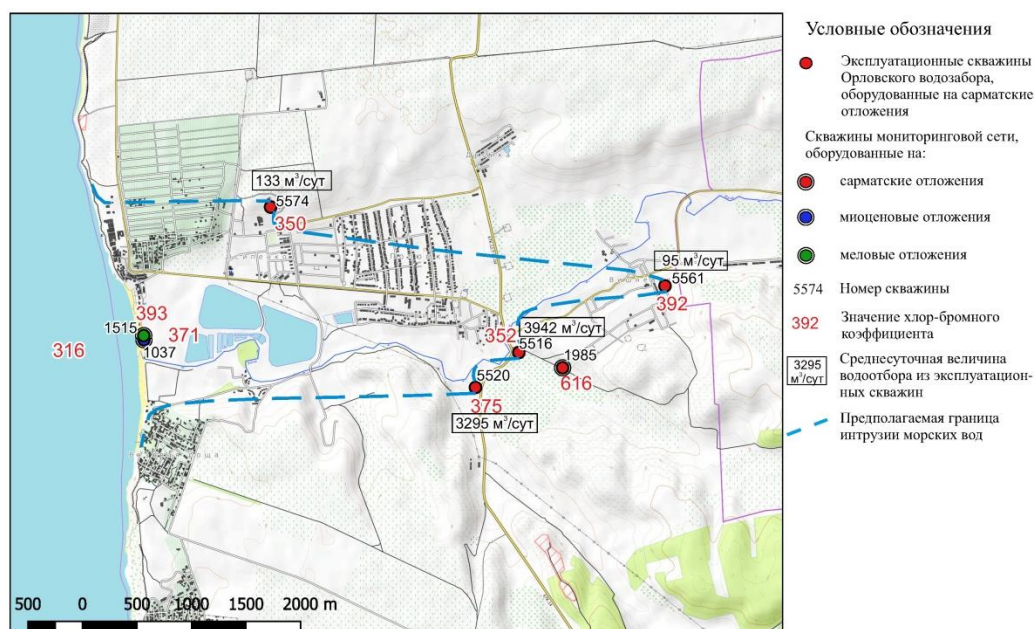


Рис. 1 Распределение значений хлор-бромного коэффициента в районе Орловского водозабора.

Для прогноза положения интрузии морских вод был произведен расчет на следующие 10 лет с водоотбором, соответствующим средней величине за последние годы – 16 тыс. м³/сут (Рис. 2).

Данное решение показывает возможность эксплуатации водозабора с данной величиной водоотбора, риск ухудшения качества подземных вод в скважинах уменьшается. Однако необходимо проводить мониторинг химического состава воды в ближайшей к морю скважине, поскольку она является наиболее подверженной засолению. При росте минерализации необходимо уменьшать величину водоотбора из скважин.

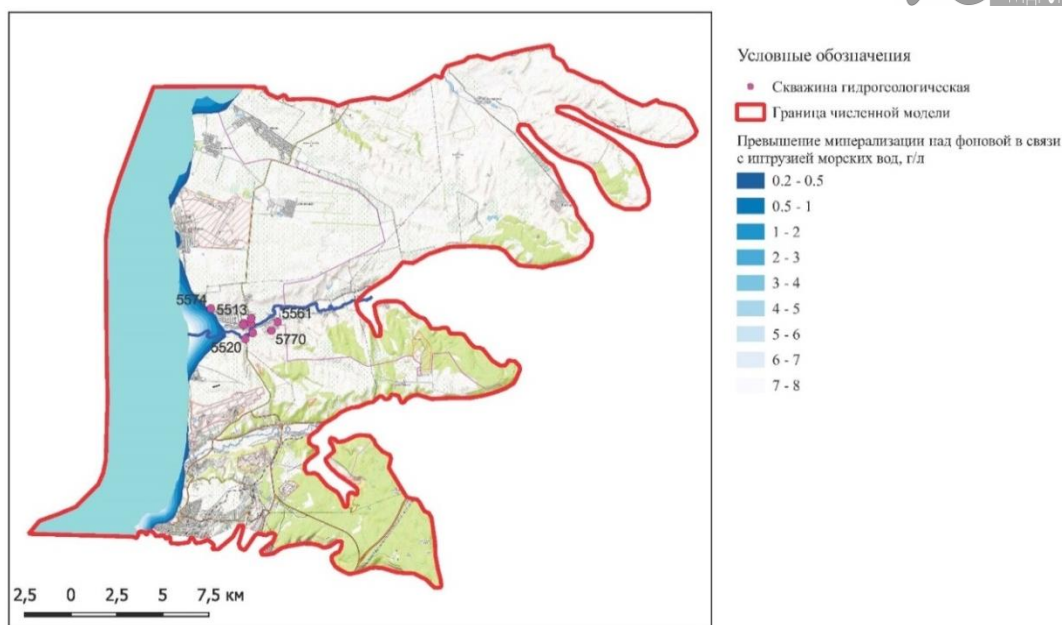


Рис. 2 Прогнозное плановое распределение превышения минерализации над фоновой в связи с ИМВ при водоотборе 16 тыс. м³/сут через 10 лет.

Заключение

По результатам расчета профильных моделей было показано, что в районе Орловского водозабора серравальско-мессинский водоносный горизонт имеет прямую связь с морем через хорошо проницаемые плиоценовые отложения.

Модельно воспроизведен опыт эксплуатации Орловского водозабора, производительность которого была связана с подтягиванием интрузии морских вод. Получено совпадение по напорам, минерализации и границам интрузии по хлор-бромному коэффициенту. Предложена производительность водозабора, снижающая риск развития интрузии.

Работа была выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9).

Список литературы

1. Де Уист, Р.Д. Гидрогеология с основами гидрологии суши, Издательство Мир, 1965.
2. Guo Weixing and Langevin CD (2002), User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A7, 77 p .
3. Ксензенко В.И., Стасиневич Д.С. Технология брома и йода, Москва, 1960.
4. Левицкий П.Д., Лисогор Г.Н. Отчет о результатах поисковых работ по искусственному восполнению запасов подземных вод Орловского водозабора, 1980.
5. Семирякова И.Г. Технологическая схема разработки Орловского участка Альминского месторождения подземных вод эксплуатационными скважинами №№ 5511, 5512, 5513, 5514, 5515, 5516, 5517, 5518, 5520, 5521, 5561, 5571, 5574, 5573, 5560, 5559, 2012.

УДК 556.3

РЕГИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПЕЧОРСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА

Т.С. Егоров*¹¹ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва, Россия, E-mail: tsegorov@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены варианты оценок ресурсов подземных вод для территории восточной части Печорского артезианского бассейна: потенциальных – водозаборы размещаются в каждом блоке равномерной модельной сетки, перспективных – водозаборы только в тех блоках, где уже имеются действующие или проектируемые водозаборы. Создана гидрогеодинамическая модель, с помощью которой обоснована возможность наращивания водоотбора на месторождениях подземных вод. Выполнена оценка потенциальных ресурсов подземных вод методом «больших колодцев» при различных величинах естественных ресурсов и размерах блоков (каких блоков).

Ключевые слова: ресурсы подземных вод, гидрогеодинамическое моделирование, Печорский артезианский бассейн, четвертичные образования, криолитозона

REGIONAL ASSESSMENT OF GROUNDWATER RESOURCES IN THE EASTERN PART OF THE PECHORA ARTESIAN BASIN

T.S. Egorov*¹¹Federal State Budgetary Institution «Gidrospegeologiya», Moscow, Russian Federation, E-mail: tsegorov@mail.ru

Abstract

Possible variants of groundwater resources estimation in the eastern part of the Pechora artesian basin were reviewed: potential – water withdrawals are located in each block of even model grid, prospective – only in blocks where existing or potential water withdrawals are already located. The hydrogeodynamic model was created with the help of which the possibility of water withdrawal increase at groundwater deposits was substantiated. Potential groundwater resources were assessed using the «large wells» method for different values of natural resources and block sizes.

Key Words: groundwater resources, groundwater flow simulation, Pechora artesian basin, Quaternary formations, cryolithozone

Введение

Развитие хозяйственно-промышленного комплекса и ухудшение качества поверхностных вод в пределах восточной части Печорского артезианского бассейна определяют использование подземных вод, как основного источника водоснабжения. Региональная оценка прогнозных ресурсов подземных вод позволит обосновать возможность обеспечения потребности населения в питьевой воде, а также потребности промышленности, технологические процессы которой рассчитаны на использование воды надлежащего качества.

Мерзлотно-гидрогеологические условия исследуемой территории

На территории восточной части Печорского артезианского бассейна распространены многолетнемерзлые породы (ММП), имеющие двуслойное строение: погребенные (реликтовые) и развитые с поверхности [4]. Реликтовые многолетнемерзлые породы являются региональным водоупором, разделяющим пресные и соленые подземные воды. Глубина залегания кровли ММП составляет 80–200 м, подошвы – до 240–465 м. Многолетнемерзлые породы, развитые с поверхности, относятся к зоне массивно-островного распространения. В северо-восточной части исследуемой территории мощность мерзлой толщи достигает 30 м. В области распространения ММП питание подземных вод как правило отсутствует, оно осуществляется только в пределах таликов зон под речными долинами.

По гидрогеологическим условиям территория исследования представляет собой водоносную систему, состоящую из двух водоносных пластов (голоценовая водоносная толща и чирвинский водоносный горизонт), разделенных относительно водоупорным горизонтом (тимано-уральским).

Наибольший практический интерес для организации централизованного водоснабжения на исследуемой территории представляет чирвинский водоносный горизонт,

В различные годы было разведано 22 месторождения подземных вод с суммарными запасами чирвинского водоносного горизонта около 5 800 м³/сут, 20 месторождений эксплуатируются для хозяйственно-питьевого водоснабжения и для обеспечения потребностей промышленности.

Чирвинский водоносный горизонт распространен повсеместно, выдержан по мощности, которая составляет 35 м, приурочен к песчано-гравийно-галечным отложениям с прослоями супесей и суглинков. Подземные воды горизонта напорные. Практически по всей площади исследования чирвинский водоносный горизонт является защищенным от поверхностного загрязнения [2]. По химическому составу воды соответствуют требованиям СанПиН 2.1.3684-21 [6], за исключением повышенного содержания железа, которое носит региональный характер.

Методы исследований

Оценки перспективных и потенциальных ресурсов подземных вод выполнены для чирвинского водоносного горизонта. Величина допустимого понижения определяется величиной напора над его кровлей.

Оценка ресурсов выполнена по материалам геологических, гидрогеологических, гидрохимических, гидрометрических работ на разведанных и оцененных месторождениях, дополнительно использованы картографические материалы регионального характера.

В зависимости от схемы эксплуатации в технико-экономическом отношении можно выделить два варианта оценок прогнозных ресурсов:

1. Оценка потенциальных прогнозных ресурсов предполагает равномерное размещение имеющихся в наличии и гипотетических водозаборных сооружений по всей территории исследования, такие потенциальные прогнозные ресурсы определяются, как категории P_2 и P_3 [5].

2. Оценка той части прогнозных ресурсов, которая исключает вероятность размещения новых водозаборных сооружений и учитывает только возможность увеличения водоотбора на действующих участках, такие ресурсы справедливо отнести к категории P_1 [5].

Таким образом, для оценки прогнозных ресурсов категории P_2 и P_3 водозаборы размещаются в каждом блоке равномерной модельной сетки, а для оценки ресурсов категории P_1 – только в тех блоках, где уже имеются действующие или проектируемые водозаборы.

Перспективные ресурсы подземных вод

Оценка прогнозных ресурсов подземных вод выполнена с использованием метода математического моделирования, в связи со сложностью гидрогеологических условий территории, определяемых фильтрационной неоднородностью чирвинского водоносного горизонта и разнообразием гидродинамических границ,

Кроме того, только на модели имеется возможность реализации различных вариантов техногенной нагрузки, имитируемой работой водозаборных сооружений.

Внешние границы модели заданы граничными условиями III рода по рекам: на востоке – р. Большая Макариха; на юге и юго-востоке – р. Уса; на юго-западе – р. Печора; на западе – р. Лая; и граничным условием II рода на севере по водоразделу.

Внутренние границы III и II родов заданы по водотокам и скважинам соответственно [7]. Общая площадь модели - 5 815,8 км², шаг модельной сетки - 500×500 м.

Гидрогеологическое строение исследуемой территории определяется тем, что инфильтрационное питание в чирвинский водоносный горизонт поступает через слабопроницаемую толщу тимано-уральских отложений, что собственно являет собой процесс перетекания.

При оценке прогнозных ресурсов подземных вод следует ориентироваться на неограниченный период эксплуатации [8], поэтому при оценке использована стационарная версия уравнения (1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial H}{\partial y} \right) + R + T(H_{скв} - H) + T_p(H_p - H) = 0, \quad (1)$$

где T — проводимость водоносного горизонта; H — напор в водоносном горизонте; R — интенсивность перетекания через слабопроницаемую толщу; $H_{скв}$ и H_p — уровни воды в скважине и в реке соответственно; T_p — интегральная проводимость подрусловых отложений.

Для калибровки гидрогеодинамической модели решена обратная задача с использованием отметок уровней чирвинского водоносного горизонта на 2016 г. Решение обратной задачи сводилось к последовательному решению серии прямых задач с перебором расчетных параметров: проводимости чирвинского водоносного горизонта, интенсивности перетекания и интегральной проводимости подрусловых отложений.

На верифицированной модели выполнена оценка перспективных ресурсов подземных вод только на участках эксплуатируемых месторождений подземных вод (20 месторождений) с учетом допустимого понижения. Суммарные ресурсы оценены в количестве 78 645 м³/сут [3]. Формирование баланса происходит за счет: рек — 52% (приток из рек — 12%, отток в реки — 40%); интенсивности перетекания — 38%; водоотбора скважинами — 10%. Изменение баланса при водоотборе относительно естественных условий (без водоотбора) связано с сокращением оттока в реки на 55,6% и увеличением питания из рек на 13,2%.

Потенциальные ресурсы подземных вод

На гидрогеодинамической модели была решена серия прогнозных задач для оценки потенциальных ресурсов подземных вод без учета латерального потока.

Решение прогнозных задач осуществлялось при различной сеточной разбивке исследуемой территории (от 500 м до 30 км с шагом 500 и 1000 м).

Исходные для тестовых задач (интенсивность перетекания и проводимость чирвинского водоносного горизонта) задавались посредством их интерполяции. Допустимые понижения уровня определялись положением кровли горизонта и уровней модельных уровней.

Оценка ресурсов выполнена для каждого блока равномерной модельной сетки методом «больших колодцев» (2) [1]. При этом необходимо учитывать, что ресурсы подземных вод при неограниченном периоде эксплуатации не должны превышать естественные ресурсы (3):

$$Q \geq \frac{2\pi TS}{\ln \frac{R_{\delta}}{r_k}}, \quad (2)$$

$$Q \leq Q_{ep}, \quad (3)$$

где Q и Q_{ep} — потенциальные и естественные ресурсы подземных вод соответственно; S — допустимое понижение уровня; R_{δ} и r_k — радиус блока и приведенный радиус водозаборного сооружения (большого колодца) соответственно.

Очевидно, что величина естественных ресурсов исходя из уравнения (3) напрямую влияет на масштабы прогнозных ресурсов подземных вод.

В процессе исследований было рассмотрено пять вариантов оцененных естественных ресурсов (Рис. 1). В первом варианте величина естественных ресурсов определялась интенсивностью перетекания ($Q_{пр\_2022}$), полученной по результатам решения обратной задачи гидрогеодинамической модели. Для последующих вариантов величина естественных ресурсов принималась в соответствии со среднегодовым многолетним меженным подземным стоком в рек, рассчитанным в разные годы с разной обеспеченностью стока: 50% ($Q_{пр50\_1972}$) и 90% ($Q_{пр90\_1972}$) обеспеченности, рассчитанные в 1972 г. за весь период наблюдений; 95% обеспеченности, рассчитанные в 1997 г. ($Q_{пр95\_1997}$) и 2011 г. ($Q_{пр95\_2011}$) за весь период наблюдения за расходом рек.

Следует отметить следующий факт; если считать естественные ресурсы равными величине подземного стока, получают заниженные величины прогнозных ресурсов, т.к. сток подземных вод в реки — это только часть разгрузки подземных вод, которая может осуществляться и испарением, и родниковым стоком и т.д.

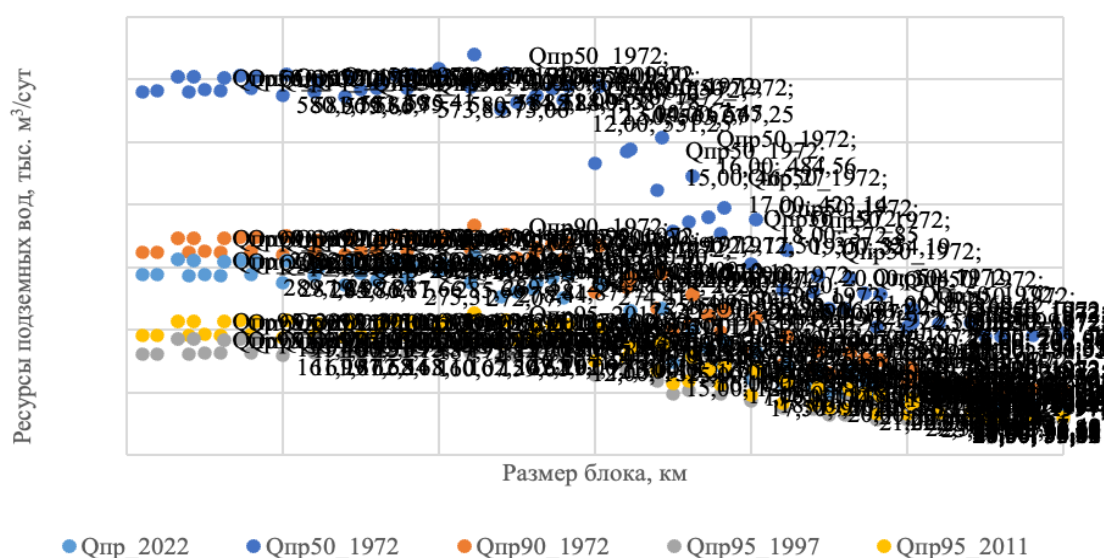


Рис. 1 Результаты оценки потенциальных ресурсов подземных вод при различных размерах блоков.

Для того чтобы величина горизонтального потока в уравнении баланса являлась малосущественной величиной по отношению к питанию, размер блока предлагается оценивать по формуле (4):

$$L \gg \frac{PI}{W}, \quad (4)$$

где L — ширина блока; I — градиент напоров; W — инфильтрационное питание.

Для исследуемой территории ширина блока составляет:

$$L \gg \frac{62,5 \times 0,0012}{5 \times 10^{-5}} = 1500 \text{ м}$$

Заключение

Решение прогнозной задачи показало, что на разведанных участках месторождений подземных вод распределенного фонда недр возможно наращивание запасов более чем в 13 раз по сравнению с утвержденными запасами.

Суммарный водоотбор в 78 645 м³/сут (при утвержденных запасах на месторождениях подземных вод распределенного фонда недр – 5 800 м³/сут) может рассматриваться в качестве дополнительного источника водоснабжения при условии перспективного развития региона, так как модельные понижения уровней оказались меньше их допустимых значений.

При равномерном водоотборе, распределенном по всей площади исследования, ресурсы подземных вод отличаются примерно в три раза (при использовании в расчетах величины естественных ресурсов 50 и 95% обеспеченности).

Выбор «жесткого критерия» обеспеченности естественных ресурсов позволяет уменьшить ущерб речному стоку, и при этом величина ресурсов подземных вод будет обеспечена в течение всего года.

Оценку потенциальных ресурсов подземных вод для исследуемой территории целесообразно выполнять при ширине блока не менее 15 км и при величине естественных ресурсов 90–95% обеспеченности.

Список литературы

1. Биндеман Н.Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод / М.: Госгеотехиздат, 1963. 204 с.
2. Гольдберг В.М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / М.: Недра, 1984. С. 171–177.
3. Егоров Т.С. Оценка прогнозных ресурсов подземных вод Усинского района (восточной части Печорского артезианского бассейна) с использованием гидрогеодинамического моделирования // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 243–253.

4. Ершов Э.Д. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / М.: Недра, 1988. 357 с.
5. Классификация запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод / М.: МПР России, 2007.
6. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.
7. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика / М.: Из-во МГУ, 1995. 368 с.
8. Язвин Л.С. Оценка прогнозных ресурсов питьевых подземных вод и обеспеченность населения России подземными водами для хозяйственно-питьевого водоснабжения // Разведка и охрана недр. 2003. № 10. С. 13–20.

УДК 556

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА СЛОЖЕННОГО КАРСТУЮЩИМСЯ ПОРОДАМИ В ЗОНЕ ПОДПОРА КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Ю.А. Килин¹, И.И. Минькевич*¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, E-mail: iks-org@mail.ru

Аннотация

Территория Чусовского мыса относится к району преимущественно гипсового и карбонатно-гипсового карста. На гидродинамическую и гидрохимическую обстановку большое влияние оказывает Камское водохранилище. Происходит активизация карстовых процессов. Увеличивается мощность переходной гидродинамической зоны, что проявляется в возрастании частоты карстовых провалов. Высокая растворяющая способность поверхностных вод и подземных вод соликамского и иренского водоносных горизонтов кунгурского яруса нижней перми способствовали развитию карстового провала в д. Городище (1991 г.). Периодические наблюдения за химическим составом подземных и поверхностных вод показали, что химический состав подвержен колебаниям, количество сульфатов возрастает с 1163 мг/дм³ (2018 г.) до 1403 мг/дм³ (2021 г.).

Ключевые слова: карстовый провал, Чусовской мыс, гидродинамические зоны карста, гидрогеохимия сульфатно-карбонатных водоносных горизонтов

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE AREA COMPOSED BY KARSTING ROCKS IN THE BACKUP ZONE OF THE KAMA RESERVOIR

Yu.A. Kilin¹, I.I. Minkevich*¹

¹Perm State National Research University, Perm, Russian Federation, E-mail: iks-org@mail.ru

Abstract

The territory of the Chusovsky Cape belongs to the region of predominantly gypsum and carbonate-gypsum karst. The hydrodynamic and hydrochemical situation is greatly influenced by the Kama reservoir. There is an activation of karst processes. The thickness of the transitional hydrodynamic zone is increasing, which is manifested in an increase in the frequency of karst failures. The high dissolving power of surface waters and groundwaters of the Solikamsk and Irensky aquifers of the Kungurian stage of the Lower Permian contributed to the development of a karst sinkhole in the village of Gorodishche (1991). Periodic observations of the chemical composition of ground and surface

waters have shown that the chemical composition is subject to fluctuations, the amount of sulfates increases from 1163 mg/dm³ (2018) to 1403 mg/dm³ (2021).

Key Words: karst sinkhole, Chusovskoy cape, hydrodynamic zones of karst, hydrogeochemistry of sulfate-carbonate aquifers

Введение

Территория Чусовского мыса относится к Полазнинскому району преимущественно гипсового и карбонатно-гипсового карста [1]. После строительства плотины в районе существенно изменились гидродинамические и гидрохимические условия т.к. данная территория оказалась в зоне подпора Камского водохранилища (Рис.1). По данным гидрологического поста в г. Добрянка абсолютные отметки уреза воды по Камскому водохранилищу составляют: в половодье при 1 % обеспеченности – 109,1 м; нормальный подпорный уровень – 108,5 м; при предельной зимней сработке – 100,0 м. В первые годы после создания водохранилища подпор подземных вод наблюдался на расстоянии 2-3 км в сторону водораздела. В настоящее время зона влияния уменьшилась примерно до 500 м (по данным ВерхнекамТИСИЗа).

Зона активного водообмена сложена четвертичными аллювиальными отложениями, обвально-карстовыми неоген-четвертичными образованиями, терригенно-карбонатными породами соликамского горизонта и сульфатными породами иренского горизонта нижней перми, мощность отложений 100-120 м [4]. Соликамский горизонт представлен известняками, мергелями, песчаниками. Мергели светло-серого, коричневого цвета тонкослоистые; известняки светло-серые, светло-коричневые, сильнотрещиноватые и кавернозные, иногда заполненные кальцитом; песчаники серые, мелкозернистые на глинисто-карбонатном цементе. Мощность соликамских отложений на участке исследования составляет 35-40 м. Под соликамским горизонтом залегает иренский горизонт, представленный карбонатно-сульфатными отложениями мощностью 115-120 м.

На участке исследований породы соликамского горизонта обнажаются в виде берегового откоса крутизной 50-70° высотой 40-50 м, который подвержен процессам физического выветривания, а на урезе воды – абразионным (Рис. 1).



Рис. 1 Чусовской мыс.

У подошвы обнажения из обломков коренных пород формируется толща коллювиальных отложений, которые перерабатываются за счет волновой деятельности. Скорость переработки береговых откосов составляет от 0,5 до 1,0 м. Уступы Чусовского мыса сформированные после образования водохранилища (1954 г.) имеют трещины бортового отпора, которые ускоряют развитие карста и способствуют разрушению склонов.

Карстующиеся породы района характеризуются интенсивной трещиноватостью. Преобладающее направление тектонических трещин в обнажениях пород – СВ 50° и СЗ 320°. Эта генетическая группа трещин играет основную роль в карстообразовании, что подтверждается развитием поверхностных карстовых форм (овраги, цепи воронок, озера).

Площадь Чусовского мыса составляет 2,8 км² с плотностью карстовых форм 4,5 шт./км². По обеим сторонам мыса скважинами в руслах рек Камы и Чусовой вскрыты под аллювиальными отложениями в известняках и гипсах иренского горизонта кунгурского яруса (Р₁kg) открытые и заполненные карстовые полости на глубинах 30,2-41,1 м, вертикальной мощностью 0,4-0,6 м.

На участке исследований в д. Городище имеется карстовый провал, образовавшийся в 1991 г. в мергелях соликамского и сульфатных породах иренского горизонтов. Он находится между карстовыми озерами, расположенными по линии СВ 50°. Направление развития подземной части провала - СЗ 325° [5]. Эволюция карстового провала приведена в табл. 1. В настоящее время провал засыпан бытовым мусором. Первоначальные размеры карстового провала: длина входного отверстия 2,8 м, ширина 1,7 м, глубина 27 м. Карстовый провал такой глубины относится по классификации Г.А. Максимовича к карстовой шахте, он заканчивается округлым гротом диаметром 13 м и высотой 8 м (Рис. 2). Стенки провала сложены терригенно-карбонатными породами соликамского горизонта, на дне провала – осыпь, представленная обломками коренных пород.

Табл. 1 Эволюция Городищенского провала (1991 – 2021 гг.).

Дата обследования	Длина, м	Ширина, м	Глубина, м	Скорость отступления стенок, м/год
20.06.1991	2,8	1,7	27	
22.05.1994	3,2	2,5	27	0,2
21.06.2001	11,0	7,0	20	0,9
23.05.2006	16,2	11,6	7	1,0
25.09.2018	16,7	15,2	3*	0,3
08.05.2019	16,7	15,5	3*	0,3
24.05.2021	26,8	20,2	3*	

Примечание: * - карстовый провал засыпан бытовым мусором

Предполагаемый первоначальный объем полости, возникшей в сульфатных породах иренского горизонта, составлял 1200 м³. Формирование полости обусловлено высокой растворимостью сульфатных и карбонатных пород иренского горизонта залегающих на глубинах 45-50м [5; 6].

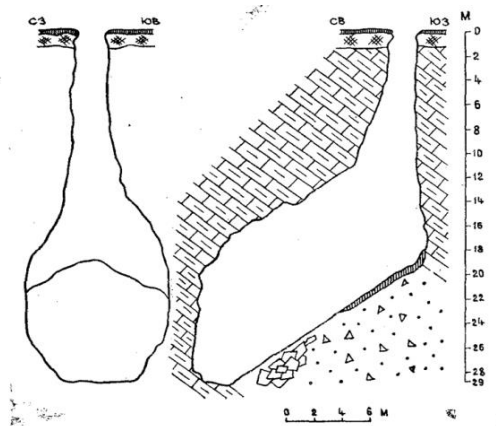


Рис. 2 Схематический геологический разрез провала в д. Городище в 1991 г.

Методы исследований

Высокая растворяющая способность подземных вод иренского водоносного горизонта и дефицит сульфатонасыщения способствовали развитию карстового провала. Ежегодно в весенний период идет заполнение водохранилища водой до отметок НПУ-108,2 м, в зимний период до апреля наоборот идет его сработка до отметок 100,0 м. Колебания воды в 8,0 м создают условия для интенсивного водообмена. В весенний период происходит внедрение камских вод в береговые отложения, что приводит к растворению карстующихся пород, насыщению их сульфатом кальция до предельных величин за счет длительного стояния камской воды в береговых отложениях, а в зимний период при понижении уровня воды в водохранилище идет обратный поток, происходит разгрузка предельно насыщенных вод. Такая гидродинамическая система создает условия для интенсивного развития карста. Кроме этого уровни воды в летний период также подвержены значительным колебаниям, это связано со сбросами воды для выработки электроэнергии и при интенсивных ливневых дождях, колебание может составлять 4-5 м. Участок исследований является уникальным объектом, ширина Чусовского мыса по линии карстового повала от р. Камы до р. Чусовой составляет 600 м, т.е. воды водохранилища интенсивно выщелачивают залегающие в основании гипсы на всей рассматриваемой территории. Городищенский карстовый провал является предвестником катастрофических провалов на данном участке. В целях изучения развития карстового процесса сотрудниками кафедры динамической геологии и гидрогеологии ПГНИУ с 2018 по 2023 гг. проведены гидрохимические исследования: отобраны пробы подземных и поверхностных вод, замерены дебиты родников и уровни воды в скважине.

Результаты и их обсуждения

На участке исследований соликамский водоносный горизонт маломощный до 2-3 м залегает спорадически на водоупорных аргиллитах и глубинах 10-15 м; по отношению киренскому водоносному горизонту он является подвешенным. Разница в отметках между подошвой соликамского слабоводоносного и иренского горизонтов составляет 35м. Воды родников, приуроченных к соликамскому горизонту $\text{HCO}_3 - \text{SO}_4 - \text{Ca}$ с минерализацией от 0,505 до 0,582 г/дм³. Дебит родника в д. Городище составляет 0,02 л/сек, дебит родника в д.Пальники-1,5 л/сек.

Иренский водоносный горизонт приурочен к закарстованным гипсоангидритам верхней лунежской пачки; вода из эксплуатационной скважины в д. Городище с глубины 50,0 м имеет $\text{SO}_4 - \text{HCO}_3 - \text{Ca}$ состав и минерализацию до 2,369 г/дм³. По химическим анализам 2018 и 2023 гг. состав ее стабилен по сульфатам (1389-1403 мг/дм³), нестабилен по магнию (2,79-37,1 мг/дм³), отмечено повышенное содержание NO_3 до 20,2 мг/дм³.

Образование озера-болота в д. Гродище связано с карстом, оно приурочено к карстовой депрессии субширотного простирания длиной 145 м шириной 40 м. Открытое зеркало воды имеет размер 25 x 10 м; депрессия заросла болотной растительностью; озеро на 40 % покрыто сплавной. Питание озера происходит за счет атмосферных осадков. Вода озера-болота по химическому составу на осень 2018 г. имеет $\text{SO}_4 - \text{HCO}_3 - \text{Ca}$ состав с минерализацией 2,049 г/дм³, на весну 2018 г. и весну 2021 г. – $\text{HCO}_3 - \text{SO}_4 - \text{Ca}$ с минерализацией до 167 мг/дм³. Существенная разница в гидрохимии воды весенних и осенних анализов объясняется большим количеством пресной воды весной и недостатком ее осенью, вода из озера в течение лета испаряется, кроме этого она загрязняется бытовым стоками расположенных рядом домовладений.

Развитие карста наиболее активно происходит на контактах пород различного литологического состава, в данном случае песчано-мергелистой и гипсоангидритовой толщ. При этом гидрокарбонатные воды сменяются сульфатными.

Вследствие влияния агрессивных пресных вод Камского водохранилища карстовый процесс активизируется, что снижает степень устойчивости закарстованной территории. Плотность карстовых воронок на водоразделах в районе Чусовского мыса составляет 10-20 шт/км².

Химический состав подземных вод иренского горизонта в гипсоангидритовых массивах довольно резко изменяется как во времени, так и в пространстве, но в зоне постоянного водонасыщения он остается практически стабильным. Изменяется иногда только минерализация.

Заключение

Изучение изменения минерализации трещинно-карстовых вод, их агрессивности по отношению к растворимой горной породе позволит прогнозировать развитие, как поверхностных, так и подземных полостей.

Особенно интенсивен процесс растворения происходит в условиях переменного подпора вод водохранилища (сливная призма) и насыщения массива пресными поверхностными агрессивными водами.

Наряду с интенсивным развитием карста происходит метаморфизация подземных вод (увеличивается их минерализация, жёсткость, наблюдается повышенное содержание нитратов).

В карстовой котловине Чусовского мыса образовалось озеро-болото с водой повышенной минерализации и высоким содержанием сульфатов – это указывает на техногенное загрязнение вод озера.

По результатам гидрохимических исследований на Чусовском мысе Пермского края было выявлено увеличение содержания некоторых химических элементов в поверхностных водах, что может быть связано с антропогенным воздействием на данную территорию.

В зоне постоянного водонасыщения подземных вод иренского горизонта химический состав остается без изменения. Пробы, отобранные в зимний период, характеризуются понижением минерализации в роднике у церкви в д. Городище и повышением в озере-болоте, роднике в пос. Пальники. В озере-болоте д. Городище выявленные превышения хлора и аммиака почти в 2 раза, связаны с бытовым загрязнением.

Для улучшения состояния подземных и поверхностных вод в регионе необходимо: Организация мониторинга состояния подземных и поверхностных вод, включая их химический состав, минерализацию и агрессивность по отношению к горной породе; Организация системы сбора и утилизации бытового мусора, чтобы предотвратить загрязнение подземных и поверхностных вод; Проведение обучения населения правильному использованию ресурсов и охране окружающей среды.

Такие меры помогут улучшить экологическую обстановку и предотвратить загрязнение подземных и поверхностных вод.

Список литературы

1. Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь. 1992. 200 с.
2. Килин Ю.А., Минькевич И.И. Карст Чусовского мыса Камского водохранилища. Пермь, 2006. С. 91-94.
3. Минькевич И.И., Килин Ю.А., Кашеварова А.А., Ждакаев В.И. Эколого-гидрогеологическая характеристика Чусовского мыса Камского водохранилища // Сергеевские чтения. Эколого-

экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах. Перм. гос.нац. исслед. у-нт-Пермь. 2019. Вып. 21. С. 454-459.

4. Печеркин И.А. Геодинамика побережий Камских водохранилищ. Часть II. Геологические процессы. Пермь. 1969. 308 с.
5. Тюрина И.М., Минькевич И.И., Пономарев А.Б. Условия развития карстового провала на Чусовской стрелке Камского водохранилища // Карстовые провалы: Тез. докл. юбил. конф. посвящ. 80-летию В.С. Лукина. Екатеринбург, 1994. С. 86-87.
6. Тюрина И.М., Минькевич И.И., Килин Ю.А., Баталов А.С. Условия развития карста Чусовского мыса Камского водохранилища // Гидрогеология и карстоведение: Межвуз. сб.науч.тр. Пермь. 2006. Вып.16. С. 253-258.

УДК 551.2.01

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ СЕЙСМОГЕННЫЕ РАЗЛОМЫ КАМЧАТКИ И
МАГМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СЕВЕРНОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ****А.В. Кирюхин*¹, М.В. Лемзиков¹**¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский E-mail: AVKiryukhin2@mail.ru***Аннотация**

Сейсмогенные разломы на Камчатке обычно формируются в условиях горизонтального растяжения и характеризуются преобладанием углов наклона 50-65° на ЗСЗ (280-320°), с простиранием параллельно линии океанического желоба. Вода в слэбе генерирует сейсмогенные гидроразрывы и через них проникает в мантийный клин, где выплавляет первичные магматические очаги, питающие действующие вулканы. Первичный магматический очаг Ключевского вулкана, по оценкам, находится на глубине около 180 км.

Ключевые слова: субдукция, сейсмогенный, вода, магма, вулкан, слэб, гидроразрыв.

**REGIONAL SEISMOGENIC FAULTS IN KAMCHATKA AND THE
NORTH GROUP VOLCANOES MAGMATIC SYSTEM****A.V. Kiryukhin*¹, M.V. Lemzikov¹**¹*Institute Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky AVKiryukhin2@mail.ru***Abstract**

Seismogenic faults in Kamchatka are usually formed under horizontal extension conditions and are characterized by the predominance of 50-65° dip angles to WNW (280-320°), with strike parallel to the oceanic trench line. Water in the slab generates seismogenic hydraulic fractures and through them penetrates the mantle wedge, where it melts the primary magma chambers that feed the active volcanoes. The primary magmatic chamber of the Klyuchevskoy volcano is estimated to be located at a depth of about 180 km.

Key Words: subduction, seismogenic, water, magma, volcano, slab, fracking.

Введение

В данной работе рассматривается роль воды в формировании сейсмогенных разломов и выплавлении первичных магматических очагов на примере Северной группы вулканов на Камчатке.

Сейсмогенные разломы

Для выявления дискретной сети региональных сейсмогенных разломов Камчатки по данным каталогов сейсмических событий Камчатского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) используется методика выделения плоско-ориентированных кластеров землетрясений (программа Frac-Digger [1]). В качестве исходных данных использован региональный каталог землетрясений, включающий 5972 события регионального энергетического класса K_s [4] выше 10 ($M=0,5 \cdot K_s-0,75$ выше 4,25) за период 01.1980–02.2016. Выявление сейсмогенных разломов программой Frac-Digger осуществлялось с параметрами: $\delta t = \infty$, $\delta R \leq 100$ км, $\delta Z \leq 10$ км, $N = 6$. Критерии выбора соответствуют опции постоянно действующих сейсмогенных региональных разломов. В результате выявлено 156 плоско-ориентированных кластеров гипоцентров землетрясений, интерпретируемых в качестве сейсмогенных активных разломов (рис. 13.2 в [1]). Указанные разломы включают 98% общего числа рассматриваемых гипоцентров землетрясений. Большая часть указанных разломов находится на восточном шельфе Камчатки между береговой линией и глубоководным желобом. В целом преобладают разломы с углами падения 50–65° на СЗЗ (280–320°), параллельные линии глубоководного желоба, при этом выделяются также разломы иного простирания и падения (стереограмма и гистограммы на рис. 13.3 в [1]). Это указывает на региональные геомеханические условия растяжения (NF) в направлении СЗЗ (300°), осложненные локальными геомеханическими условиями горизонтального сжатия (RF). В районе Северной группы вулканов выявлены четыре региональных сейсмогенных разлома: 27, 46, 52 и 66 (таблица, рис. 1 и 2), пересечения которых близки к эпицентру Ключевского вулкана.

Магматическая активность

Магматическая активность в районе Северной группы вулканов оценивалась с помощью программы Frac-Digger [1; 2] по данным каталога сейсмического мониторинга по 19 сейсмическим станциям КФ ФИЦ ЕГС РАН за период 2000–2017 гг. (общее число землетрясений, зарегистрированных с 1.01.2000 по 23.08.2017 составляет 122 451). При расчетах Frac-Digger с критериями выборки ($\delta t = 30$ сут, $\delta R = 6$ км, $\delta Z = 1$ км, $N = 6$) выявлено 1788 кластеров (интерпретируемых как дайки и силлы), включающих 117412 землетрясений (96 % всего количества зарегистрированных землетрясений). Вертикальный разрез вдоль оси Ключевской группы вулканов (Рис. 2) от Толбачикских вулканов до влк. Шивелуч показывает,

что при экстраполяции даек вулканов Толбачик и Шивелуч на глубину они пересекаются в точке с абс. отметкой от –165 до –205 км под Ключевским вулканом, где и предполагается область первичного выплавления магм или первичные магматические очаги, обеспечивающие магматическое питание всех активных вулканов Северной группы (в том числе Ключевского, Пл. Толбачика, Безымянного и Шивелуча).

Табл. 1. Характеристики сейсмогенных разломов в районе Северной группы вулканов. Примечания: Ks – энергетический класс, M – магнитуда, N2 – число гипоцентров в кластере сейсмогенного разлома, A, B, C – параметры уравнения плоскости сейсмогенного разлома $z=A \cdot X+B \cdot Y+C$ в координатах WGS84 UTM N57.

##	Угол падения, град.	Азимут падения, град	Ks	M	N2	A	B	C
27	65,9	71,1	13,3	5,9	36	-2,11488660774844	-0,724832892	5648888
46	51,5	258,7	12,4	5,5	39	1,23242916737016	0,24750093	-2453966
52	74,9	113,5	13,5	6,0	28	-3,39765667601845	1,481878886	-7111709
66	60,1	275,4	14,8	6,7	18	1,73513559660821	-0,16607497	-192346

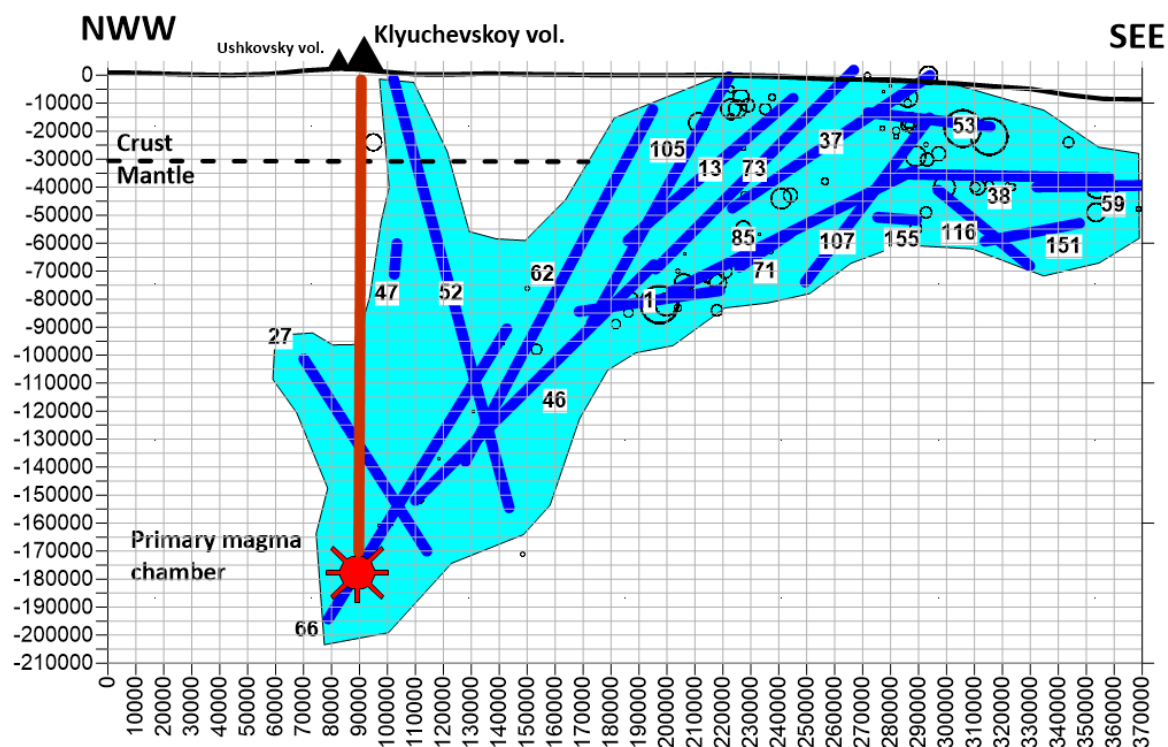


Рис. 1 Вертикальный разрез вкост зоны субдукции Камчатки через вулкан Ключевской. Линиями с номерами показаны следы региональных сейсмогенных разломов.

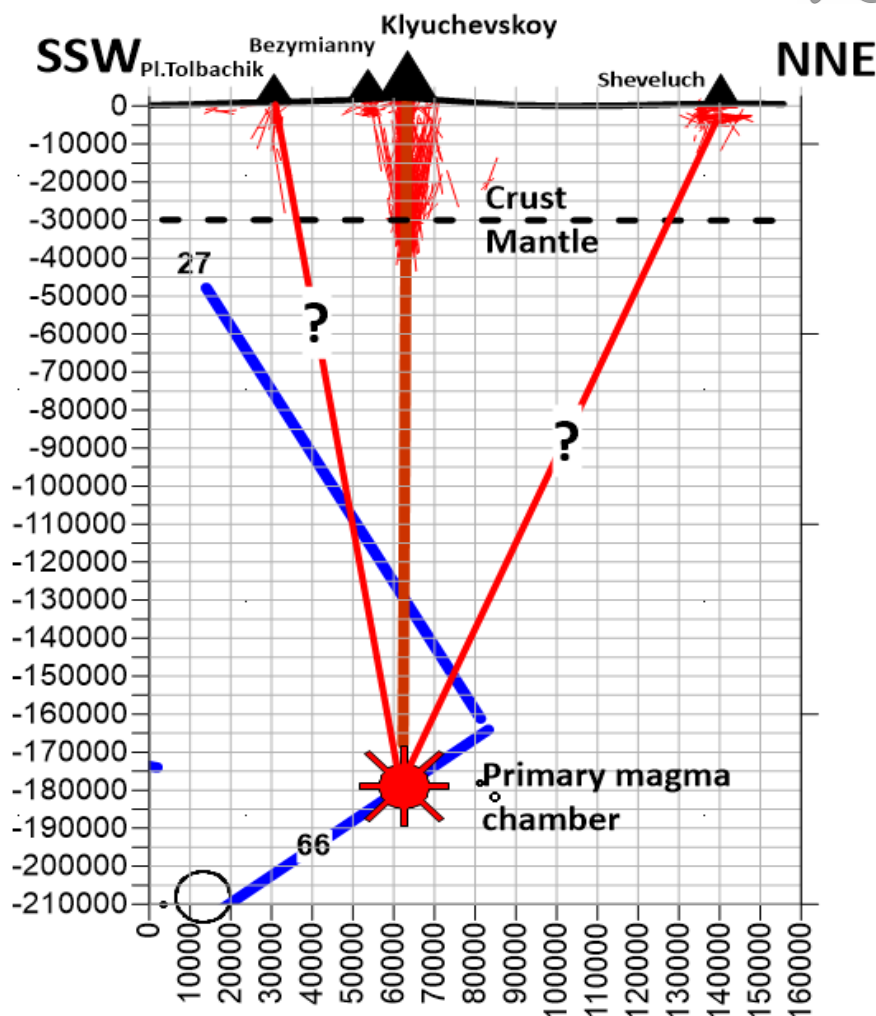


Рис. 2 Вертикальный субмеридиональный разрез через Северную группу вулканов. Жирными синими линиями с номерами показаны следы региональных сейсмогенных разломов. Тонкими красными линиями показаны следы даек и силлов [1].

Геомеханический анализ

Геомеханический анализ с использованием 3D диаграммы Кулона-Мора для условий горизонтального растяжения - показывает, что значительная часть (35%) региональных сейсмогенных разломов находится в состоянии потенциального сдвига при небольшом дополнительном геофлюидном давлении (<10 МПа на глубине 10 км, возможные флюидные фазы гидроразрыва: вода, нефть, газ). К числу таких наиболее активных сейсмогенных разломов относятся #66 и #52 (Табл. 1).

В качестве источника воды для плавления мантийного клина можно предположить примыкающий к нему наиболее активный ($M=6,7$, Табл. 1) сейсмогенный разломы #66 (Рис. 1), находящийся в эпицентре Ключевского вулкана. Наиболее вероятным механизмом генерации землетрясений на этом разломе является гидроразрыв при высвобождении воды из порового

пространства в магистральную зону разлома и сопряженные с ним сдвиговые деформации. Глубина первичного магматического очага под вулканом Ключевской оценивается по формулам плоскости для разлома #66 (Табл. 1) величиной 179 км.

Если активная флюидная фаза гидроразрыва вода, то используя эмпирическое соотношение $M = 0,67 \log(V) + 0,95$ между максимальной магнитудой землетрясения M и объемом инъекции воды V (м³) (личн. сообщ., Fujii, 2019, с учетом [5]), можно оценить объемы генерации водной фазы в соответствующем сейсмогенном разломе. Генерация воды в региональные сейсмогенные разломы #66 и #52 оценивается по указанной выше формуле 0,009 км³ и 0,001 км³ соответственно. Данные о содержании летучих веществ в магмах, образующих дуговые вулканы [6] показывают узкий диапазон концентраций H₂O в наименее дегазированных расплавленных включениях из каждого вулкана. Глобальное среднее значение составляет 3,9±0,4 мас. % H₂O. Если принять среднее значение массовой доли воды в магматическом расплаве 4%, то объем выплавляемой в первичном магматическом очаге магмы оценивается 0,09 км³ за интервал времени с 1980 по 2023 гг. Исходя из этого, актуальный средний расход генерации магмы может составлять 5900 кг/с, что превышает средний суммарный расход вулканов Пл. Толбачик, Безымянный, Ключевской и Шивелуч за время их существования 2370 кг/с [3].

Заключение

Сейсмогенные разломы Камчатки в целом формируются в условиях горизонтального растяжения и характеризуются преобладанием углов падения 50–65° на ЗСЗ (280–320°), с простирающим параллельным линии глубоководного желоба. Вода в погружающемся слэбе генерирует гидроразрыв и сейсмогенные разломы, по которым проникает в мантийный клин и выплавляет первичные магматические очаги, питающие действующие вулканы. Возможно, что выплавление первичного магматического очага под Северной группой вулканов осуществляется благодаря дренированию воды из разлома #66 (угол падения 60,1°, азимут падения 275,4°) в мантийный клин, глубина залегания первичного магматического очага под Ключевским вулканом оценивается около 180 км.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00127, <https://rscf.ru/project/23-27-00127/>»

Авторы выражают признательность к.ф.-м.н. А.В. Соломатину за конструктивные замечания и помощь в подготовке исходных данных.

Список литературы

1. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. — 431 с.
2. Кирюхин А. В., Федотов С. А., Кирюхин П. А. Магматические системы и условия глубинной гидротермальной циркуляции Ключевской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и термогидродинамического моделирования // Вулканология и сейсмология. — 2018. — № 4. — С. 3–14.
3. Поляк Б. Г., Мелекесцев И. В. О продуктивности вулканов // Вулканология и сейсмология. — 1981. — № 5. — С. 22–37.
4. Федотов, С.А., Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. Ред. Москва: Наука 1972.
5. McGarr, Maximum Magnitude Earthquakes Induced by Fluid Injection, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 2014, Vol. 119, pp. 1008-1019, 10.1002/2013JB010597
6. Plank T., Kelley K., Zimmer M., Hauri E., Wallace P. Why do mafic arc magmas contain 4 wt% water on average? // Earth and Planetary Science Letters 364 (2013) 168–179.

УДК 556.3

ПРОБЛЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ-КУРОРТОВ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Т.В. Любимова¹, В.А. Тимошина*¹

¹Кубанский государственный университет, г. Краснодар ул. Ставропольская 149, tv-luy@yandex.ru, Valeriatimosina708@gmail.com

Аннотация

Проблемы водоснабжения городов-курортов Черноморского побережья России с каждым годом становятся все более значимыми. Их интенсивное развитие обусловило бурный рост водопотребления. С учетом специфики гидрогеологических условий территории, выражающейся, в первую очередь, в том, что основным фактором формирования ресурсов подземных вод является климатический фактор, отсутствие длительное время осадков приводит к вынужденным перебоям в водоснабжении как населения, так и предприятий курортного бизнеса в летний сезон.

Ключевые слова: проблемы водоснабжения, Черноморское побережье, месторождения пресных подземных вод.

PROBLEMS OF WATER SUPPLY IN THE RESORT TOWNS OF THE BLACK SEA COAST

T.V. Lyubimova¹, V.A. Timoshina*¹

¹Kuban State University, Krasnodar, st. Stavropolskaya 149 tv-luy@yandex.ru, Valeriatimosina708@gmail.com

Abstract

Problems of water supply in the cities-resorts of the Black Sea coast of Russia are becoming more and more important. Their intensive development has led to a rapid growth of water consumption. Given the specific hydrogeological conditions of the territory, expressed primarily by the fact that the main factor in the formation of groundwater resources is a climatic factor, the lack of precipitation for a long time leads to forced interruptions in water supply for both the population and the resort business in the summer season.

Key Words: water supply problems, the Black Sea coast, fresh groundwater deposits.

Введение

В настоящее время в пределах данной территории известны 3 типа месторождений пресных подземных вод: в верхнечетвертичных и голоценовых аллювиальных отложениях переуглубленных речных долин; в трещиноватой зоне мезо-кайнозойских образований

Кавказской складчатой области; в отложениях верхнеплейстоцен-голоценовых аккумулятивных морских террас [1]. Несмотря на достаточное разнообразие гидрогеологических условий, возможности выбора устойчивого источника централизованного водоснабжения в их пределах крайне ограничены.

Месторождения питьевых подземных вод в аллювиальных отложениях переуглубленных речных долин имеют наибольшее распространение и с ними связаны основные эксплуатационные ресурсы питьевых подземных вод Черноморского побережья России. Всего на побережье выделяется три подтипа месторождений, формирующихся в аллювиальных отложениях речных долин и названных в соответствии с их гидрогеологическими типами: цемесским, пшадским и ашейским.

Цемесский подтип объединяет долины рек, протекающих к северо-западу от г. Геленджика (реки Цемес, Абрау, Дюрсо, Озерейка, Сукко). В разрезе аллювиальных отложений преобладают водоупорные глины, а водовмещающие валунно-галечниковые отложения представлены одним маломощным (не более 4-6 м) прослоем, залегающим в подошве. Количество атмосферных осадков составляет менее 500 мм/год. По величине эксплуатационных запасов этому типу присущи только очень мелкие месторождения.

Пшадский подтип характерен для речных долин главных и малых рек, расположенных между г. Геленджиком и г. Туапсе (главные реки Мезыб с притоком Адерба, Пшада, Вулан, Джубга, Шапсуго, Нечепсуго, Небуг и Агой). Отличается сложным взаимоотношением водовмещающих валунно-галечниковых отложений и водоупорных глинистых прослоев. Количество атмосферных осадков составляет около 500 мм/год. По величине эксплуатационных запасов в долинах главных рек выделяются средние и мелкие, а в долинах малых рек только очень мелкие месторождения.

Ашейский подтип характеризуется преимущественно валунно-галечниковым составом водовмещающих аллювиальных отложений. Прослои водоупорных глин отмечаются только на 1-2 км отрезках в устьевых частях долин. Он характерен для долин главных рек, впадающих в Черное море к юго-востоку от г. Туапсе: Туапсе, Аше, Псезуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта и Псоу. Долины ашейского типа отличаются наибольшей глубиной эрозионного вреза переуглублений, которая в устьевых частях может достигать 85-90 м и характеризуются развитием очень крупных и крупных месторождений. В долинах малых рек выделяются мелкие и очень мелкие месторождения. Количество атмосферных осадков составляет более 500 мм/год.

Таким образом, с запада на восток улучшаются как коллекторские свойства водовмещающих пород, так и количество атмосферных осадков, питающих данные водоносные комплексы. Наиболее уязвимыми с точки зрения водоснабжения оказываются г. Анапа, г. Новороссийск и г. Геленджик.

Питьевые подземные воды в коренных мезо-кайнозойских отложениях формируются в зонах свободного водообмена, где связаны, главным образом, с зонами экзогенной и эндогенной трещиноватости скальных массивов. Как правило они не имеют практического значения для организации даже небольшого по производительности централизованного водоснабжения территории. Исключением, в зоне развития пород мезо-кайнозойской флишевой формации, являются долины рек, которые прорезаны по зонам разломов или зонам «антикавказской» трещиноватости. В таких долинах рек мезозойско-кайнозойские отложения характеризуются повышенной открытой трещиноватостью и развитием в зоне водообмена подземных вод питьевого качества, близких к качеству аллювиальных вод. В целом ряде случаев они используются для питьевого водоснабжения мелких здравниц и частных баз отдыха. В связи с этим, в долинах рек, в том числе с малой мощностью аллювиального горизонта (менее 10 м) и незначительным меженным расходом рек, пресные подземные воды зон экзогенной и эндогенной трещиноватости коренных мезо-кайнозойских отложений (известняков, песчаников, мергелей) приобретают практическое значение.

Участки локализации питьевых вод в отложениях голоценовых морских аккумулятивных террас имеют ограниченное распространение в Адлерском районе и связаны с песчано-галечниковым комплексом отложений новочерноморской террасы. В настоящее время подземные воды используются для водоснабжения отдельных сельскохозяйственных предприятий и частных баз отдыха. Для организации здесь водоснабжения необходимо выполнить предварительные работы по оценке современного состояния подземных вод, условий защищенности источников водоснабжения и их взаимосвязи с морскими водами.

Рассмотрение проблемы водоснабжения на примере г. Геленджика показало, что за последние 15 лет техногенная нагрузка на подземные воды здесь выросла. При «скученном» нерациональном размещении одиночных скважин частной и коттеджной застройки, за счет активного взаимовлияния увеличивается глубина динамического уровня, уменьшается дебит скважин. Фактически неконтролируемый отбор воды по своему объему сопоставим со средним водозабором. Также происходит уменьшение инфильтрационного питания подземных вод и усиление плоскостного смыва за счет роста городской территории с твердым покрытием, когда в условиях горного рельефа большая часть плоскостного смыва уходит в море. В результате в межень отмечаются малые расходы на водозаборах, обустроенных на речном аллювии, что не обеспечивает требуемой производительности и создает гидрогеологические «колодцы».

В связи с этим, современное состояние ресурсной базы требует актуализации в связи с изменениями большинства факторов восполнения запасов подземных вод и поиска новых источников водоснабжения, например, за счет привлечения подземных вод, разгружающихся в крупных зонах повышенной трещиноватости и/или в прибрежной литорали [2]. В нашей стране и за рубежом уже имеется опыт использования вод крупных субмаринных

источников, а также опыт эксплуатации гидрогеологических скважин, расположенных на шельфе.

В силу своего литологического состава и строения вся исследуемая площадь является зоной свободного водообмена. Преимущественно развиты воды трещинного типа, которые приурочены к верхней части массивов пород флиша верхнемелового возраста. Водоносность отложений контролируется степенью их трещиноватости и количеством атмосферных осадков. Разгрузка подземных вод формируется, как открыто (в виде источников вдоль склонов), так и «скрыто» в гидрографическую сеть. С пресными подземными водами верхнемелового водоносного горизонта связано формирование Пенайского месторождения, эксплуатируемого для водоснабжения г. Новороссийска, пос. Кабардинка и частично г. Геленджика. Суммарный дебит Пенайских источников достигает 9,76 тыс. м³/сут. К месторождениям питьевых подземных вод, приуроченным к аллювиальным отложениям, относятся Мезыбское и Пшадское, которые служат основным источником водоснабжения г. Геленджика. Их суммарный объем составляет порядка 60 тыс. м³/сут.

Как известно, рельеф оказывает прямое влияние на водообмен, поэтому для характеристики геолого-гидрогеологических морфоструктур изучаемой территории была составлена изолинейная карта расчленения рельефа. Нижней границей морфоструктур принята подошва коры выветривания, которую можно считать региональным водоупором, ограничивающим зону активного водообмена. Построенная карта вертикальной расчлененности рельефа, показала, что в среднем коэффициент расчлененности, прилегающей к Геленджикской бухте территории небольшой и составляет 0,00-0,10 км. Была также выполнена оценка локальных разрывных нарушений, их трассировка в Геленджикскую бухту и проведена заверка разломов полевыми наблюдениями.

Анализ тектоники позволил нам установить серию разрывных нарушений в различных частях бухты, наиболее интересным из которых является «Толстый» мыс с его множественными параллельными дизъюнктивными разрушениями, служащими зоной транзита пресных подземных вод. Исходя из этого следует, что «Толстый» мыс предположительно является местом разгрузки субмаринных источников тектонического происхождения. А комплексное обследование рельефа, водосборных областей, расчлененности указывает на то, что в северо-западной части бухты самым перспективным и одновременно большим водосборным участком является р. Су-Аран, как предположительный участок разгрузки подрусловых потоков. Для установления субмариной разгрузки грунтового водоносного горизонта был применен метод «волочения» по дну бухты электродной части бронированного геофизического кабеля с выступающими электродами, что позволило, для скорости судна не более 5 узлов и волнения не более 2-х баллов выдерживать измерительные электроды на расстоянии 50–70 мм от дна.

В результате обработки всех полученных данных был сделан вывод о том, что северо-западная часть бухты может быть выбрана как наиболее перспективная для дальнейшей детальной гидрогеологической съемки с пересекающимися профилями, поскольку к ней приурочены донные отложения песчаной размерности, вероятно принадлежащие палеоруслу р. Су-Аран.

Выполненная работа показала, что на изучаемой территории возможно наличие субмаринных источников как тектонического происхождения, так и формирующихся в результате разгрузки подрусловых потоков. Особенностью и тех, и других является тесная связь с климатическими факторами и ярко выраженная сезонность. Кроме того, на характер функционирования субмаринных источников существенное влияние оказывают геолого-гидрогеологические факторы. Вероятно, каждый отдельный тип субмариной разгрузки потребует своих специальных методов их обнаружения и картирования.

Список литературы

1. Отчет о региональной оценке современного состояния ресурсного потенциала питьевых подземных вод Черноморского побережья России и обоснование перспектив их использования / ОАО «Кавказгидрогеология», автор Р.Н. Лизогубова, Северо-Кавказский Территориальный уровень, № 28986. – п. Иноземцево: 2006. – 836 л.
2. Тимошина В.А. Комплексные исследования Геленджикской бухты для оценки перспективы развития новых источников водоснабжения / В. А. Тимошина // Геология в развивающемся мире: сборник научных трудов по материалам XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Пермь, 28 апреля 2022 года. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. – С. 376-380.

УДК 556

ОПЫТ ПЕРЕОЦЕНКИ ЗАПАСОВ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ЕССЕНТУКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.А. Маслов^{*1}, Е.А. Байдарико¹, Н.А. Харитонов¹, Е.И. Барановская¹,
Е.А. Филимонова¹, Е.С. Максимова¹, Е.А. Преображенская¹, А.Ю. Бычков¹,
А.С. Сартыков¹, С.П. Поздняков¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: maa20070@yandex.ru

Аннотация

Выполнена переоценка запасов минеральных вод Ессентукского месторождения. В соответствии с действующими нормативными документами прогноз выполнен гидравлическим методом, применяемым для месторождений с исключительно сложными гидрогеологическими условиями. Анализ опыта эксплуатации обычно сводится к оценке максимальных понижений и доказательству стационарности. Предпринята попытка гидрогеодинамического прогноза, основанного на многомерном анализе.

Ключевые слова: минеральные подземные воды, оценка запасов, Ессентукское месторождение, опыт эксплуатации, гидравлический метод, анализ временных рядов

EXPERIENCE OF REESTIMATION OF MINERAL WATER RESOURCES OF THE ESSENTUKI BASIN

A.A. Maslov^{*1}, E.A. Baidariko¹, N.A. Kharitonova¹, E.I. Baranovskaya¹,
E.A. Filimonova¹, E.S. Maximova¹, E.A. Preobrazhenskaya¹, A.Yu. Bychkov¹,
A.S. Sartykov¹, S.P. Pozdniakov¹

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: maa20070@yandex.ru

Abstract

The mineral water resources of the ESSENTUKI basin have been re-evaluated. Due to the current normative documents, the forecast is made by the hydraulic method, used for area with extremely complicated hydrogeological conditions. The retrospective analysis of Withdrawal is usually limited to the estimation of maximum drawdown and the proof of stationarity. An attempt of hydrogeodynamic prediction was made by multivariate analysis.

Key Words: mineral groundwater, resources estimation, Essentuki basin, retrospective withdrawal, hydraulic method, time series analysis

Введение

Минеральные воды Ессентукского месторождения направляются на курорт федерального значения Ессентуки с целью лечебного питья в бюветах и бальнеологического

78

оздоровления, а также используются для целей промышленного розлива. Потребителями минеральных вод являются санатории, клиники, больницы г. Ессентуки, заводы розлива, в том числе, ООО «Холдинг Аква» (ООО «ТЭСТИ» и ООО «КМВ-вода»).

В географическом отношении Ессентукское месторождение минеральных подземных вод (ЕМ МПВ) расположено в Ставропольском крае России, в пределах особо охраняемого эколого-курортного региона РФ – Кавказские Минеральные Воды.

Минеральные воды ЕМ МПВ, особенно типа Ессентуки-4 и Ессентуки-17, разливаются на протяжении 150 лет, широко известны в России и за рубежом, сохранение высокого качества подаваемой потребителям воды как в бюветах, так в розлив требует исключительно бережного отношения к организации эксплуатации ЕМ МПВ в целом и продолжения систематических наблюдений за режимом минеральных подземных вод.

Началом исследований ЕМ МПВ является проведенное и опубликованное в 1811 г. врачом Ф. П. Гаазом описание источников солоноватой воды в долине ручья Кислуши, на территории современного Лечебного парка в г. Ессентуки. Началом промышленной эксплуатации ЕМ МПВ можно считать 1912-1914 гг., когда в пределах Центрального участка началась скважинная добыча минеральных подземных вод из первых разведочных скважин. Систематические наблюдения за изменчивостью гидродинамических показателей и учет добываемой воды стали выполняться с середины 30-х годов прошлого века.

В процессе разведки и эксплуатации размер месторождения и состав отдельных его участков неоднократно изменялись, преимущественно в сторону увеличения и в плане, и в разрезе. В настоящее время ЕМ МПВ состоит из 7 лицензионных участков недр: Центральный, Средне-Ессентукский, Бугунтинский, Новоблагодарненский, Горный, Западно-Быкогорский и Быкогорский, которые характеризуются различной степенью геологической изученности по площади и по разрезу. Наиболее хорошо изучен его Центральный участок, имеющий более чем двухвековой опыт эксплуатации и развитую сеть наблюдательных скважин. Впервые оценка запасов минеральных подземных вод ЕМ МПВ, их рассмотрение и утверждение комиссией по запасам полезных ископаемых выполнялись в 1947 г., последний раз в 2021 г. Количество суммарных запасов МПВ изменялось во времени почти в 4 раза от 650,7 (1993 г.) до 2353 м³/сут (1988 г.).

При предыдущей переоценке запасов в 2010 г. решением ГКЗ Роснедра утверждены запасы ЕМ МПВ в целом в общем количестве 1446,5 м³/сут. Исключая запасы Быкогорского участка (285 м³/сут), запасы минеральных вод, утвержденные в 2010 г. перечисленных шести участков составляют 1161,5 м³/сут, в 2021 г. переоценено 58% запасов 2010 г.

Основная причина снижения запасов ЕМ МПВ в целом заключается в снижении потребности и соответствующем снижении фактически добываемого объема воды в течение периода времени с 2010 по 2018 гг. по некоторым типам минеральных вод. Так на Бугунтинском

участке снижение заявленной потребности составило 210 м³/сут. На Центральном участке по скважинам 1-Э и 2-Э фактические объемы добычи за указанный период не превышали 50 м³/сут и 30 м³/сут, соответственно, что ниже утвержденных в 2010 г. запасов на 110 м³/сут и 10 м³/сут. На Средне-Ессентукском участке по скважинам 55 и 1-КМВ-бис фактические объемы добычи за указанный период не превышали 80 м³/сут и 50 м³/сут, соответственно, что ниже утвержденных в 2010 г. запасов на 95 м³/сут и 50 м³/сут.

Из наиболее ценных типов минеральных вод Ессентуки-4 и Ессентуки-17 снижение величины утвержденных запасов произошло по участку скважины 24-бис-1 [1] - экспертная комиссия ГКЗ Роснедра воздержалась от утверждения запасов воды по данной скважине (12 м³/сут) и рекомендовала выполнить геофизические исследования ствола скважины и гидрохимической неоднородности вскрытого ею разреза сеноман-маастрихтского горизонта.

Фактические данные эксплуатации свидетельствуют об определенной неравномерности в распределении эксплуатационной нагрузки как на отдельные скважины, так и участки ЕМ МПВ. По участкам ЕМ МПВ нагрузка распределена [1] следующим образом:

на Центральном участке по минеральным водам типа Ессентукский № 17 достигала 98% разрешенного водоотбора, снижаясь в отдельные годы до 12-26%, по минеральным водам типа Ессентукский № 4 достигала 97% разрешенного водоотбора, снижаясь в отдельные годы до 19-51%, по сероводородным водам не превышала 30%;

на Новоблагодарненском участке по минеральным водам типа Ессентукский № 17 достигала 98% разрешенного водоотбора, снижаясь в отдельные годы до 35%, по минеральным водам типа Ессентукский № 17 достигала 93% разрешенного водоотбора, снижаясь в отдельные годы до 34%;

на Западно-Быкогорском участке по минеральным водам типа Ессентукский № 4 достигала 91% разрешенного водоотбора, снижаясь в отдельные годы до 3%;

на Средне-Ессентукском участке по термальным водам (скв. 55) достигала 24% разрешенного водоотбора, снижаясь в отдельные годы до 9%, по термальным слабоуглекислым водам (скв. 1-КМВ-бис) достигала 31% разрешенного водоотбора, снижаясь в отдельные годы до 11%;

на Бугунтинском участке по слаботермальным водам (скв. 9) достигала 24% разрешенного водоотбора, снижаясь в отдельные годы до 0%, по термальным слабоуглекислым водам (скв. 75-бис) редко достигала 3-5% разрешенного водоотбора;

на Горном участке по слабоминерализованным водам достигала 62% разрешенного водоотбора, снижаясь в отдельные годы до 1%.

Внутригодовое распределение эксплуатационной нагрузки на скважины близко к постоянному, с возможными изменениями (скважины 17-бис, 34-бис, 24-бис-1, 36-бис, 41-бис, 56, 57-РЭ-бис), либо периодическому в течение года (скважины 33-бис, 39-бис, 418', 418-бис, 1-Э, 2-Э, 46, 49-Э, 55, 70, 71, 9, 75-бис, 1-КМВ-бис).

С учетом отмеченных особенностей эксплуатации шести участков ЕМ МПВ сформулирована основная цель работ, заключающаяся в оценке и обосновании запасов минеральных подземных вод участков ЕМ МПВ – Центрального, Средне-Ессентукского, Новоблагодарненского, Бугунтинского, Горного и Западно-Быкогорского – по категории не ниже C_1 в количестве заявленной недропользователями перспективной потребности, которая не превышает утверждённых и поставленных на государственный баланс запасов подземных вод, а также оценка запасов спонтанного углекислого газа Средне-Ессентукского и Бугунтинского участков на прогнозный период до 10 лет (до 2031 г.).

Методы исследований

Оценка запасов МПВ выполнена гидравлическим методом с учётом данных, накопленных за весь период эксплуатации и полученных в результате проведённых работ.

Общая продолжительность полевых опытных гидрогеологических работ 17 месяцев (с 01.06.2019 до 31.10.2020 гг.). Собственно этап ОФР занял 15 месяцев (с 05.07.2019 до 30.09.2020) и включал 21 одно/двух/трехступенчатых выпусков/откачек из 21 скважины, сопровождаемых измерениями положения уровня или давления воды, температуры воды на устье, расхода и температуры газа, а также отбором проб воды и газа. До и после этапа ОФР выполнялись режимные гидродинамические и гидрохимические наблюдения по предварительно организованной единой системе мониторинга на всех участках недр.

ОФР были начаты в скважинах 1-й группы на 4 участках – Центральном, Новоблагодарненском, Горном, Западно-Быкогорском, в пределах которых распространены минеральные воды ессентукского типа в дат-зеландском и сеноман-маастрихтском водоносных горизонтах. Затем в скважинах 2-й группы на Средне-Ессентукском и Бугунтинском участках, в пределах которых распространены различные по гидрохимическому типу минеральные воды в апт-нижнеальбском и титон-валанжинском водоносных горизонтах.

Общая продолжительность ОФР с заявленной прогнозной потребностью (равной 100 % от утверждённых запасов) по всем скважинам, кроме скв. 24-бис-1, составила 3 месяца (с 30 июня по 30 сентября 2020 г.). Изучение газогидрохимического режима выполнялось, в том числе, потенциометрическими исследованиями непосредственно на устье скважин, а также изотопными анализами воды и газа.

Результаты и их обсуждения

С целью повышения представительности первичных фактических данных о напорах подземных вод были организованы детальные наблюдения за режимом подземных вод путем оборудования скважин современными датчиками абсолютного давления:

12 датчиков Solinst 3001 Levellogger Edge: погрешность измерений давления $\pm 0,05\%$ от полной шкалы 20-300 метров водяного столба, погрешность измерений температуры $\pm 0,05^\circ\text{C}$, разрешение датчика: $0,003^\circ\text{C}$;

9 датчиков Solinst 3001 Levellogger Junior: погрешность измерений давления $\pm 0,1\%$ от полной шкалы 10 метров водяного столба, погрешность измерений температуры $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

В эксплуатационных скважинах Центрального (6 датчиков), Средне-Ессентукского (2 датчика), Горного (1 датчик), Западно-Быкогорского (2 датчика) участков установлено 11 датчиков, в наблюдательных скважинах месторождения установлено 10 датчиков. Датчики Solinst являются средствами измерений, зарегистрированными агентством по техническому регулированию и метрологии.

Достоинствами реализованной методики в части режимных наблюдений являются следующие аспекты:

использование в большинстве скважин современных датчиков абсолютного гидростатического давления, которые позволили получить достаточно точные значения напора подземных вод и с высокой частотой временной дискретизации;

выполнение потенциометрических исследований непосредственно на устье скважин (впервые за всю историю эксплуатации Ессентукского месторождения), которые позволили получить ряд новых фактических данных о составе и свойствах минеральных вод и газов.

К недостаткам реализованной методики относятся увеличение общей продолжительности работ по сравнению с проектной и отсутствие ряда первичных данных, которые обусловлены возникшими в процессе работ трудностями технического и организационного характера (замена измерительных приборов, смена режима водоотбора и др.).

Заключение

Гидравлический метод не позволяет учитывать ранее накопленные фактические данные по режиму эксплуатации ЕМ МПВ, а заключается фактически в экстраполяции данных относительно краткосрочных ОФР на прогнозный срок (как правило 10 лет).

ЕМ МПВ эксплуатируется почти 110 лет, если условно считать началом его эксплуатации 1913 г. – год сооружения и начала добычи МПВ из скв. 401. Систематические наблюдения за напором и дебитом МПВ, их регистрация стали выполняться с середины 30-х годов прошлого века. За это время на месторождении сформировался природно-техногенный гидродинамический режим подземных вод, который одновременно отражает воздействие комплекса природных и техногенных (водоотбора, депрессий) факторов на гидродинамическую структуру потоков подземных вод и их режим. Соответственно колебания напора, особенно ярко выраженные в наиболее высокодебитных скважинах, связаны и с временной изменчивостью

природных факторов, влияющих на естественный режим подземных вод, и с многолетней динамикой добычи воды. Для исследования накопленных многолетних данных по режиму эксплуатации ЕМ МПВ применен вероятностно-статистический анализ временных рядов [1], позволивший дать прогноз снижения напоров существенно более реалистичный по сравнению с полученным гидравлическим методом.

Целенаправленное проведение опытных работ в условиях монотонного увеличения эксплуатационной нагрузки на месторождение, применение датчиков давления высокой точности позволило оценить гидродинамическое взаимовлияние Центрального и Новоблагодарненского участков ЕМ МПВ [1].

В ходе экспертизы материалов переоценки запасов МПВ на Центральном и Средне-Ессентукском участках, одним из ключевых аргументов в пользу утверждения предложенных запасов, как принято в практике экспертных оценок, являлась степень близости заявленной потребности к фактическому среднему дебиту, наблюдавшему за последний 10-летний период и особенно в последние годы. Для 4 скважин (1-Э, 2-Э, 55 и 1-КМВ-бис) эти два показателя значительно различались, а доводы недропользователя о росте потребности в этих водах в будущем оказались неубедительными. Таким образом, произошло существенное снижение запасов (на $265 \text{ м}^3/\text{сут}$) по данным скважинам, обусловленное, по сути, экономическими причинами, а именно отсутствием потребности в минеральных водах, а не причинами геолого-технического характера. Аналогичное значительное уменьшение запасов до значений фактического водоотбора имело место при переоценке запасов Ессентукского месторождения в 1993 г. Из чего следуют три важных вывода-рекомендации: а) недропользователи должны более тщательно обосновывать потребность в воде на перспективу; б) недропользователи должны обеспечить высококачественные наблюдения за режимом минеральных подземных вод; в) оценка запасов должна стать более реалистичной, то есть базироваться главным образом на прошедшем опыте эксплуатации с применением вероятностно-статистических методов его обработки, а не на результатах оценки гидравлическим методом и относительно кратковременных ОФР.

Список литературы

1. Байдарико, Е. А., Поздняков, С. П., Сартыков, А. С., Харитонов, Н. А., Барановская, Е. И., Филимонова, Е. А., Картунов, Е. В., Максимова, Е. С., Преображенская, А. Е., Маслов, А. А., Бычков, А. Ю., Муромец, Н. Н., Корзун, А. В., Потапов, Е. Г., Бондарева, Г. Л., Левицкий, Е. С. Результаты работ по переоценке запасов Ессентукского месторождения // Геология и недропользование. 2021 № 4. С. 130-150.

УДК 556.382

УПРАВЛЕНИЕ ПИТАНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕЖГОРНЫХ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ ТЯНЬ-ШАНЯ

Л.Э. Оролбаева*¹

¹Кыргызский горно-металлургический институт им. акад. У. Асаналиева, Бишкек, Кыргызская Республика, orolbaeval@mail.ru

Аннотация

Природные факторы Тянь-Шаня предопределили закономерности формирования поверхностного и подземного стоков, их взаимосвязь, особенности распространения подземных вод. В горных геосистемах, таких как Тянь-Шань, состояние водных ресурсов, их количества и качества определяется в значительной степени зависит от состояния основных экосистем в зоне формирования стока, взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

По результатам исследований влияния состояния лесопокрытой площади сделан вывод о том, что восстановление еловых лесов Тянь-Шаня в относительно короткий срок способствуют увеличению стока. В статье рассматриваются основные геогеологические особенности формирования подземных вод межгорных артезианских бассейнов Тянь-Шаня. Условия формирования поверхностного стока горных геосистем Тянь-Шаня и Памиро-Алая, его распределение по территории имеют во многом определяющее значение для ресурсов подземных вод. Широкое использование рек, связанное с безвозвратным водопотреблением и регулированием, изменяет структуру водного баланса межгорных бассейнов, приводит к сокращению питания подземных вод. Приведены примеры месторождений подземных вод Чуйского артезианского бассейна, анализированы причинно-следственные связи истощения подземных вод. Отмечено, что самым значительным фактором является водохозяйственное строительство. Управление горными лесными экосистемами, сопряжённое с управлением водными ресурсами бассейнов, позволит решать проблемы сохранения и комплексного использования водных ресурсов. Управление питанием подземных вод в межгорных артезианских бассейнах, особенно должно включать обязательные экологические попуски в руслах рек, разбираемых на орошение, охрану вод в зонах формирования месторождений подземных вод, совместное использование подземных и поверхностных вод.

Ключевые слова: межгорные артезианские бассейны, горные экосистемы, управление питанием подземных вод, экологический сток.

GROUNDWATER RECHARGE MANAGEMENT IN INTERMOUNTAIN ARTESIAN BASINS OF THE TIEN-SHAN REGION

L.E. Orolbaeva*¹

¹Kyrgyz Mining and Metallurgical Institute named after Acad. V. Asanaliev, Bishkek, Kyrgyz Republic, orolbaeval@mail.ru

Abstract

The natural factors of the Tien Shan predetermined the patterns of formation of surface and groundwater runoff, their interrelation, and the peculiarities of groundwater distribution. In mountain geosystems, such as the Tien Shan, the state of water resources, their quantity and quality is determined largely depends on the state of the main ecosystems in the runoff formation zone, the relationship of groundwater and surface waters. According to the results of studies of the influence of the state of the forested area, it was concluded that the restoration of the spruce forests of the Tien Shan in a relatively short time contributes to an increase in runoff. The paper discusses the main geohydrological features of the formation of groundwaters of the intermountain artesian basins of the Tien Shan. The conditions of formation of the surface runoff of the mountain geosystems of the Tien Shan and Pamir-Alai, its distribution over the territory are largely of decisive importance for groundwater resources. Widespread use of rivers associated with factor is water management construction. The management of mountain forest ecosystems, coupled with the management of basin water resources, will solve the problems of conservation and integrated management of water resources. Managing of aquifer recharge in intermountain artesian basins, especially should include mandatory environmental releases in riverbeds for irrigation, water protection in zones of formation of groundwater resources, joint use of groundwater and surface water.

Key Words: intermountain artesian basins, mountain ecosystems, groundwater nutrition management, ecological flow.

Введение

Природные факторы Тянь-Шаня предопределили закономерности формирования поверхностного и подземного стоков, их взаимосвязь, особенности распространения подземных вод в различных гидрогеологических структурах и их гидродинамику. Здесь формируются особые геолого-гидрогеологические и гидрологические условия.

В пределах гидрологических бассейнов выделяются артезианские бассейны межгорных и внутригорных впадин и гидрогеологические массивы. Основные ресурсы подземных высококачественных пресных вод сосредоточены в межгорных артезианских бассейнах. Межгорные бассейны выделяются значительной мощностью осадочного чехла до 3-4 км, невыдержанностью по площади и разрезу водоносных и водоупорных пластов, блоковостью

строения большинства структур, наличием в пределах межгорных впадин большого числа малых артезианских бассейнов с самостоятельными водными циклами [7].

Гидродинамические особенности межгорных бассейнов определяются их размерами, малыми расстояниями от области питания до области разгрузки в пределах 10-60 км тесной взаимосвязью подземных вод с поверхностными водотоками и водоёмами.

В формировании подземных вод межгорных бассейнов значительная доля принадлежит инфильтрационным потерям из русел рек и временных водотоков.

В горных геосистемах, таких как Тянь-Шань, состояние водных ресурсов, их количества и качества определяется в значительной степени зависит от состояния основных экосистем в зоне формирования стока.

Горные ледники, снежники, а также лесной покров высокогорья напрямую сказывается на региональных запасах водных ресурсов. Понимание природной мозаики экосистем бассейнов и её реакции на техногенные и природные изменения будет способствовать сохранению водных ресурсов и их устойчивому использованию

Леса и лесохозяйственные мероприятия оказывают значительное влияние на водные ресурсы. Результаты наблюдений показывают, что повышение лесистости водосборных бассейнов методом создания лесных культур приводит к увеличению суммарного значения стока.

Умелое ведение лесного хозяйства может обеспечить охрану водных ресурсов, препятствовать распространению загрязнения воды, улучшить водную и прибрежную среду обитания, а также уменьшить паводки в нижнем течении. Увеличение лесного покрова в горной зоне формирования стока увеличением количества осадков [5] может иметь положительный эффект на все бассейны рек Тянь-Шаня.

Результаты и их обсуждения

По результатам исследований влияния состояния лесопокрытой площади сделан вывод о том, что восстановление еловых лесов Тянь-Шаня в относительно короткий срок способствуют увеличению стока. Исследования, проведённые в восточной части Прииссыккуля показали, как горный лес способствует улучшению питания водотоков по сравнению с безлесными участками

Наблюдения за суммарным стоком на водосборных бассейнах с разной лесистостью, в том числе бассейнах с восстановленным лесом, показали, что повышение лесистости весьма существенно повлияло на его увеличение. Установлено, что наиболее интенсивные изменения стока проявляются при снижении лесистости до 30%. Эти значения являются пороговыми, поскольку снижение лесистости водосборов ниже 30% приводит к утративанию гидрологических водорегулирующих функций лесных экосистем [2].

Геогидрологические особенности межгорных артезианских бассейнов определяются теснейшей взаимосвязью подземных и поверхностных вод.

Условия формирования поверхностного стока горных геосистем Тянь-Шаня и Памиро-Алая, его распределение по территории имеют во многом определяющее значение для ресурсов подземных вод.

В межгорных бассейнах до 70% расхода в естественных руслах рек идут на инфильтрацию и питание подземных вод, поэтому даже незначительные их изменения в верховьях речных систем напрямую влияют на расходы в среднем и нижнем течении.

На многих реках, при выходе их во впадины создаются водохранилища по зимнему регулированию стока, а в пределах зоны формирования подземных вод строятся обводные каналы (р. Чу), проектируется обваловка или бетонирование обводных русел.

Эти мероприятия направлены на сокращение потерь поверхностного стока при его транспортировке в зоне формирования подземных вод и переброски его к сельскохозяйственным угодьям, территориально приуроченным к зоне рассеивания стока.

Широкое использование рек, связанное с безвозвратным водопотреблением и регулированием, изменяет структуру водного баланса межгорных бассейнов, приводит к сокращению питания подземных вод и соответственно сокращению родникового стока, разгрузки подземных вод в реки в их среднем и нижнем течении.

Речной сток является средообразующим фактором водной экосистемы. При изъятии речного стока в реке должен оставаться необходимый его объем, обеспечивающий нормальное функционирование водной экосистемы, и поддерживающий способность речной системы к самовосстановлению. Поэтому изъятие речной воды не должно приводить к снижению объема стока ниже экологически допустимого уровня [4; 6].

Речной сток является важнейшим фактором формирования запасов подземных вод межгорных бассейнов Тянь-Шаня и Памиро-Алая, в связи с чем, показатель экологического стока является важной характеристикой для сохранения речных экосистем и водных ресурсов в целом. Обязательные экологические попуски в естественных руслах рек должны стать предметом специального обоснования, учитывающего природные особенности межгорных бассейнов и контроля. В Водном кодексе Кыргызской Республики есть статья об обязательных экологических попусках в руслах рек, однако до настоящего времени нет нормативных утвержденных документов, регламентирующих объёмы экологического стока. За соблюдением режима экологических попусков фактически нет наблюдений и контроля.

Подземные воды имеют практически повсеместное распространение в пределах межгорных бассейнов. Мощность эксплуатируемых водоносных горизонтов колеблется от 20 до 500 м в различных гидрогеологических зонах.

Истощение водных ресурсов артезианских бассейнов Тянь-Шаня связано с техногенезом различного типа. Его следствием является изменение взаимосвязи подземных и поверхностных вод, трансформация их химического состава (Рис. 1).



Рис. 1 Причинно-следственные связи сокращения водных ресурсов горных геосистем Тянь-Шаня.

Месторождения подземных вод питьевого качества Тянь-Шаня территории Кыргызстана приурочены к предгорной зоне области формирования потоков речных долин и предгорного типа. Истощение их запасов — это многофакторный процесс, однако, определяющими являются сокращение питания, интенсивный водоотбор и загрязнение подземных вод [1; 6; 7]. Самым значительным фактором является водохозяйственное строительство. В результате бетонирования русел рек и строительства обводных каналов сокращается основной источник питания подземных вод. Эти процессы могут проявляться в зонах, к которым приурочены потоки подземных вод речных долин и предгорного типа.

Например, в результате строительства обводного канала на восточном участке р. Чу, по данным режимной партии ККГГЭ произошло снижение уровня подземных вод, на 25 м, что в дальнейшем может сказаться на эксплуатационных запасах Восточно-Чуйского месторождения подземных вод. Интенсивный водоотбор в совокупности с сокращением инфильтрационного питания перестраивают структуру потоков, и при наличии площадного загрязнения, могут привести в будущем к истощению ресурсов запасов пресных подземных вод. Примером могут служить Орто-Алышское и Ала-Арчинское месторождения подземных вод, используемые для водоснабжения г. Бишкек. В геоморфологическом отношении центральная часть впадины (площадь Ала-Арчинского месторождения) представляет собой слившиеся конусы выноса рек Ала-Арча и Аламедин, главной закономерностью которых является литологическая зональность. Головная часть конусов выноса характеризуется монотонным разрезом наиболее грубообломочных отложений (валунногалечники); средняя и периферийная

части - переслаиванием отложений грубых и тонких фракций: гальки, гравия, песка и суглинка с супесью.

К головным частям конусов выноса рек Ала-Арча и Аламедин приурочена зона формирования подземных вод с единым безнапорным потоком подземных вод. Мощность водоносного комплекса превышает 350 м. Водовмещающие валунногалечники имеют высокие фильтрационные и ёмкостные параметры: коэффициент фильтрации - 50-70 м/сут, водопроницаемость - 10000-12000 м²/сут., водоотдача - 15-22% [3; 8]. Рассмотренные особенности строения территории Ала-Арчинского месторождения пресных подземных вод определяют гидрогеологические условия и гидрогеологическую зональность, присущую всем конусам выноса. Сегодня в Бишкеке введены ограничения на подачу питьевой воды. Помимо ограничений на подачу, в мэрии приняли решение временно закрыть частные предприятия, которые расходуют большой объем воды. Основная нагрузка ложится на Орто-Алышский водозабор, питающий южную часть города и таким образом сегодня муниципалитет в первую очередь пытается снять нагрузку с Орто-Алышского водозабора. Принято решение о бурении дополнительных скважин. Сложности, с которыми сегодня столкнулся город, возникли не вчера, они назревали последние 20 лет. Бишкек застраивается хаотично, что не может не отразиться на его коммуникациях. С начала 2000-х годов в столице появилось 50 новых жилмассивов. Так, только за прошлый год число абонентов центрального водоснабжения увеличилось на 7 тысяч. Увеличения отбора подземных вод привело к снижению уровней. Однако с точки зрения формирования источников водоснабжения - подземных вод это с одной стороны сокращение питания подземных вод, связанное с природными и техногенными факторами, а с другой стороны - причины, связанные со структурными изменениями в гидрогеологической службе. Многочисленные реорганизации и оптимизации этого ведомства привели к сокращению и практически прекращению обязательных для эксплуатируемых месторождений мониторинга, переоценки запасов, прогноза и рекомендаций по дальнейшей эксплуатации. Обязательным условием для стабильной эксплуатации месторождений, которое было оговорено на стадии подсчёта запасов является искусственное восполнение подземных вод, однако построенные инфильтрационные бассейны в настоящее время своей функции не выполняют. Как показало обследование только часть из них частично заполнена водой, русло р. Ала-Арча сухое, весь поверхностный сток перехватывается выше по течению каналами на орошение, забирается в бассейны фермерских хозяйств и зон отдыха, что и приводит к истощению запасов подземных вод и проявляется в значительном снижении уровня, особенно на фоне увеличения водопотребления в летние месяцы.

В закрытом Иссык-Кульском бассейне планируемое водохозяйственное строительство может аналогичным образом трансформировать структуру потоков подземных вод. По данным Института водных проблем и гидроэнергетики НАН КР в Иссык-Куль до недавнего времени

впадало 101 река, на сегодняшний день их количество сократилось до 34. Остальные реки разбираются на орошение. Сокращение питания подземных вод в зоне формирования и интенсивный отбор приведёт к интрузии солёных вод озера и засолению ресурсов пресных подземных вод. Они утратят питьевое качество. В результате действующие водозаборы населённых пунктов и здравниц станут непригодными для использования. Повышенные темпы истощения запасов подземных вод за последние десятилетия наблюдались во многих странах (Индия, Китай, США и Мексика). Неустойчивое использование подземных вод значительное увеличение отбора подземных вод сопровождалось снижением их уровня на больших территориях и ухудшением их качества. В некоторых регионах истощение запасов подземных вод привело к тому, что дальнейший отбор подземных вод оказался экономически невыгодным, что побудило фермеров и власти к поиску альтернативных путей [9] и в частности таким путём стало комплексное управление водными ресурсами, в том числе управление питанием подземных вод.

Управление питанием подземных вод предназначено для регулирования питания подземных вод с целью увеличения объема водных ресурсов, улучшения качества воды в подземных горизонтах и регулирования возвратных вод с орошаемых территорий. Управление питанием подземных вод направлено на:

поддержание оптимальных уровней грунтовых вод и предотвращение их истощения, подъема, уменьшения засоления и заболачивания почв;
сокращение непродуктивных потерь воды: на испарение подземных вод;
регулирование естественного питания подземных вод.

Управление питанием подземных вод в межгорных артезианских бассейнах, особенно замкнутых должно осуществляться на основе комбинированного, геосистемного подхода, включающего экосистемные особенности в пределах бассейнов и должно включать:

охрану горных экосистем: ледников и леса;
восстановление утраченных лесопокрытых площадей и создание новых;
управление питанием в зонах формирования месторождений подземных вод;
обязательные экологические попуски для обеспечения питания подземных вод в руслах рек, разбираемых на орошение;
совместное использование подземных и поверхностных вод;
восстановление государственного мониторинга в зонах формирования подземных вод.

Восстановление и увеличение площади лесопосадок будет способствовать увеличению количества осадков и соответственно питание подземных вод. В зонах формирования месторождений подземных вод, которые приурочены к зонам предгорья сложенными рыхлыми крупнообломочными отложениями не имеющих покровных суглинков для управления питанием подземных вод достаточно соблюдение режимов экологических попусков в руслах рек

в вегетационный период и завершения работы обводных каналов с завершением сезона поливов. Наличие круглогодичного стока в реки в их верхнем течении, приуроченном к зонам формирования месторождений определит постоянное восполнение запасов.

Совместное использование подземных и поверхностных вод актуально прежде всего для центральных частей межгорных бассейнов, где расходуется основная часть используемых водных ресурсов на орошение сельхозугодий. Совместное использование подземных и поверхностных вод позволит снизить затраты на строительство обводных и магистральных каналов перебрасывающих воду рек в центральные и нижние части бассейнов, куда подземные воды и так в соответствии с их гидродинамикой поступают естественным путём.

Заранее спланированное управление питанием подземных вод в замкнутых межгорных артезианских бассейнах может предотвратить возможные негативные последствия, связанные с их истощением.

Заключение

В условиях горных стран, где состояние водных ресурсов определяется синергическими связями между всеми природными компонентами комплексное управление водными ресурсами межгорных бассейнов требует необходимости объединения управления водными ресурсами, землепользованием и экосистемами. Управление горными лесными экосистемами, сопряжённое с управлением водными ресурсами бассейнов, позволит решать проблемы по увеличению питания подземных вод, выравнивания гидрографа и снижения рисков паводковой и селевой опасности, эрозионных процессов.

Внедрение управления питанием подземных вод в межгорных бассейнах может значительно уменьшить последствия нарастающего дефицита водных ресурсов и улучшить управление водными ресурсами как на местном, так и региональном уровнях.

Список литературы

1. Барановская Е.И., Питьева К.Е., Оролбаева Л.Э. Условия формирования подземных вод артезианских бассейнов межгорного типа. // Вестник Московского университета Серия 4 Геология. 2021.- № 4-С.109-119.
2. Гапаров К. К. Влияние лесохозяйственных мероприятий на гидрологические и защитные функции еловых лесов Прииссыккуля Национальная академия наук Кыргызской Республики Институт леса и ореховодства им. проф. П.А. Гана. Бишкек, 2007. - 103с.
3. Мангельдин, Р. С. Ресурсы пресных подземных вод внутригорных впадин Тянь-Шаня / Бишкек: Илим, 1991. – 148 с.
4. Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. - Бишкек: МЧС КР, 2015, - 718 с.
5. Онучин А.А., Михеева Н.А. Влияние лесистости и климатических факторов на годовой сток рек Прииссыккуля. Лесоведение №6-2008. -с.45-52.

6. Оролбаева Л. Э. Техногенные трансформации гидрогеосферы Кыргызской Республики. // Изв. Урал. гос. горн. ун-та (Екатеринбург). – 2018. – № 4. – С.67-71.
7. Оролбаева Л.Э. Геогидрология горных стран (на примере Тянь-Шаня и Памиро-Алая). – Бишкек: «Техник», - 2013. – 185 с.
8. Толстихин Г.М., Мамасерииков Т. Н. Особенности формирования эксплуатационных запасов пресных подземных вод Бишкекской площади // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета, Том 2, Естественно-технические науки -2002. -№4. С.87-91.
9. Управление питанием подземных вод: решение проблемы дефицита водных ресурсов в Ферганской долине / Исследовательский отчет Международного Института Управления Водными Ресурсами 151 г. Коломбо, Шри Ланка 52 с.

УДК 556.3

НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАКОЛОННЫХ ПЕРЕТОКОВ НА ВОДОНОСНЫЕ ГОРИЗОНТЫ НА ПРИМЕРЕ ВЕЛИКОЛУКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

К.В. Пекпулатова*¹, В.М. Трифаничев²

¹Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, E-mail: kpekputatova@mail.ru

²ООО «Геологический центр СПбГУ», Санкт-Петербург, Россия, E-mail: valera-geo@yandex.ru

Аннотация

В настоящее время водоносные горизонты, представленные в гидрогеологическом разрезе Великолукского месторождения подземных вод, являются напорными. До момента массового возникновения заколонных перетоков статический уровень озерно-ледниковых отложений зависел от сезонных изменений, а стипинайский водоносный горизонт был низконапорным. В последнее время наблюдается тенденция к повышению уровней грунтовых вод и, как следствие, изливы при вскрытии скважинами четвертичных отложений. Данное аварийное состояние появилось в результате возникновения заколонных перетоков, вызванных коррозионным износом обсадных труб и цементного кольца в затрубном пространстве, отвечающего за разобщение горизонтов.

Ключевые слова: заколонные перетоки, подземные воды, Великие Луки, ликвидация, самоизлив.

NEGATIVE CONSEQUENCES OF THE INFLUENCE OF BEHIND-THE-CASING FLOWS ON AQUIFERS BY THE EXAMPLE OF THE VELIKOLUKSKOE GROUNDWATER DEPOSIT

K.V. Pekputatova*¹, V.M. Trifanichev²

¹St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation, E-mail: kpekputatova@mail.ru

²LLC «St.Petersburg University Centre for Geology», St. Petersburg, Russian Federation, E-mail: valera-geo@yandex.ru

Abstract

To date, the aquifers represented in the geological section of the Velikiye Luki groundwater deposit are pressure-bearing. Until the moment of the mass occurrence of behind-the-casing flows, the static level of lake-glacial deposits depended on seasonal changes, and the Stipinai aquifer was low-pressure. There is now a general rise in the groundwater table and, as a consequence, outpourings during the opening of Quaternary sediments. This emergency condition appeared as a result of the occurrence

of behind-the-casing flows caused by the corrosive wear of casing pipes and the cement ring in the annular space responsible for the separation of horizons.

Key Words: behind-the-casing flows, groundwater, Velikie Luki, liquidation, self-discharge.

Введение

Великолукское месторождение подземных вод, расположенное в пределах городской черты г. Великие Луки, детально разведано в 1970 году. Освоение разведанных запасов, по существу, производилось только на Северо-восточном участке, где в 1976 году был сооружен водозабор «Северный», состоящий из 11-и эксплуатационных скважин. На Юго-восточном участке добыча подземных вод осуществлялась Псковской дистанцией Октябрьской железной дороги для водоснабжения железнодорожной станции и ее инфраструктуры. Водоотбор из 4-х скважин в количестве около 2 тыс. м³/сут, сохранялся постоянным с 70-х годов. Уже к 1990 году производительность водозабора «Северный» достигла 25 тыс. м³/сут, что вдвое превышало утвержденные запасы Северо-восточного участка. В 1998 году совместным решением МПР России и администрации Псковской области в связи с фактической ситуацией в освоении разведанных запасов МП «Водоканал» была выдана лицензия на добычу подземных вод в объеме 40 тыс. м³/сут на срок до 2008 года с условием переоценки запасов Великолукского месторождения подземных вод.

Данные гидрогеологические показатели свидетельствуют о возможном истощении напорного водоносного горизонта, вызванного появлением заколонных перетоков, вызванных износом обсадных труб и цементного камня в затрубном пространстве.

Методы исследований

Для решения обозначенной проблемы были изучены гидрогеологические условия напорных водоносных горизонтов на основе полученных данных из геологических фондов.

Гидрогеологические условия Великолукского месторождения определяются распространением нескольких водоносных горизонтов, приуроченных к девонским отложениям.

С поверхности под покровом преимущественно ледниковых и озерно-ледниковых отложений верхнечетвертичного возраста, мощность которых, в зависимости от рельефа, изменяется от долей метра до 20,0 м, распространен стипинайский водоносный горизонт (D_{3st}). Он приурочен к трещиноватым доломитам мощностью до 15 м, залегающим на глубине от 10 до 50 м. Уровень подземных вод, в зависимости от рельефа поверхности, устанавливается на глубине от 35 м до превышения поверхности земли на 19 м. Водообильность доломитов достаточно высокая, удельный дебит скважин составляет 0,5 -3,5 л/с.

Подстилает стипинайский (D_{3st}) водоносный горизонт толща снежско-памушский ($D_{3sž-pm}$) отложений, представленная преимущественно алевролитами и мергелями с маломощными слоями известняка и песчаника. Снежско-памушский горизонт ($D_{3sž-pm}$) служит водоупорной кровлей саргаевско-даугавского водоносного горизонта (D_{3sr-dg}), при вскрытии которого всегда наблюдается сильное фонтанирование скважин.

Саргаевско-даугавский водоносный горизонт (D_{3sr-dg}) распространен повсеместно. Глубина его залегания его кровли на площади месторождения от 85 до 110 м. Горизонт сложен преимущественно доломитами и известняками с маломощными слоями глин и мергелей. При средней мощности горизонта около 100 м на долю доломитов и известняков приходится около 90 м. На всей территории месторождения саргаевско-даугавский водоносный горизонт содержит напорные с содержанием сероводорода воды, пьезометрический уровень которых превышает поверхность земли на +25-55 м [1].

Результаты и их обсуждения

По результатам анализа гидрогеологических условий была выявлена закономерность повышения статического уровня и увеличения дебита скважин, вызванных появлением заколонных перетоков, которые в последующем могут привести к частичному истощению подземных вод Великолукского месторождения.

В настоящее время в связи с многолетней эксплуатацией водозабора «Северный» здесь сформировалась депрессионная воронка с понижением уровня в центре на 25 м. Водозабор «Северный», принадлежащий МП «Водоканал», по данным 2004 года состоял из 12 эксплуатационных скважин.

В 2005 году по причине аварийного состояния из эксплуатации выведены 8 скважин. Вместо них были пробурены и введены в эксплуатацию новые скважины. Аварийные скважины ликвидированы не были. Таким образом, по данным на 2005 год в эксплуатации находилось 12 скважин. 10 скважин, в том числе 2 скважины, пробуренные в 1976 году, находящиеся в аварийном состоянии, подлежали ликвидации. В 2005 году в рамках проекта «Реконструкция водозабора «Северный» МП «Водоканал» г. Великие Луки Псковской области» была разработана и утверждена специальная часть проекта «Ликвидация самоизлива подземных вод». Однако проект в части ликвидации самоизливающихся скважин не реализован до настоящего времени. 4, из подлежащих ликвидации скважин, имели неконтролируемый излив по заколонному пространству, вследствие коррозионного износа обсадных труб и цементного кольца в затрубном пространстве, обеспечивающее герметичность обсадной колонны и разобщение горизонтов. На устье этих скважин и на удалении до 100 м, при их закрытии, наблюдались грифоны с дебитом до 150 м^3 в сутки. В остальных скважинах был выявлен коррозионный износ обсадных труб, разрыв колон со смещением.

Учитывая гидродинамические характеристики Саргаевско-даугавского водоносного горизонта, а также агрессивное воздействие сероводорода, присутствующего в воде, количество скважин с заколонными перетоками за прошедшие 18 лет могло увеличиться. Так сколько их в принципе? Эти скважины с момента вывода их из эксплуатации находятся в режиме излива, поскольку попытки закрыть задвижку на устье приводят к увеличению дебита грифонов на устье и на удаление от них. Скважины не закрывают для того чтобы грифоны не размывали территорию, а также не создавалось избыточного давления в затрубном пространстве и соответственно не ускорился процесс образования заколонных перетоков. Таким образом, из целевого водоносного горизонта расходуется значительное количество воды, которое не используется в хозяйстве, а просто сливается в реку Ловать.

Под воздействием грифонов грунты четвертичных отложений на территории водозабора «Северный» МП «Водоканал» подверглись размыву, что внесло корректировку в их физико-механические свойства. Но с некоторых пор воды заколонных перетоков стали оказывать негативное воздействие и в других частях города. Так в долине р. Теплая (Полевой пер. 16) 2016 году при бурении разведочной скважины на воду на глубине 9 м получили излив, дебитом 85-90 м³/ч с постепенным снижением и стабилизацией до 15 м³/ч и статическим уровнем +15-17 м. Вода изливалась из скважины с запахом сероводорода [2].

При ознакомлении с геологическими материалами, полученными при изучении района города Великие Луки начиная с 1976 года, не обнаружено никаких свидетельств о наличии содержания сероводорода в водах четвертичных отложений. Кроме этого, в 2006 году на водозаборе «Северный» МП «Водоканал» г. Великие Луки с целью выяснения природы грифонов на скважинах с заколонными перетоками, было выполнено гидрохимическое опробование. Полученные данные свидетельствует об отсутствии влияния верхнего стипинайского (D_{3st}) водоносного горизонта на образование водопроявлений из заколонного пространства. Наличие сероводорода в изливающихся водах четвертичных отложений позволяет сделать предположение, что причиной изменения параметров водоносных горизонтов четвертичных отложений являются воды саргаевско-даугавский водоносный горизонт (D_{3sr-dg}), поднимающиеся по заколонным пространствам скважин и заполняющие пористые грунты.

Заключение

Сероводородная вода саргаевско-даугавского водоносного горизонта по заколонным перетокам поднимается вверх и, при прохождении через пористые грунты четвертичных отложений насыщает их водой, меняя их гидродинамические характеристики. Грунты, обладающие более пористой структурой, получают большее количество воды и становятся напорными. Изменение физико-механических свойств грунтов в результате насыщения

их водами саргаевско-даугавского водоносного горизонта (D_{3sr-dg}) осложняет строительные работы и ограничивает строительный бизнес в выборе мест под застройки.

Список литературы

1. Гидрология СССР, т.3. Под редакцией И.К. Зайцева. «Недра» 1967 г.
2. Трифаничев В.М., Тудвачев А.В. «Заколонные перетоки в изливающихся скважинах – источник загрязнения подземных вод». Журнал «Справочник эколога» 2022, №7(115).

УДК 556.531.5

ПРОГНОЗ ПОДТОПЛЕНИЯ ПОБЕРЕЖЬЯ БАЙКАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО УРОВНЯ

**А.М. Плюснин^{1,2}, Е.Г. Перязева^{*1}, А.Д. Базаров¹, М.К. Чернявский¹,
А.В. Украинцев¹**

¹Геологический институт им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения РАН, г. Улан-Удэ, Россия,
E-mail: peryazeva75@mail.ru

²Восточно-Сибирский государственный технологический университет управления, г. Улан-Удэ, Россия,
E-mail: plusnin-53@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования подтопления восточного побережья Байкала в пределах населенных пунктов Республики Бурятия. Для определения уровня залегания грунтовых вод использован метод георадиолокационного зондирования и бурение гидрогеологических скважин. Установлено слоистое строение прибрежных отложений, выявлены проницаемые для вод тектонические нарушения, по которым осуществляется связь озерных вод с грунтовыми водами на побережье. В пределах населенных пунктов определены площади, подверженные процессам подтопления. Сделан прогноз развития подтопления побережья при подъеме уровня озера Байкал.

Ключевые слова: Байкал, уровень воды, разломы, грунтовые воды, подтопление

FORECAST OF FLOODING OF THE BAIKAL COAST WHEN IT'S LEVEL CHANGES

**A.M. Plusnin^{1,2}, E.G. Peryazeva^{*1}, A.D. Bazarov¹, M.K. Chernyavskiy¹, A.V.
Ukrainsev¹**

¹The N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation, E-mail: peryazeva75@mail.ru

²The East Siberian State Technological University of Management, Ulan-Ude, Russian Federation,
E-mail: plusnin-53@mail.ru

Abstract

The results of the study of the eastern coast flooding of Lake Baikal within the settlements of the Buryatia Republic are presented. To determine the level of groundwater occurrence, the method of georadar sounding and drilling of hydrogeological wells was used. The layered structure of coastal sediments has been revealed, tectonic disturbances permeable to water, through which the connection between lake waters and groundwater on the coast is carried out, have been identified. Areas exposed

to flooding processes have been identified within the settlements. A prediction for the coastal flooding development when the level of Lake Baikal rises has been made.

Key Words: Baikal, water level, fractures, groundwater, flooding

Введение

С возведением в 1959 г плотины Иркутской ГЭС Байкал стал регулируемым водоемом. Его средний уровень был поднят на 80 см. Средний многолетний уровень до перекрытия Ангары составлял 455,62 м, после перекрытия – 456,42 м ТО. Средняя многолетняя внутригодовая амплитуда составляла 87 см. Нормальный подпорный уровень (НПУ) был установлен на отметке 457 м ТО. За прошедший после строительства ГЭС период НПУ был превышен 18 раз, максимальная абсолютная отметка уровня достигала 457,37 м ТО (1988 год). Уровень воды в Байкале выше НПУ держался от 44 до 128 суток. Длительное стояние высокого уровня воды привело к активизации многих негативных физико-геологических явлений на всем протяжении береговой полосы. На восточном побережье многие населенные пункты подвергались затоплению и подтоплению.

Начиная с 2001 г. при регулировании уровня воды оз. Байкал заинтересованные организации руководствовались Постановлением Правительства РФ № 234, которое допускало колебание уровня воды в озере в диапазоне от 456,0 до 457,0 м (ТО). В связи с экстремально маловодными годами 27 декабря 2017 г правительством России было принято временное Постановление № 1667 «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2018-2020 гг». Этим постановлением было приостановлено действие старого до 1 января 2021 г. и допускалось увеличение амплитуды колебания уровня воды в озере до 2,31 м и форсирование его уровня до 457,85 м. Предполагается продление действия этого постановления на последующие годы. В связи с этим РАН инициировала работы по исследованию воздействия негативных физико-геологических явлений на побережье, в том числе и развитие процессов подтопления. В представленной статье изложены результаты исследования подтопления, проведенные в 2022 г.

Методы исследований

Уровень залегания грунтовых вод определялся методом георадиолокационного профилирования с заверкой результатов геофизических данных путем бурения скважин в узловых точках наблюдения. Георадиолокационное исследование выполнялось с помощью георадара «Око». Принцип действия георадара основан на излучении сверхширокополосных электромагнитных импульсов (50-1000 МГц) на несущей частоте антенного блока в подстилающую среду и регистрации их отражений от границ раздела различных литологических слоев, на которых скачкообразно изменяются электрофизические свойства, электропроводность

и диэлектрическая проницаемость [1]. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между сухими и обводненными грунтами, контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между мерзлыми и талыми грунтами, между коренными и осадочными породами и др.

Георадиолокационное профилирование проводилось антенными блоками 250 МГц с шагом измерения 5 см. Длина электромагнитной волны в сухом песке на таких частотах и средней скорости волны 3–5 см/нс составляет от 4 до 20 см. Разрешающую способность метода можно оценить в половину длины волны, что, соответственно, равно 2–10 см. Местоположение профилей в реальном времени фиксировалось GPS-приемником. Профили пересекали точки контрольного бурения, пробуренных на глубину до 4 м, где измерена фактическая глубина уровня грунтовых вод и описан литологический состав рыхлых отложений. Полученные данные контрольного бурения в дальнейшем использовались для идентификации выделенных георадарных комплексов на радарограммах, оценке фактических скоростей электромагнитной волны и определении диэлектрической проницаемости выделенных слоев.

Результаты и их обсуждение

Проведены геолого-геофизические исследования на восточном и северо-западном побережье Байкала в пределах территории Республики Бурятия. Геофизические данные заверялись бурением гидрогеологических скважин. Полученные результаты показывают, что геологическое строение побережья Байкала благоприятствует проникновению воды из озера, в том числе на застроенной территории.

Село Гремячинск располагается на низкой береговой террасе, сложенной озерными отложениями. Существует угроза подтопления большей части с. Гремячинск, включая жилые дома, магазины и др. инженерные сооружения. На территории села пройдено три георадарных профиля и пробурено восемь гидрогеологических скважин (рис.1).

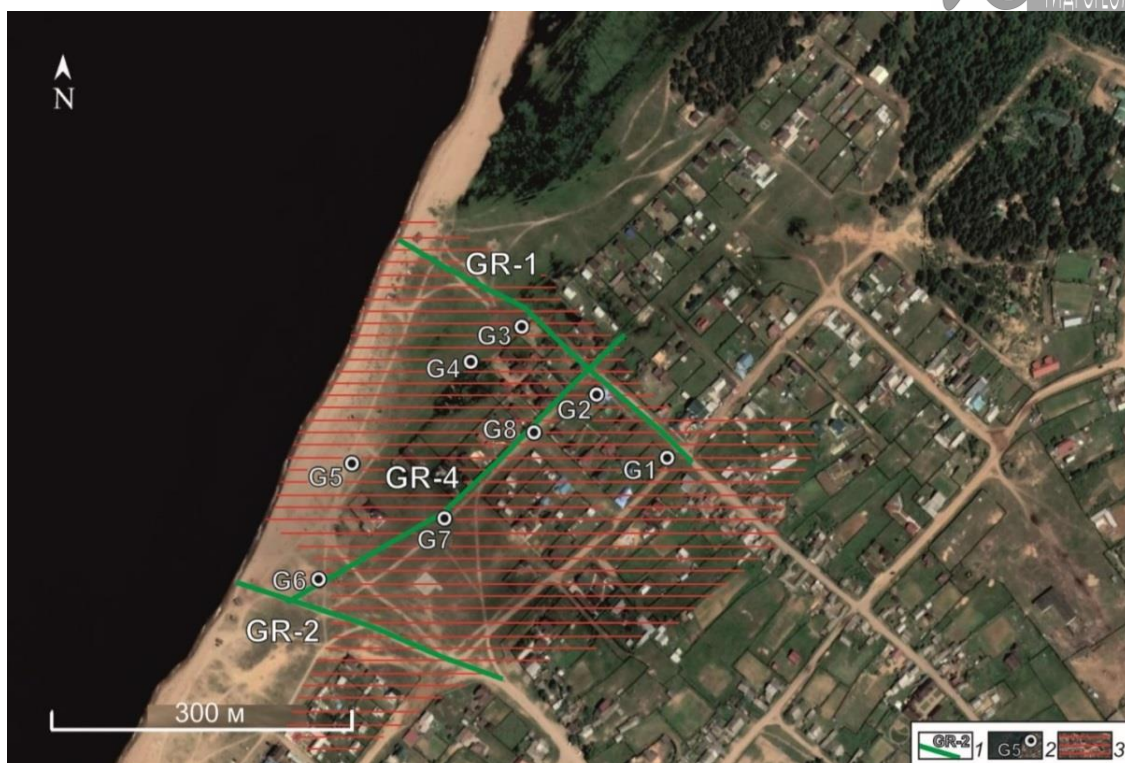


Рис. 1 Спутниковый снимок с. Гремячинск. Условные обозначения: 1 – расположение георадарных профилей, 2 – места бурения гидрогеологических скважин, 3 – территория подверженная умеренному подтоплению.

В четырех скважинах глубина залегания менее 1 м, еще в 4 скважинах глубина залегания грунтовых вод менее 2 м. На георадиолокационном профиле Gr-1 отчетливо выделяются 3 георадарных комплекса.

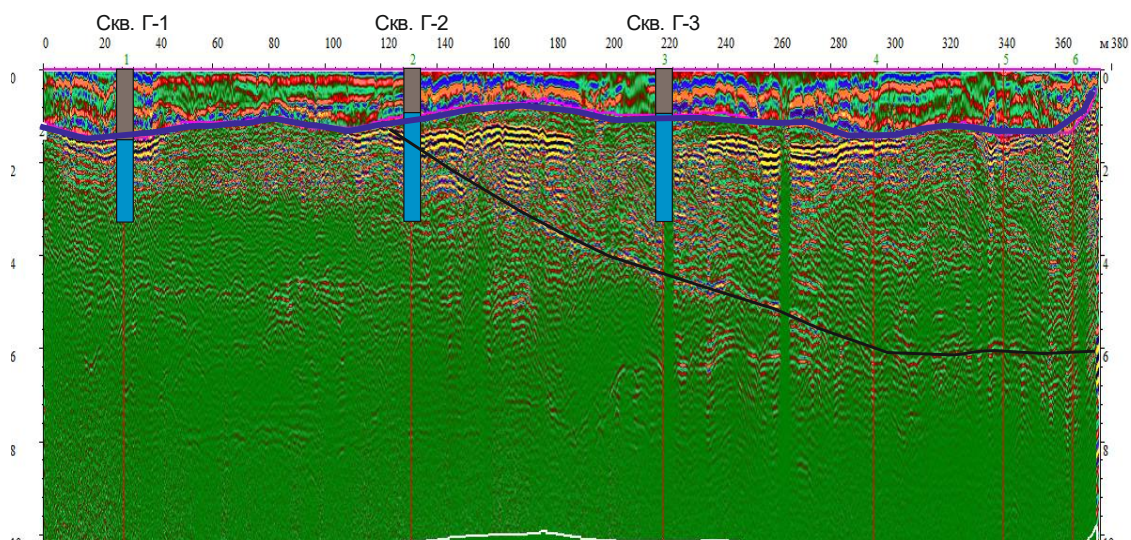


Рис.2 Разрез осадочных пород в с. Гремячинск по георадарному профилю Gr-1.

Первый комплекс фиксируется в интервале глубин до 1.5-2м. Согласно бурению данный комплекс интерпретируется как озерные песчаные отложения. Для слоя определены электрофизические параметры, $\varepsilon \approx 6$, $V \approx 133$ мм/нс, соответствующие сухим пескам. Второй

комплекс выделяется в начальной половине профиля на расстоянии 0-120 м. и соответствует обводненным пескам озерного генезиса с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon \approx 25$. Третий комплекс выделяется в прибрежной зоне в отметках 120-380 м, соответствует обводненным песчано-галечным отложениям с косослоистой структурой, падением в сторону оз. Байкал (Рис.2). При бурении скважин G-2 и G-3 выявлен хорошо проницаемый крупный песок рыжего цвета (пленка гидроокислов железа). В этом месте наблюдается купол в залегании грунтовых вод. Они располагаются на глубине 0,90 и 0,88 м соответственно. Вероятно, это связано с тем, что по выявленной хорошо проницаемой зоне осуществляется гидравлическая связь грунтовых вод с озером Байкал. Вследствие этого значительная часть территории с. Гремячинск подвержена подтоплению.

Периодический подъем уровня Байкала проявляется в развитии процессов подтопления северо-восточной и восточной части поселка Усть-Баргузин. Поселок располагается на первой надпойменной террасе реки, которая возвышается в центральной части над уровнем реки на 4-5 м. В северо-восточной части поселка терраса постепенно понижается и переходит в заболоченный залив реки. В северо-западной части поселка жилая застройка ограничивается обрывистым берегом, который отделяет террасу от поймы реки Баргузин. На территории поселка пройдено несколько геофизических профилей и пробурено 4 скважины. Горные породы, слагающие террасу, представлены озерно-речными отложениями разного фациального состава. Границы между выделенными комплексами субгоризонтальные. Первый комплекс фиксируется в интервале глубин до 2,4 м. Согласно бурению данных комплекс интерпретируется как озерно-речные песчаные отложения. Для слоя определены электрофизические параметры, $\varepsilon \approx 6$, $V \approx 133$ мм/нс, соответствующие сухим пескам. Вторым комплексом соответствует обводненным пескам озерного генезиса с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon \approx 25$. Его залегание прослежено от берегового уступа в юго-восточном направлении на расстояние 150 м. Наклон слоев направлен в сторону реки. Грунтовые воды в краевых частях террасы располагаются на отметках 2,36 м и 2,68 м. В центральной части террасы грунтовые воды залегают на глубине 4,16 м и 4,5 м. Из полученных результатов исследования следует, что часть поселка Усть-Баргузин, располагающаяся в северо-восточной и северо-западной частях, подвергается слабому подтоплению. Не исключено, что в северо-западной части поселка в период осенних штормов в многоводные годы может активизироваться абразия берега, которая будет сопровождаться оползнями.

Село Максимиха располагается в устье реки Максимиха и подвержено процессам затопления и подтопления. По результатам исследования выделяется два участка, где проявляется негативное воздействие подъема уровня озера Байкал. Первый участок располагается в западной части села, где жилая застройка выходит к берегу озера. Территория жилой застройки в этом месте испытывает воздействие подтопления умеренного класса. На этом

участке пройдено три георадарных профиля и пробурено 9 скважин. Один профиль пройден вдоль берега, на удалении 11–14 м от уреза воды. В разрезе выделяются два комплекса соответствующие пескам и влажным пескам. Глубина залегания грунтовых вод по данным георадарного зондирования меняется в диапазоне от 1 до 2 м, причины изменения уровня залегания грунтовых вод связаны с геологическим строением территории. На отметках по простиранию профиля 250–320 м выделяются элементы аномального расположения слоев осадочных пород. Установлено нарушение горизонтального залегания осадочных пород, связанное с разрывным нарушением. В этом месте в озеро разгружается ручей. По данным полученным при бурении скважин, грунтовые воды располагаются на глубине 1,15; 1,40; 1,71 м. Абсолютные отметки залегания грунтовых вод ниже отметок стояния воды в озере. Представляется, что подтопление этого участка территории села связано с подъемом уровня озера. Второй участок умеренного подтопления, занимает значительную часть села, расположенную в приустьевой долине реки Максимиха. Здесь располагаются жилые дома, пирамида, строятся церковь и торговый центр. Грунтовые воды располагаются на глубине 0,9–1,49 м. Площадь умеренного подтопления на этом участке с. Максимиха составляет 0,7 км². При подъеме уровня Байкала замедлится сток реки, что приведет к затоплению значительной части этого участка. Установленное сильное подтопление территории с. Максимиха, в значительной степени, связано с особенностями геологического строения этой местности. Она представляет собой небольшую межгорную впадину с неравномерным опусканием блоков пород. Блоки, испытавшие наиболее сильное погружение, заболочены.

Село Посольское расположено в приустьевой части Большой Речки, на 7–8 метровой озерной террасе. Вдоль побережья озера протягивается береговой вал шириной до 25 м и высотой около 1,5 м, сложенный песчано-галечным материалом. За береговым валом расположена лагуна шириной 200–250 м. Далее к востоку вдоль лагуны протягивается задернованный склон озерной террасы. В юго-восточной части села располагается озеро с заболоченными берегами. В северо-восточной и южной части села выделяются территории подверженные умеренному подтоплению грунтовыми водами. В зону подтопления попадает автомобильная дорога, соединяющая две части села. В этих местах в зимний период развивается пучение грунтов. При подъеме уровня эта территория частично затопится рекой, озеро увеличится в размерах.

Поселок Култушная расположен в устьевой части реки Култушная. В поселке располагаются многочисленные дома отдыха, турбазы и пр. объекты рекреации. Долина реки Култушная сильно заболочена. Грунтовые воды вблизи побережья Посольского Сора располагаются на отметках глубин менее 1 м, водоупором служат глинистые отложения [2]. Заболачивание этой территории связано с воздействием рек Култушная и Абрамиха. При подъеме уровня Байкала они разливаются и затапливают окружающую равнинную

территорию. Подъем уровня Байкала приведет к еще более сильному заболачиванию территории.

Для защиты поселка Нижнеангарск от воздействия волн возведена дамба, сформирован пляж. Это место является местом отдыха для жителей поселка. За дамбой местность заболочена. Болота протягиваются до жилой застройки поселка. Строения, расположенные на ближней к берегу Байкала улице находятся в зоне умеренного подтопления. В двух пробуренных скважинах уровень грунтовых вод находится на глубине 2 м. В колодце, расположенном во втором ряду улиц, глубина залегания грунтовых вод всего 1,5 м. Жилая застройка, расположенная вдоль берега Сора испытывает воздействие подтопления. При подъеме уровня Байкала произойдет затопление этой территории, пострадают жилые дома и туристические базы, располагающиеся вдоль береговой полосы.

Заключение

Породы, расположенные на побережье Байкала во многих местах раздроблены разрывными нарушениями. Фиксируются многочисленные разновеликие блоки, которые подвержены вертикальным тектоническим движениям, сформированы микровпадины. Осадочные породы представлены песчаными озерными, речными, глинистыми и эоловыми отложениями. При подъеме уровня Байкала может происходить движение грунтовых вод по хорошо проницаемым зонам от озера на сушу, в результате чего негативному воздействию подвергнется жилая застройка и инженерные сооружения. Планируемый подъем уровня Байкала приведет к выводу из хозяйственного оборота значительных участков территории в пределах населенных пунктов.

Работа выполнена в рамках проекта «Исследование негативных физико-геологических явлений на восточном побережье Байкала» (121112400008–2).

Список литературы

1. Рекомендации по проведению георадиолокационных измерений для решения геологических задач // ООО «Логические системы». – Раменское, 2008. – 28 с
2. Хамуд А.А., Рассказов С.В., Коломиец В.Л., Будаев Р.Ц., Чувашова И.С., Рубцова М.Н. Строение опорного разреза Мишиха Танхойского третичного поля и его значение для реконструкций ранней истории Южно-Байкальской впадины и Хангайского орогена / Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона. Иркутск; ИЗК СО РАН. 2018. С. 57-58.

УДК 556.3

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНОГО СТОКА ПО ГИДРОГРАФУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИВЫХ ИСТОЩЕНИЯ

С.П. Поздняков^{*1}, Н.Л. Фролова², Ван Пинг³, С.О. Гриневский⁴

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: spozd@mail.ru

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: frolova_nl@mail.ru

³ Институт географических наук и исследований природных ресурсов Китайская академия наук Пекин, Китай, E-mail: wangping@igsnr.ac.cn

⁴Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: sogrinev@mail.ru

Аннотация

Проведен анализ закономерностей ветвей спада гидрографов рек и многолетней изменчивости серий минимального стока для 6 малых и средних рек в бассейне р. Волги. Предложено выделение двух составляющих в описании истощения, имеющих различные характерные времена спада для базового и подземного стока. Обоснован метод оценки параметров двухпроходной цифровой фильтрации многолетних суточных рядов речного стока для выделения в нем подземной составляющей. Проанализированы общие закономерности изменения подземного стока бассейнов рассматриваемых рек в конце 20 – начале 21 века.

Ключевые слова: подземный сток, расчленение гидрографа, кривая спада, индекс базового стока, индекс подземного стока.

ESTIMATION OF GROUNDWATER FLOW DYNAMICS USING HYDROGRAPHS AND RECESSON CURVES

S.P. Pozdniakov^{*1}, N.L. Frolova², P. Wang³, S.O. Grinevsky⁴

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: spozd@mail.ru

²Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: frolova_nl@mail.ru

³ Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, E-mail: wangping@igsnr.ac.cn

⁴Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: sogrinev@mail.ru

Abstract

The patterns of recession limbs of river hydrographs and multiyear variability of minimum runoff series for 6 small and medium-sized rivers in the Volga River basin were analyzed. The separation of two components in description of runoff recession with different characteristic

105

recession times for the total slow (base) and groundwater runoff was proposed. A method for estimating the parameters of two-pass digital filtering of multi-year daily series of river runoff was substantiated for separation of groundwater flow in them. The general regularities of changes in groundwater flow in the basins of the examined rivers at the end of the 20th and beginning of the 21st centuries were analyzed.

Key Words: groundwater flow, hydrograph separation, recession curve, base flow index, groundwater index

Введение

Выделение подземного питания рек путем расчленения гидрографа речного стока является одним из наиболее эффективных способов оценки ресурсов подземных вод в зоне активного водообмена. С использованием этого метода во второй половине 20 века выполнены крупнейшие обобщения в виде карт подземного стока СССР и Восточной Европы. Лидирующую роль в постановке работ по региональной оценке и картированию естественных ресурсов подземных вод играл заведующий кафедрой гидрогеологии МГУ в период с 1968 по 1973 гг. проф. Б.И. Куделин [1]. Значительный вклад в создание этих карт внесли его ученики – В.А. Всеволожский (зав кафедрой гидрогеологии в 1988 - 2009 гг), И.Ф. Фиделли, И.С. Зекцер, Р.Г. Джамалов и др. Основной задачей проведенных исследований было картографирование подземного стока – то есть фиксация прежде всего пространственной изменчивости его среднееголетних обеспеченных величин. В настоящее время в связи с протекающими климатическими изменениями актуальна задача анализа того, как нестационарность климата, вызывающая в масштабе последних 40-50 лет уже заметные перестройки формирования внутригодовой и многолетней изменчивости общего стока рек [2], передается на подземные воды. Иными словами, есть ли в разных климатических зонах и разных гидрогеологических условиях заметные тенденции в изменении подземного стока зоны активного водообмена? Ключевой проблемой при этом является обоснованность универсального метода выделения подземного стока в реки. Исторически в России наиболее популярен метод генетического расчленения гидрографа, в котором подземный сток выделяется с использованием подхода, разработанного Б.И. Куделиным [3]. В англоязычной литературе в настоящее время широко используются методы цифровой фильтрации гидрографов [4] с выделением в них быстрого (quick flow) и замедленного (slow flow) или базового (base flow) стока. Типовой алгоритм цифровой фильтрации использует два настраиваемых параметра. Первый параметр – индекс базового стока (*BFI*) — это средняя доля базового стока в общем. Второй параметр – константа уравнения экспоненциальной кривой истощения базового стока α [4; 5]. Важно, что базовый сток в общем случае не является аналогом подземного стока, так как он интегрально включает влияние разных процессов задержки выпавших осадков на поверхности и под поверхностью

земли в процессе их трансформации осадков в сток [5]. Безусловно подземный сток – это часть базового стока. В [7] представлен новый двухпроходной алгоритм цифровой фильтрации, позволяющий выделять в базовом стоке часть, ассоциированную именно с подземным стоком и учитывать при цифровой фильтрации гидрографа процесс берегового регулирования. В данном подходе, помимо упомянутых выше, используются два дополнительных параметра цифрового фильтра: индекс подземного стока (BFI_d) — это средняя доля подземного стока в общем, и константа уравнения экспоненциальной кривой истощения подземного стока α_g .

Целью работы является обоснование метода настройки параметров двухпроходной цифровой фильтрации на основе анализа ветвей спада гидрографов (кривых истощения) и автокорреляции минимального стока рек для последующего применения этого метода для расчленения гидрографов суточного разрешения шести малых и средних рек в бассейне р. Волги (Табл. 1).

Табл. 1 Характеристики стока анализируемых рек.

Река, гидрометрический пост	Период наблюдений	Площадь водосбора, км ²	Среднегодовой расход, м ³ /сек	Среднегодовой слой стока, мм/год
Ока - г. Калуга	1945-2014	54900	288	165
Угра п. Товарково	1945-2014	15300	90	186
Кострома - г. Буй	1946-2017	8870	74	263
Жиздра - г. Козельск	1958-2016	6940	38	173
р.Зуша - г. Мценск	1957-2016	6000	29	152
Протва - с. Спас-Загорье	1956-2021	3640	22	190

Метод двухпроходной цифровой фильтрации

В модели двухпроходной цифровой фильтрации используются следующие уравнения баланса стока реки $Q(t)$:

$$\begin{aligned}
 Q(t) &= Q_{surf}(t) + Q_b(t); \\
 Q_b(t) &= Q_{qb}(t) + Q_{gw}(t); \\
 Q_{gw}(t) &= Q_{bgw}(t) + \Delta Q[\Delta H(t)],
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где обозначено Q_{surf} – быстрый поверхностный сток, Q_b – замедленный (базовый) сток, Q_{qb} – быстрая часть базового стока, Q_{gw} – разгрузка подземных вод в реку, Q_{bgw} – расход естественного потока подземных вод, формирующийся в области питания, ΔQ – береговое регулирование подземного стока, ΔH – превышение уровня воды на гидрометрическом створе среднегодовой отметки.

Алгоритм расчленения состоит в последовательном двухкратном применении цифрового фильтра Эххарда [6] для двух последовательных моментов времени i и $i+1$, разделенным шагом Δt :

$$Q_{b,i} = \frac{(1-BFI)r_b Q_{b,i-1} + BFI(1-r_b)Q_i}{1-r_b BFI}; r_b = \exp(-\alpha \Delta t)$$

$$Q_{bgw,i} = r_g Q_{bgw,i-1} + (1-r_g) \frac{BFI_g}{1-BFI} [Q_i - (Q_{b,i} + \Delta Q_i)]; r_g = \exp(-\alpha_g \Delta t)$$
(2)

Система уравнений (2) для вычисления расхода берегового регулирования ΔQ_i дополняется аналитическим решением одномерной задачи фильтрации в полуограниченном пласте с заданным граничным условием III рода на реке. При этом для оценки текущей величины ΔH_i используется уравнение степенной связи расхода и глубины реки. В случае, если регулирование не играет существенной роли, то для всех моментов времени $\Delta Q = 0$.

Оценка параметров фильтра по кривым спада и минимальному годовому стоку

Для оценки константы спада α базового стока использован анализ рецессионных кривых в форме зависимости скорости спада от расхода на нисходящих ветвях гидрографов [4]. Скорость спада dQ/dt оценивалась путем численного дифференцирования кривой $Q(t)$ для участков гидрографа, на которых не менее пяти суток подряд наблюдается снижение расхода. На рис. 1 показана связь скорости спада и расхода для всех анализируемых рек, имеющая степенной характер. Линейная аппроксимация этой кривой для каждой реки позволяет получить для нее величину параметра α .

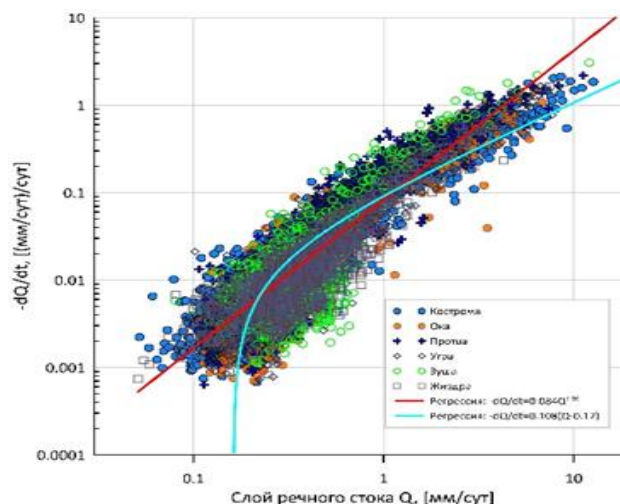


Рис. 1 К оценке константы истощения базового стока α по нисходящим ветвям гидрографов рек.

Оценка параметра BFI проводилась на основе предпосылки о том, что поверхностное стекание происходит в течение достаточно короткого времени t_{surf} [сут] после выпадения жидких

осадков (снеготаяния), которое связано известной эмпирической зависимостью с площадью бассейна F [км²] как:

$$t_{surf} = 0.8F^{0.2} \quad (3)$$

С использованием рассчитанных скоростей подъема-спада расходов и их величин гидрограф каждой реки обрабатывался с выделением пиков, а затем для каждого пика с окном, определяемым зависимостью (3), оценивался объем поверхностного стекания. Параметр BFI рассчитывался как отношение разницы суммарных объемов общего стока и поверхностного стекания к объёму стока за весь период наблюдений.

Для оценки параметров BFI_q и α_g использован анализ семисуточных серий минимального стока рек за гидрологические годы. Полагалось, что именно минимальные годовые серии определяются разгрузкой подземных вод и характеризуют многолетнюю изменчивость расхода Q_{bgw} . Тогда BFI_q определяется как среднееголетняя доля минимального стока в общем стоке реки. Оценка величины параметра α_g выполнялась по коэффициенту автокорреляции r_1 минимального стока соседних лет ($t_{year} = 365,25$ сут) с использованием предпосылки о экспоненциальном характере затухания автокорреляции со временем [8]:

$$\alpha_g = -\frac{\ln(r_1)}{t_{year}} \quad (4)$$

Результаты выделения подземного стока

С использованием параметров фильтра, определенных по описанной выше методике, проведено расчленение гидрографов. На рис. 2 показана многолетняя динамика базового и подземного стока для всех 6 бассейнов. Тренд анализ полученных кривых показал, что для базового стока нет статистически значимых трендов, а для подземного стока для всех 6 бассейнов положительный тренд значим, но объясненная им дисперсия достаточно мала.

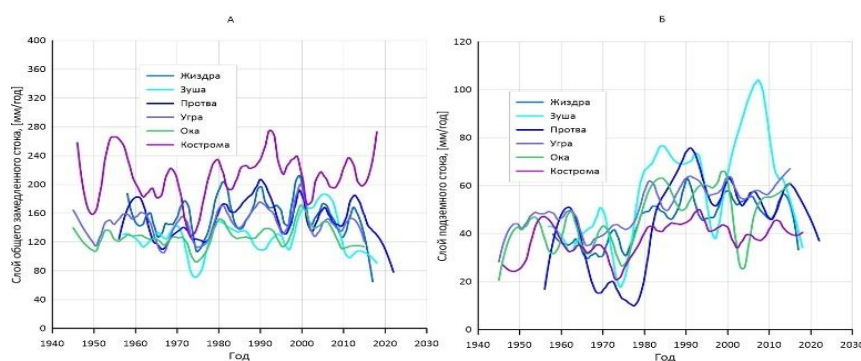


Рис. 2 Многолетняя динамика стока по результатам расчленения гидрографов. А – базовый сток, Б – подземный сток.

На рис. 3 показана среднемноголетняя динамика внутригодовой разгрузки в реку и автокорреляция выделенного подземного стока. Из данного рисунка следует, что масштаб внутригодовой изменчивости и автокорреляция подземного стока достаточно сильно различаются для рек, расположенных в похожих климатических условиях. Это различие связано скорее всего с гидрогеологическим строением зоны активного водообмена подземных вод.

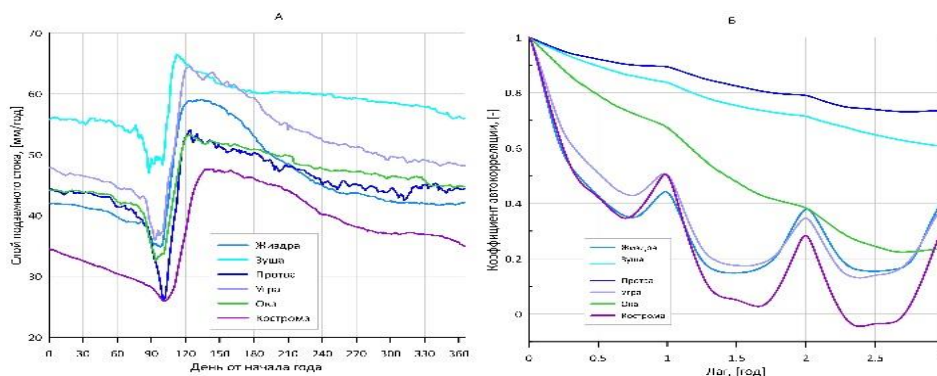


Рис. 3 А – среднемноголетняя внутригодовая динамика разгрузки подземных вод, Б – автокорреляция подземного стока.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-47-00008.

Список литературы

1. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. Изд-во МГУ, 1960. 343с.
2. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В. Ю., Гельфан А.Н, Сазонов А.А. Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: Обзор публикаций. 1 Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений. Водные ресурсы, 49(3):251–269, 2022.
3. Рец Е.П., Киреева М.Б., Самсонов Т.Е., Езерова Н.Н., Горбаренко А.В., Фролова Н.Л. Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу Б.И. Куделина grwat: проблемы и перспективы. Водные ресурсы, 49(1):27–42, 2022. DOI: 10.31857/s032105962201014x
4. Brutsaert W. Long-term groundwater storage trends estimated from streamflow records: Climatic perspective, Water Resour. Res., 44, W02409, 2008. doi:10.1029/2007WR006518.
5. Beck H. E., van Dijk A. I. J. M., Miralles D. G., de Jeu R. A. M., Bruijnzeel L. A., McVicar T. R., & Schellekens J. (2013). Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments. Water Resources Research, 49, 7843–7863. 2013 DOI:10.1002/2013WR013918
6. Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes, 19(2), 2005, 507–515.
7. Pozdniakov S.P., Ping Wang, Grinevsky S.O., Frolova N.L. A physically based model of a two-pass digital filter for separating groundwater runoff from streamflow time series. Water Resources Research, 58(3).2022 DOI: 10.1029/2021wr031333
8. Pozdniakov S. P., Shestakov V. M. Analysis of groundwater discharge with a lumped-parameter model, using a case study from Tajikistan. Hydrogeology Journal.6(2). 1998. P. 226–232.

УДК 504.06

ОБОСНОВАНИЕ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ САРБАЙСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

П.А. Рыбников*¹, Л.С. Рыбникова²

¹Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, E-mail: ribnikoff@yandex.ru

²Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, E-mail: luserib@mail.ru

Аннотация

При отработке Сарбайского месторождения подземным способом будет формироваться новая гидродинамическая ситуация в результате изменения сложившейся в настоящее время системы дренажа: может быть ликвидирована внутрикарьерная дренажная система зумпфowego водоотлива, прибортовой и подземный дренажный комплекс на севере и северо-западе карьера. Кроме того, после отключения действующих в настоящее время дренажных комплексов Южно-Сарбайского, Соколовского карьеров и Соколовского подземного рудника начнется заполнение депрессионной воронки и перераспределение балансовых составляющих водоотлива.

Отработка прибортовых и подкарьерных запасов системами с подэтажным обрушением выработанного пространства и процессы сдвижения над горными выработками приводят к изменению фильтрационных свойств вышележащей толщи пород в результате образования новых трещин, которые в подработанном массиве могут пересекать все вышележащие водоупорные слои.

Для оценки водопритоков и прогноза уровней подземных вод при отработке Сарбайского подземного рудника были рассмотрены и реализованы на прогнозной модели 3 сценария, учитывающие изменения сложившейся системы дренажа, этапность развития зон обрушения и сдвижения и соответствующие процессы формирования зоны водопроводящих трещин.

Ключевые слова: зона водопроводящих трещин, подэтажное обрушение, подземный дренажный контур

GROUNDWATER FLOW MODEL FOR DESIGN OF SARBAI ORE DEPOSIT UNDERGROUND MINE

P.A. Rybnikov*¹, L.S. Rybnikova²

¹Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation, E-mail: ribnikoff@yandex.ru

²Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation, E-mail: luserib@mail.ru

Abstract

Underground mining of the Sarbaiskoye deposit will create a new hydrodynamic situation as a result of changes in the current drainage system: the intrapit drainage system and underground drainage complex in the north and northwest of the pit can be damaged and eliminated. After the shutdown of the currently operating drainage complexes of the Yuzhno-Sarbaisky, Sokolovsky pits and the Sokolovsky underground mine, the depression cone will be filled and the balance components of the drainage will be redistributed.

Mining of marginal and under-pit reserves by systems with sublevel caving of the worked-out space lead to a change in the filtration properties of the overlying rock strata as a result of the formation of new cracks, which in the undermined massif can cross all overlying water-resistant layers.

To assess water inflows and predict groundwater levels during the development of the Sarbaisky underground mine, 3 scenarios were considered and implemented on the predictive model, taking into account changes in the existing drainage system, the stages of development of collapse and displacement zones, and the corresponding processes of formation of a zone of water-conducting cracks.

Key Words: zone of water-conducting cracks, sublevel collapse, underground drainage contour

Введение

Сарбайское железорудное месторождение, как и другие месторождения Соколовско-Сарбайского рудного узла, расположенное в северо-западной части Костанайской области Казахстана, относится к южной части Тобольского артезианского бассейна. В его строении выделяются два структурных этажа: в основании разреза залегают палеозойские и докембрийские осадочные, эффузивные и интрузивные породы; верхний этаж сложен рыхлыми песчано-глинистыми отложениями мезозоя и кайнозоя и пластами плотных трещиноватых мергелей, опок, песчаников.

В результате 50-летней работы дренажных систем Соколовского, Сарбайского и Южно-Сарбайского карьеров и Соколовского подземного рудника сформировались стационарные депрессионные воронки в меловом и палеозойском комплексах радиусом до 15–20 км [1].

В ближайшие годы планируется подземная разработка глубоких горизонтов Сарбайского месторождения за контуром и под дном карьера системами с поэтажным обрушением [2].

Задачи исследования

Для оценки водопритоков и прогноза уровней подземных вод при отработке Сарбайского подземного рудника были рассмотрены и реализованы на разработанной авторами геофильтрационной модели 3 сценария, учитывающие изменения сложившейся системы

дренажа, этапность развития зон обрушения и сдвижения, соответствующие процессы формирования зоны водопроводящих трещин (ЗВТ), отключение действующих водоотливов.

Фактический материал

Развитие горных работ на Сарбайском месторождении началось с 1957 года. Дренажная система карьера состоит из открытого водоотлива и подземного дренажного комплекса. Открытый водоотлив представляет собой систему приуступных дренажей, зумпфов водосборников и ливнесточную систему. Подземный дренажный комплекс состоит из водоотливного ствола шахты «Южная» и дренажных выработок горизонта +33 м (Рис. 1), пройденных соответственно полукольцами с северной до середины западной стороны карьера и далее до южной его части.

С начала отработки месторождения ведутся регулярные наблюдения за водопритоками и уровнями подземных вод по всем водоносным горизонтам.

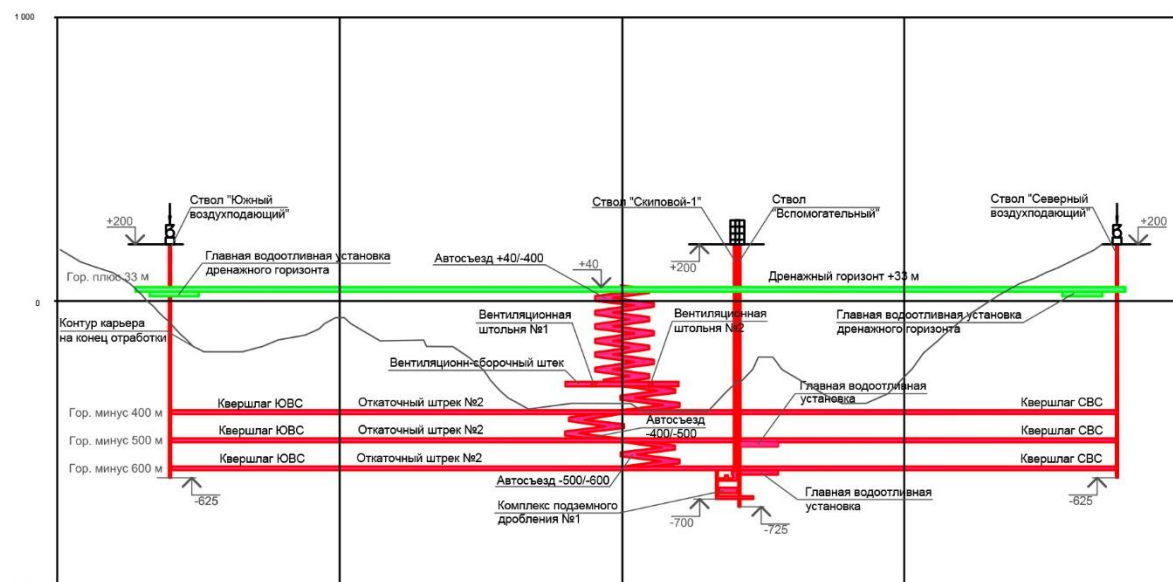


Рис. 1 Продольный разрез схемы вскрытия Сарбайского месторождения [4].

Результаты и их обсуждения

Для оценки водопротоков в Сарбайский подземный рудник было использовано математическое моделирование как метод, позволяющий учесть фильтрационную неоднородность водовмещающих пород, внутренние и внешние граничные условия, взаимовлияние объектов, находящихся в общей области формирования подземных вод. Методика моделирования соответствует принципам, изложенным в работах В.М. Шестакова, В.А. Мироненко [2; 3].

Для калибровки фильтрационных параметров и проверки физической непротиворечивости модели было выполнено решение серии обратных задач в стационарной постановке (для естественных условий и для ситуации, сложившейся на текущий момент).

Модель включает три водоносных горизонта (комплекса) и 2 разделяющие толщи: олигоценый водоносный горизонт; чеганские глины; эоцен-меловой водоносный комплекс; коры выветривания; палеозойский водоносный комплекс (Рис. 2).

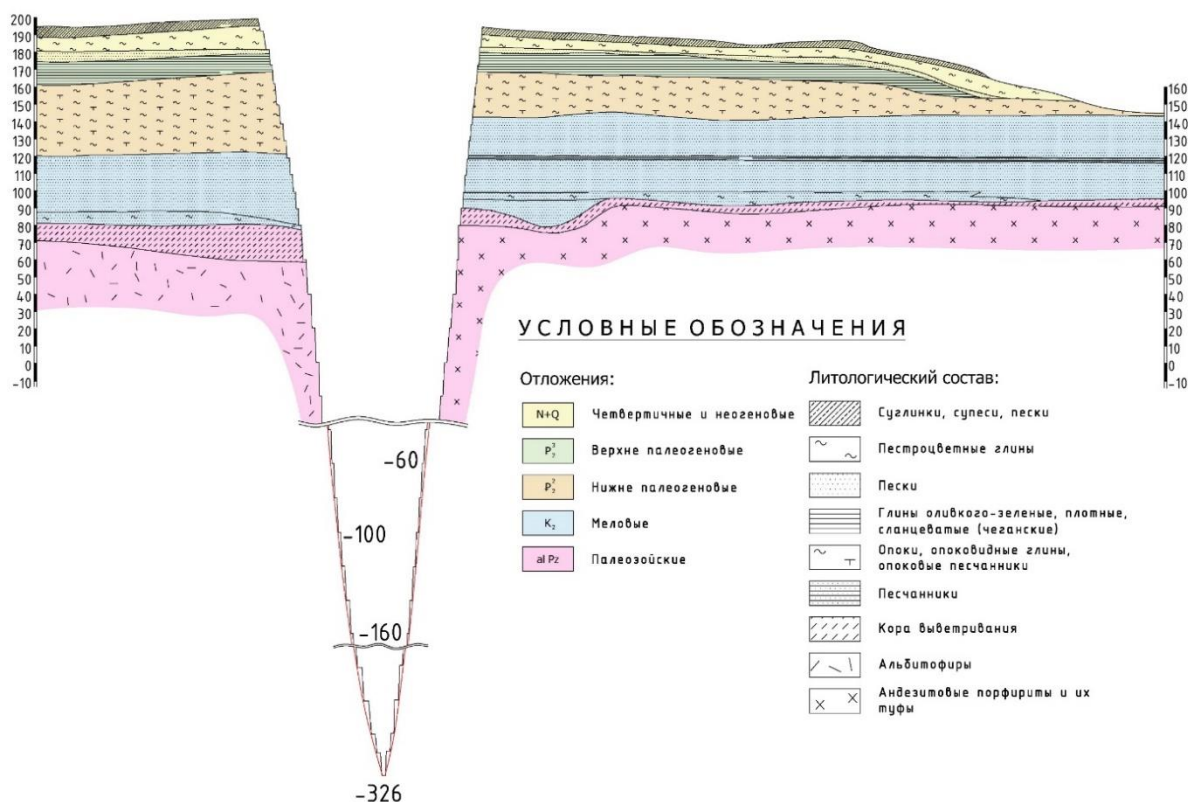


Рис. 2 Схематический гидрогеологический разрез Сарбайского месторождения [1].

При отработке Сарбайского месторождения подземным способом произойдет переформирование гидродинамической ситуации в результате изменения сложившейся в настоящее время системы дренажа: может быть ликвидирована внутрикарьерная дренажная система зумпфового водоотлива и прибортовой и подземный дренажный комплекс на севере и северо-западе карьера. Кроме того, при отключении действующих в настоящее время дренажных комплексов (Южно-Сарбайского, Соколовского карьеров и Соколовского подземного рудника) начнется заполнение депрессионной воронки и перераспределение балансовых составляющих водоотлива.

Отработка прибортовых и подкарьерных запасов железных руд будет осуществляться подземными рудниками системой с поэтажным обрушением выработанного пространства. Процессы сдвижения над горными выработками приводят к изменению фильтрационных свойств вышележащей толщи пород в результате образования новых трещин, которые в подработанном массиве могут пересекать все вышележащие водоупорные слои. В вертикальном разрезе выше «зоны обрушения» формируется «зона трещин», в которой образуются дополнительные трещины расслоения и сквозные трещины. Залегающие выше слои могут

прогибаться без разрывов, образуя «зону прогиба». Гидравлически связанные участки образуют зону водопроводящих трещин (ЗВТ) и могут приводить к прорывам воды и водопородной смеси в горные выработки.

Для оценки водопритоков и прогноза уровней подземных вод при отработке Сарбайского подземного рудника были рассмотрены и реализованы на прогнозной модели 3 сценария, учитывающие изменения сложившейся системы дренажа, этапность развития зон обрушения и сдвижения и соответствующие процессы формирования зоны водопроводящих трещин.

1-й сценарий. Образуется зона водопроводящих трещин в пределах отработанных и обрушенных блоков. Внутрикарьерная дренажная система – зумпфовой водоотлив выходит из строя в результате формирования внутреннего отвала. Прибортовой и подземный дренажные комплексы на севере и северо-востоке карьера разрушаются начиная с 4 этапа (через 17 лет после начала отработки). Дренажные системы (Южно-Сарбайского, Соколовского карьеров и Соколовского подземного рудника) эксплуатируются.

2-й сценарий. Основные позиции такие же, как в 1 сценарии. Отличие заключается в том, что сложившиеся дренажные системы (Южно-Сарбайского, Соколовского карьеров и Соколовского подземного рудника) не эксплуатируются.

3-й сценарий. Зона водопроводящих трещин не формируется в пределах отработанных и обрушенных блоков, зумпфы на дне карьера, прибортовой и подземный дренажные комплексы продолжают эксплуатироваться. Дренажные системы (Южно-Сарбайского, Соколовского карьеров и Соколовского подземного рудника) не эксплуатируются.

Анализ результатов решения нестационарных прогнозных задач показывает, что во всех рассмотренных вариантах водопритоки в процессе отработки изменяются незначительно. По сравнению с существующими в настоящее время ($1041 \text{ м}^3/\text{час}$, в том числе $688 \text{ м}^3/\text{час}$ по меловому комплексу, $308 \text{ м}^3/\text{час}$ – по палеозойскому) они увеличатся на 19%, 26% и 8% для 1-го, 2-го и 3-го сценариев, соответственно. Наиболее существенные изменения как в сторону роста общей величины водопритоков (до $1302 \text{ м}^3/\text{час}$), так и в палеозойский комплекс (до $939 \text{ м}^3/\text{час}$) произойдут в случае, если произойдут радикальные изменения гидродинамической обстановки и геофильтрационных свойств пород: будет отключен зумпфовой водоотлив, сформируется зона водопроводящих трещин, частично выйдет из строя дренажный комплекс, прекратится водоотлив на остальных объектах (2-й сценарий).

Основным фактором, определяющим условия отработки Сарбайского подземного рудника, являются геомеханические процессы, приводящие к формированию зоны водопроводящих трещин. Величина остаточных напоров в меловом комплексе зависит от условий формирования ЗВТ: они могут незначительно возрасти в случае ее отсутствия, либо снизиться (на 3 – 7 м) при ее формировании.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2. Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002) г. р. № 123012300006-0.

Список литературы

1. Веселов В.В., Махмутов Т.Т., Едигенов М.Б. и др. Гидрогеология и охрана окружающей среды горнорудных районов Северного Казахстана / М.: Недра, 1992. 270 с.
2. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации / М.:Недра. 1976. 407 с.
3. МIRONENKO В.А., МоЛЬский Е.В., РуМЫНИН В.Г. Горнопромышленная гидрогеология / М.: Недра, 1989. 287 с.
4. Сашурин А.Д., Соколов И.В. Технологические регламенты для проекта «Строительство Сарбайского подземного рудника. Вскрытие и отработка подкарьерных запасов Сарбайского месторождения железных руд» / Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2012

УДК 556.3

ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРИБРЕЖНОЙ ЧАСТИ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА

С.Н. Тагильцев*¹, С.В. Сурганов¹, В.С. Тагильцев¹, А.А. Куриченко¹

¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, tagiltsev@k66.ru

Аннотация

В прибрежной части Юго-Западного Крыма основным гидрогеологическим объектом является Альминское месторождение подземных вод. Основные водоносные горизонты представлены известняками неогенового возраста. Для оценки запасов подземных вод существующих и перспективных водозаборов следует иметь оценку ресурсного потенциала водоносных горизонтов в целом и на конкретных участках; улучшить методику подсчёта запасов для одиночных скважин и водозаборов; количественно оценивать влияние моря как источника загрязнения подземных вод.

На основании карты подземного стока, гидрологических характеристик основных рек и климатических данных выполнена оценка ресурсов подземных вод балансовым методом. Выявлено, что ресурсы подземных вод определяются близостью к горной части территории, и оцениваются значением в 220 тыс. м³/сутки. Опираясь на достоверные значения гидродинамических характеристик пластов по отдельным водозаборным скважинам, выполнена примерная оценка ресурсов подземных вод гидродинамическим методом. Расчёты показали, что поток подземных вод в прибрежной зоне можно ориентировочно оценить величиной в 260 тысяч м³/сутки. Оценка ресурсов подземных вод юго-западного Крыма, выполненная балансовым и гидродинамическим методами, показывает, что ресурсы подземных вод достаточно велики. Поток подземных вод используется для водоснабжения в относительно небольших количествах, и в основном, разгружается в море. Основной водоносный горизонт имеет с морем хорошую гидравлическую связь. При эксплуатации прибрежных водозаборов может происходить подтягивание к водозаборным скважинам морской воды.

Ключевые слова: Ресурсы подземных вод, Юго-Западный Крым, балансовый метод, подземные водохранилища, гидрогеодинамические характеристики, взаимосвязь с морем, зоны санитарной охраны.

ASSESSMENT OF GROUNDWATER RESOURCES IN THE COASTAL PART OF THE SOUTHWESTERN CRIME

S.N. Tagiltsev*¹, S.V. Surganov¹, V.S. Tagiltsev¹, A.A. Kurichenko¹

¹Ural State Mining University, Russian Federation, Yekaterinburg. E-mail: tagiltsev@k66.ru

Abstract

In the coastal part of the Southwestern Crimea, the main hydrogeological object is the Alminsky groundwater deposit. The main aquifers are represented by limestone of Neogene age. To assess groundwater reserves of existing and prospective water intakes, it is necessary to have an assessment of the resource potential of aquifers in general and in specific areas; improve the methodology for calculating reserves for single wells and water intakes; quantify the impact of the sea as a source of groundwater pollution.

Based on the underground runoff map, hydrological characteristics of the main rivers and climatic data, the assessment of groundwater resources by the balance method was carried out. It was revealed that groundwater resources are determined by proximity to the mountainous part of the territory, and are estimated at 220 thousand m³/day. Based on reliable values of hydrodynamic characteristics of formations for individual water intake wells, an approximate assessment of groundwater resources by the hydrodynamic method was performed. Calculations have shown that the flow of groundwater in the coastal zone can be estimated approximately at 260 thousand m³/day. The assessment of the groundwater resources of the south-western Crimea, performed by balance and hydrodynamic methods, shows that the groundwater resources are quite large. The groundwater flow is used for water supply in relatively small quantities, and is mainly discharged into the sea. The main aquifer has a good hydraulic connection with the sea. During the operation of coastal water intakes, seawater may be pulled up to the water intake wells.

Key Words: Groundwater resources, South-Western Crimea, balance method, underground reservoirs, hydrogeodynamic characteristics, relationship with the sea, sanitary protection zones.

Введение

В прибрежной части юго-западного Крыма существенную роль в питьевом водоснабжении населения имеют подземные воды Альминского артезианским бассейна [1]. Западная часть этого артезианского бассейна рассматривается как Альминское месторождение подземных вод, которое занимает территорию от г. Евпатория на севере до г. Севастополя на юге, и по широте – от побережья Чёрного моря до г. Симферополя. Вблизи побережья Чёрного моря располагаются несколько водозаборных участков, которые эксплуатируют основные водоносные горизонты артезианского бассейна. Для существующих водозаборов следует определить три основные проблемы, определяющие трудности с подсчётом запасов подземных вод: оценка ресурсного потенциала водоносных горизонтов в целом и на конкретных участках; подсчёт запасов для одиночных скважин и для групп скважин (водозаборов); влияние моря как источника загрязнения подземных вод.

Методы исследований

В соответствии с картой подземного стока СССР [2] (фрагмент «Крым»), в рассматриваемом районе ресурсы подземных вод, увязываются, в основном, с речным стоком, и составляют 30-40%, от общего речного стока. Основные реки данной территории: Чёрная, Бельбек, Кача, Альма. По ориентировке русел рек хорошо просматривается поверхностный водораздел, который отделяет водосборные площади рек Юго-Западного Крыма от рек, текущих в северо-восточном направлении. Можно полагать, что поверхностные и подземные водосборные территории, в основном, совпадают.

Для основных водоносных комплексов условия питания наиболее благоприятны в тех районах, где берут начало и обеспечиваются питанием реки юго-западного Крыма [3; 4]. Здесь широко развиты пористые известняки неогенового возраста (повсеместно закарстованные), которые непосредственно выходят на поверхность, либо перекрыты маломощным слоем четвертичных суглинков. Все это способствует инфильтрации атмосферных осадков.

В районе Крымских гор и северо-западных предгорий источники питания (осадки) достаточно обильные. Средняя годовая сумма осадков составляет 400 – 800 мм, достигая 900 - 1000 мм [5]. Высокая водопроницаемость пород, слагающих зону аэрации (известняков, песков, песчано-галечных отложений) создает благоприятную обстановку для формирования подземных вод. Размеры бассейнов и водность основных рек представлена в справочных источниках (Табл. 1) [6].

Табл. 1 Размеры и водность рек юго-западного Крыма.

Реки	Длина, км	Площадь бассейна, км ²	Среднегодовой расход, м ³ /с	Объём стока млн. м ³
Альма	84	635	1,21	38,3
Кача	69	573	1,69	53,0
Бельбек	63	505	2,75	66,1
Чёрная	41	436	1,94	75,3

Результаты и их обсуждения

Для основных рек юго-западного Крыма (Альма, Кача, Бельбек, Чёрная) рассчитан слой поверхностного стока (Табл. 2). Очевидно, что слой стока определяется близостью к горной части территории. Слой стока по бассейну р. Чёрной в три раза больше, чем в бассейне р. Альмы. Соответственно, опираясь на сведения, представленные на карте подземного стока [2] и приведённые в табл. 1, можно рассчитать модуль подземного стока и оценить подземный сток с водосборных площадей рассматриваемых рек, и высчитать величину подземного стока в целом

по Юго-Западному Крыму (Табл. 2). Расчёты показали, что подземный сток составляет довольно существенную величину, и оценивается значением в 220 тыс. м³/сутки.

Табл. 2 Поверхностный и подземный сток. Бассейны рек юго-западного Крыма.

Реки	Слой поверх. стока, мм	Слой осадков, мм	Модуль поверх. стока, л/с · км ²	Модуль подземного стока, л/с · км ²	Подземный сток, тыс. м ³ /сутки
Альма	60	600	1,9	0,7	36,5
Кача	93	600	2,9	1,0	49,5
Бельбек	131	600	4,2	1,5	65,4
Чёрная	173	600	5,5	1,9	71,6
Сумма					223

Принимая для бассейнов всех рек примерно одинаковое значение среднего слоя осадков, можно оценить основные составляющие водного баланса (Табл. 2). Расчёты показывают, что на рассматриваемой территории основная расходная часть водного баланса связана с испарением. Можно сделать вывод, что создание поверхностных водохранилищ не является самым оптимальным способом сохранения запасов воды, и следует рассмотреть возможность создания подземных водохранилищ. Учитывая благоприятные геологические условия, следует считать, что искусственное повышение подземного стока можно рассматривать как перспективное направление гидрогеологических исследований.

Оценка ресурсов подземных вод на основе балансовых расчётов имеет важное значение, но отличается не очень высокой точностью в связи с неопределённостью значений исходных расчётных параметров. Практическое значение при подсчёте запасов подземных вод имеют данные по конкретным водозаборным участкам. В качестве представительных объектов можно рассматривать данные по скважинам Андреевского и Любимовского водозаборов [7; 8]. Скважины этих водозаборов эксплуатируют водоносный горизонт сарматских отложений неогена. Водоносный горизонт слагают трещиноватые и закарстованные известняки. Мощность водоносного горизонта, вскрытая скважинами, составляет от 45 до 107 м. Водоупорной толщей, которая является подошвой водоносного горизонта, служат глины нижнего сармата.

Кровля водоносного горизонта находится на глубине от 72 до 120 м. Отложения, перекрывающие водоносный горизонт, представлены глинистыми образованиями с выраженными водоупорными свойствами. Хорошая гидравлическая связь основного водоносного горизонта с другими водоносными прослоями и грунтовыми водами на территории водозаборных участков отсутствует. Следует полагать, что существенного влияния процесс перетекания из вышележащих отложений на формирование ресурсов подземных вод непосредственно на Андреевском и Любимовском участках иметь не будет.

Статический уровень водоносного горизонта находится на глубине от 27 м (скв. 5575) до 75 м (скв. 5583). Напор над кровлей водоносного горизонта составляет от 37 м до 90 м. Сарматский водоносный горизонт, на территории водозаборных участков, представляет собой типичный напорный изолированный пласт. Неогеновые отложения выходят на поверхность земли в районах предгорий. В основных реках юго-западного Крыма, при пересечении неогеновых отложений фиксируются значительные потери стока [3; 4], которые несомненно формируют ресурсы подземных вод.

Исследования, выполненные в скважинах Андреевского и Любимовского водозаборов, позволили достоверно рассчитать значения основных гидродинамических характеристик сарматского водоносного горизонта [7; 8]. Эти данные позволяют выполнить оценку ресурсов подземных вод на основании гидродинамического метода. По абсолютным отметкам уровня воды в скважинах построена схема гидроизопьез сарматского водоносного горизонта в приморской части. Схема показывает, что разгрузка водоносного горизонта происходит в море. Градиент напорного потока подземных вод составляет 0,0012. Аналогичная схема гидроизопьез, построенная для Любимовского участка, показывает градиент потока равный 0,0034.

Водоносный горизонт сарматских известняков отличается значительной неоднородностью (Табл. 3), поэтому оценка расхода подземного потока по усреднённым показателям носит приблизительный характер. Более надёжные результаты можно получить, оценивая расход ленты тока, примыкающей к конкретной скважине. Расчёты показывают (Табл. 3), что единичные расходы (расходы ленты тока шириной 1 м), различаются более чем на порядок, и варьируют от 1 до 14 м²/сутки. Длина береговой линии в рассматриваемом районе составляет от р. Чёрной до р. Альмы примерно 60 км. Разгрузка подземных вод в море на данном участке может составлять от десятков тысяч до первых сотен тысяч м³/сутки. Если принять средний расход подземного потока равным единичному расходу вблизи скважины 5583 (Табл. 3), то поток подземных вод в прибрежной зоне можно оценить величиной в 260 тысяч м³/сутки.

Табл. 3 Оценка ресурсов подземных вод гидродинамическим методом.

Водозабор	Скважина	Водопроводимость, м ² /сутки	Градиент	Единичный расход, м ² /сутки
Андреевский	5576	878	0,0012	1,05
Андреевский	5583	3644	0,0012	4,40
Любимовский	5753	3970	0,0034	13,5

Заключение

Оценка ресурсов подземных вод сарматского водоносного комплекса, выполненная балансовым и гидродинамическим методами, показывает, что ресурсы подземных вод

достаточно велики, и составляют, по разным методам оценки, в среднем, от 220 до 260 тыс. м³/сутки. Поток подземных вод используется для водоснабжения в относительно небольших количествах, и в основном, разгружается в море.

Гидрогеодинамический разрез, построенный на основании схемы гидроизопьез позволил заключить, что при разгрузке подземного потока в море не наблюдается существенного фильтрационного сопротивления ложа водоёма (моря). Напорный уровень подземных вод приходит практически на урез водоёма. Следует полагать, что водоносный пласт имеет с морем хорошую гидравлическую связь. При эксплуатации водоносного горизонта необходимо учитывать, что может происходить подтягивание к водозаборным скважинам морской воды.

Для оценки эксплуатационных запасов по конкретным водозаборным скважинам, в рассматриваемых гидрогеологических условиях, необходимо грамотно выполнять опытно-фильтрационные работы. Помимо оценки запасов, данные откачек должны обеспечивать выполнение расчётов по вероятности подтягивания морской воды. Методика расчёта зон санитарной охраны по конкретным водозаборах рассматривается в работах [7-10]. К сожалению, неправильная оценка эксплуатационных запасов и ошибки в расчётах зон санитарной охраны уже приводили к закрытию водозаборов.

Список литературы

1. Гидрогеология СССР. Том VIII. Крым /Ред. В.Г. Ткачук. М.: Недра, 1970. 365 с.
2. Карта подземного стока СССР в процентах от общего речного стока и коэффициентов подземного стока в процентах от осадков. Масштаб 1: 5000000. 1964 г.
3. Поздняков С.П. и др. Предварительные результаты гидролого-гидрохимических исследований взаимосвязи поверхностных и подземных вод в Юго-Западном Крыму //Геология и водные ресурсы Крыма. Полевые практики в системе Высшего образования. Материалы конференции. / Под ред. В.В. Аркадьева. С.-Петербург: изд-во ЛЕМА, 2022. С. 35 – 39.
4. Каюкова Е.П. О формировании природных вод в предгорьях Крыма //Геология и водные ресурсы Крыма. Полевые практики в системе Высшего образования. Материалы конференции. / Под ред. В.В. Аркадьева. С.-Петербург: изд-во ЛЕМА, 2022. С. 54 – 56.
5. Ведь И.П. Климатический атлас Крыма. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
6. Богуцкая Е.М., Косицкий А.Г., Айбулатов Д.Н., Гречушникова М.Г. Средний многолетний сток рек юго-западной части Крымского полуострова //Водное хозяйство России. 2020 № 2. С. 37–51.
7. Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Сурганов С.В., Куриченко А.А. Использование гидродинамических характеристик потока подземных вод для обработки данных одиночных откачек. // 17-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика 2021» – Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2021 г.
8. Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Куриченко А.А., Сурганов С.В. Определение гидродинамических параметров водоносных пластов по данным одиночных опробований. // Сборник научных трудов III научно-практической конференции по вопросам гидрогеологии и водообеспечения. – Ижевск, «МарШак», 2021. С. 63-70.

9. Орадовская А.Е., Лапшин Н.Н. Санитарная охрана водозаборов подземных вод. – М.: Недра, 1987 – 167 с.
10. Поздняков С.П., Сизов Н.Е., Лёхов В.А. Размер зоны санитарной охраны водозаборной скважины в слоисто-неоднородном пласте. – Инженерная геология. Том XIV, №2/2019. С.74 – 81.

УДК 556.38

ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ СРЕДНЕМАСШТАБНОМ КАРТИРОВАНИИ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ УРАЛЬСКОЙ СГСО И ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО САБ

Е.Р. Черепанова*¹, Е.П. Жуковская¹

¹Филиал «Уральский региональный центр ГМСН» ФГБУ «Гидроспецгеология», Екатеринбург, Россия, E-mail: cherepanova@gmsn-ural.ru

Аннотация

Освещён опыт картирования прогнозных ресурсов подземных вод при проведении среднемасштабной (1:200 000) гидрогеологической съёмки листа N-41-VIII (Челябинск) в сложных геолого-гидрогеологических условиях территории в зоне сочленения гидрогеологических структур I порядка – Уральской сложной гидрогеологической складчатой области и Западно-Сибирского сложного артезианского бассейна, осложнённой тектонической структурой Челябинского грабена.

Ключевые слова: прогнозные ресурсы, подземные воды, водоносный горизонт, Челябинский грабен, гидродинамическая модель

PREDICTION OF GROUNDWATER RESOURCES IN MEDIUM- SCALE MAPPING OF THE JUNCTION ZONE OF THE URAL CHFA AND THE WEST SIBERIAN CAB

E.R. Cherepanova*¹, E.P. Zhukovskaya¹

¹FBGU "Hydrospetsgeology". Branch of the Ural Regional Center of the State Mining Inspectorate, Yekaterinburg, Russian Federation, E-mail: cherepanova@gmsn-ural.ru

Abstract

The article considers the experience of mapping predicted groundwater with a significant medium-scale (1:200 000) hydrogeological survey of sheet N-41-VIII (Chelyabinsk) in difficult geological and hydrogeological conditions of the territory in observations of the junction of the first order hydrogeological structure - the Ural complex hydrogeological folded area and West Siberian complex artesian basin, complicated by the tectonic structure of the Chelyabinsk graben

Key Words: forecast resources, groundwater, aquifer, Chelyabinsk graben, hydrodynamic model

Введение

Региональные гидрогеологические съёмочные работы нацелены на оценку прогнозных ресурсов подземных вод территории и выявление перспектив их использования. Результатом

комплексного анализа природных и техногенных условий территории, материалов ранее выполненных геологоразведочных работ, сведений по месторождениям и водозаборам подземных вод явился комплект карт гидрогеологического содержания. Составлены карта прогнозных ресурсов подземных вод категории P_2 в комплекте со схемами ресурсного потенциала площади, использования подземных вод и карта перспективных участков для постановки поисковых работ.

Особенности гидрогеологических условий изучаемой территории

Территория листа N-41-VIII (Челябинск) приурочена к зоне сочленения двух гидрогеологических структур I порядка: Уральской сложной гидрогеологической складчатой области (СГСО) с трещинным и трещинно-карстовым типом скопления подземных вод (ПВ) и Западно-Сибирского сложного артезианского бассейна (САБ) с пластовым строением перемежающихся водоносных, относительно водоупорных и водоупорных горизонтов. Зона сочленения структур I порядка контролируется главным субмеридианальным Челябинским разломом и трассируется по контуру сплошного распространения меловых и палеогеновых отложений, перекрывающих кристаллические породы палеозойского фундамента.

По климатическим условиям территория относится к зоне недостаточного увлажнения, количество осадков сокращается в юго-восточном направлении от 423 мм в районе г. Челябинска до 350 мм в степной зоне на юго-востоке. Величина испарения с суши в годы средней водности достигает 50-60 %. Дефицит инфильтрационного питания обуславливает слабое развитие речной сети. Часть водотоков – р. Еманжелинка, Чумляк теряют свой сток при выходе с горноскладчатой части Урала. Территория г. Челябинска и Копейска характеризуется напряжённой водохозяйственной и экологической обстановками.

В Уральской СГСО основное площадное распространение имеет палеозойская водоносная зона трещиноватости, приуроченная к разнообразным петрографическим типам пород (интрузивные, вулканогенные). Основные ресурсы подземных вод заключены в палеозойской водоносной карстовой зоне, представленной Сухарышской и Шеинской карбонатными структурами. Химический тип пресных подземных вод преимущественно гидрокарбонатный, реже сульфатно-гидрокарбонатный. Специфика региона – повышенные концентрации радона (до 860 Бк/дм³) и значения альфа-активности (преимущественно ниже ПДК) на площади развития гранитоидов Челябинского плутона в северной части листа. Для карбонатных структур характерно развитие сульфатно-гидрокарбонатных вод с повышенной жесткостью, часто выше нормы для питьевых вод.

На площади Западно-Сибирского САБ мощности и водообильность основных водоносных горизонтов (ВГ) – танетского и коньяк-кампанского в условиях резкой изменчивости условий осадконакопления неравномерная. Увеличение мощности мезозойско-

кайнозойского осадочного чехла прослеживается в восточном направлении к востоку от Челябинского грабена в связи с резким погружением палеозойского фундамента. Строение осадочного чехла нарушается в зоне Челябинского угленосного грабена, в пределах которого мощность основных водоносных горизонтов минимальна.

Промышленное значение эти горизонты имеют в узкой полосе вдоль восточного контура Челябинского грабена, где палеогеновые и меловые осадки образуют единый коньяк-танетский ВГ. Здесь разведаны основные месторождения ПВ – Восточный Мел I, II, Родниковское. Специфика химического состава ПВ – повышенное содержание железа, марганца и жёсткости.

В восточной части листа по линии озёр Мал. Сарыкуль – Курлады, где водоносные горизонты разделяются кампан-танетским водоупором, их значимость для целей водоснабжения практически утрачивается. Слабая обводнённость танетского ВГ подтверждена результатами бурения и опробования скважины в пос. Березово (мощность 3-5 м, минерализация 1,1 г/дм³). Меловые осадки из-за глубокого залегания (более 60 м) содержат слабосоленоватые воды (до 2 г/дм³). Подстилающие их палеозойские трещинные зоны содержат солоноватые воды с минерализацией более 10 г/дм³.

Особое значение для промышленной добычи ПВ в краевой пограничной зоне Западно-Сибирского САБ имеют карбонатные структуры, погребённые в отличие от Уральской СГСО под отложения мезозойско-кайнозойского чехла. Разведанное в 60-х годах в долине р. Миасс Сугоякское МПВ эксплуатируется до настоящего времени для водоснабжения отдельных районов и предприятий Челябинска.

Результаты оценки прогнозных ресурсов

В крайне сложных геолого-гидрогеологических условиях распределения по площади ресурсов подземных вод задача оценки ресурсного потенциала решалась комплексом методов. На площади Уральской СГСО, где развита речная сеть (на севере – р. Миасс с притоками, на юге – притоки р. Увелька), задача решена традиционным гидрометрическим методом. По выполненным в летнюю межень замерам поверхностного стока рек Зюзелга, Биргильда, приведённым к среднесуточным минимальным 30-суточным расходам рек-аналогов (Миасс-Аргазинское водохранилище), получены модули естественных ресурсов в градациях 0,3-0,5 и 0,5-1,0 дм³/с·км². Эти данные согласуются с ранее выполненными оценками для горноскладчатого Урала [1]. На площади Сухарышской, Шеинской карбонатных структур в качестве меры ресурсной оценки использован эксплуатационный модуль Сухарышского МПВ 1,5 дм³/с·км², установленный инструментально по величине сокращения стока р. Сухарыш при пересечении полосы известняков в створе предполагаемого водозаборного узла. Эта величина использована предшественниками при оценке обеспеченности эксплуатационными ресурсами

питьевых подземных вод [3;5] и принята при составлении карты ресурсного потенциала Российской Федерации.

Ресурсный потенциал Уральской СГСО оценён суммарно в количестве 118 тыс. м³/сут. Прогнозные ресурсы категории Р₂ получены за вычетом числящихся на этой площади запасов подземных вод (45 тыс. м³/сут) и исключения площадей особо охраняемых природных территорий (ООПТ) (Харлушевский заповедник, Каштакский бор) и составили 73 тыс. м³/сут.

Освоение прогнозных ресурсов на площади Уральской СГСО сдерживается интенсивной разработкой недр при добыче твёрдых полезных ископаемых (Березняковский, Томинский ГОК, Первомайский карьер известняков). Возможности наращивания эксплуатационного водоотбора Сухарышской структуры практически исчерпаны. Определёнными перспективами обладает территория в юго-западной части листа и сопряжённая с ней площадь смежного листа. По оптимистической оценке, прогнозные ресурсы Таяндинского перспективного участка (площадь до 100 км², модуль 1,5 дм³/с·км²) могут достигать 12,9 тыс. м³/сут. Эта величина требует заверки постановкой поисково-оценочных работ на подземные воды.

На площади Западно-Сибирского САБ выполнено районирование территории по условиям питания и формирования ресурсов основных ВГ (Рис. 1). Выделена восточная область к востоку от линии озёр Мал. Сарыкуль – Курлады, где первый от поверхности танетский горизонт залегает на глубине 50 м и перекрывается ипрско-приабонским относительно водоупорным горизонтом. Согласно методике [6], прогнозные ресурсы определены с учётом перетекания из вышележащего рюпель-серравальского горизонта и коэффициента использования подземных вод. По результатам обработки откачки из скважины 1 (Березово) получен фактор перетекания 59,2 м и коэффициент фильтрации перекрывающей толщи диатомитов – $1,7 \cdot 10^{-3}$ м/сут, что характеризует ирбитскую свиту как слабопроницаемую. Полученный модуль перетекания 0,23 дм³/с·км² принят в качестве меры питания танетского горизонта. Эта величина согласуется с ранее выполненными оценками [2; 7] от 0,1 до 0,5 дм³/с·км².

На площади восточной области 1282 км² на междуречье Миасс – Увелька ресурсный потенциал оценён в количестве 25,5 тыс. м³/сут. Прогнозные ресурсы этой площади за вычетом запасов подземных вод (3 тыс. м³/сут) и исключения площадей ООПТ (66 км²) составили всего 21 тыс. м³/сут. Гидрогеологические условия территории неблагоприятны для выделения поисковых участков на подземные воды для их промышленного освоения.

Практическое использование танетского горизонта возможно только на отдельных участках совместного залегания с коньяк-кампанским ВГ в зоне «припалеозойской депрессии» между Уральской СГСО и Челябинским грабеном и в узкой полосе к востоку от него. В условиях резкой литолого-фациальной изменчивости разреза, зональности распределения водопроводимости объединённого коньяк-танетского ВГ от 5 до 80 м²/сут и резкого снижения

фильтрационных параметров в заглинизированных опоках и песчаниках за пределами локальных обводненных участков задача площадного определения интенсивности инфильтрационного питания весьма сложная.

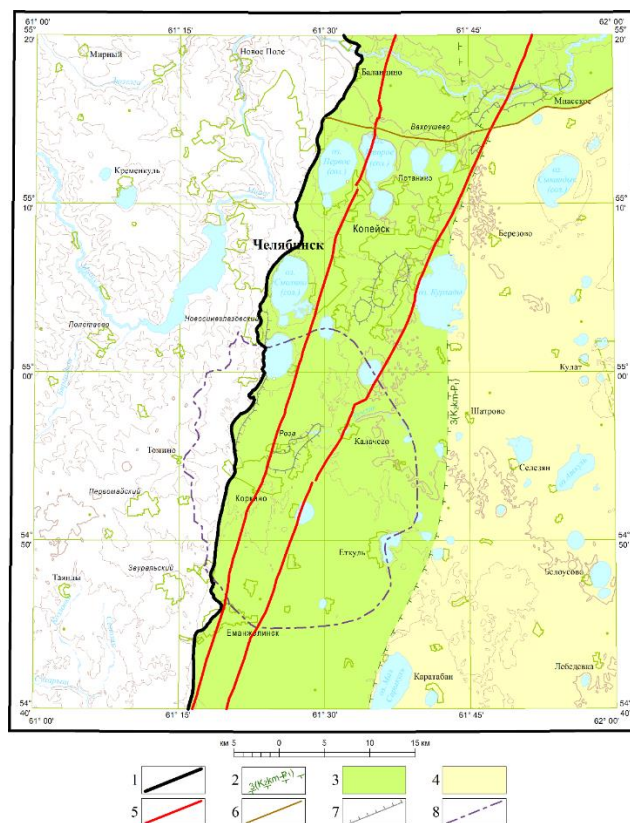


Рис. 1 Схема районирования Западно-Сибирского САБ по условиям оценки ресурсного потенциала подземных вод продуктивных водоносных подразделений в границах листа N-41-VIII (Челябинск).

1 – граница гидрогеологических структур I порядка: Уральской СГСО и Западно-Сибирского САБ; 2 – контур сплошного распространения кампан-танетского водоупорного горизонта; 3 – площадь распространения коньяк-танетского водоносного горизонта в центральной части листа и танетского горизонта в северо-восточной части листа в долине р. Миасс с модулем ресурсного потенциала в градации $0,3-0,5 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$; 4 – площадь распространения разобщенного положения танетского и коньяк-кампанского водоносных горизонтов в восточной и юго-восточной частях листа с модулем ресурсного потенциала в градации $0,1-0,3 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$; 5 – граница Челябинского угленосного грабена; 6 – граница долины р. Миасс; 7 – контур отсутствия танетского водоносного горизонта; 8 – контур гидродинамической математической модели в районе Коркинского карьера

Более надёжные результаты обеспечивают результаты математического моделирования, учитывающие многофакторность геолого-гидрогеологических и климатических условий формирования подземного стока. На основе математической геофильтрационной модели, разработанной ООО «НПФ ММПИ» [4] при обосновании ликвидации Коркинского угольного разреза, были получены необходимые параметры инфильтрационного питания. Модельная область (площадь более 650 км^2) охватывала зоны сочленения гидрогеологических структур

и прилегающую территорию. Величина инфильтрационного питания модельной области Коркинского разреза выражена средним модулем $0,42 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$.

Сопоставимый по величине эксплуатационный модуль – $0,5 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$ получен на Южно-Сутоякском участке на левобережье р. Миасс по коньяк-танетскому ВГ. Эти значения принадлежат к единой градации $0,3\text{-}0,5 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$ и были приняты для оценки прогнозных ресурсов подземных вод на площади 1611 км^2 в центральной части листа вдоль восточного контура Челябинского грабена и в зоне «припалеозойской депрессии» между Уральской СГСО и Западно-Копейским разломом. С учётом исключения величины запасов на этой территории по 22 МПВ ($18 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$) и площадей ООПТ прогнозные ресурсы составили $39 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$.

Практическое освоение ресурсного потенциала подземных вод в переходной зоне Западно-Сибирского САБ и Уральской СГСО существенно осложнено горнотехническими условиями, сложившимися в результате многолетней угледобычи, прекращённой в 2010 году на всей площади Челябинского угольного бассейна (ЧУБ). Неотработанные запасы бурого угля ЧУБ оставлены на государственном балансе и могут быть востребованы в отдалённом будущем. Подземные горные выработки затапливаются подземными водами, процесс восстановления уровня не завершён. На большей части территории Челябинского грабена с незначительной мощностью водоносных горизонтов и ожидаемого негативного воздействия шахтных вод на качество подземных вод сооружение производительных питьевых водозаборов практически исключено. Вся территория Челябинского грабена не перспективна для поисков питьевых подземных вод. Однако, на отдельных участках с благоприятными условиями по мощности водоносных подразделений эксплуатируются десятки мелких водозаборов для технического водоснабжения предприятий. Такие локальные участки в основном приурочены к «припалеозойской депрессии» вдоль западного борта Челябинского грабена.

Заключение

Оценка прогнозных ресурсов в ходе гидрогеологического доизучения масштаба 1:200 000 листа N-41-VIII (Челябинск) выполнена по гидрогеологическим структурам первого порядка и отражает сложные природные условия формирования ресурсного потенциала и ограниченность ресурсов подземных вод, особенно в восточной части территории. Полученные данные не противоречат результатам ранее выполненных региональных оценок, но уточняют параметры питания по отдельным районам и бассейнам рек.

Список литературы

1. Аношина В.И., Веретенникова А.С. Региональная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод горноскладчатого Урала (Отчет Тематической партии о результатах поисковых работ на подземные воды за 1982 – 1987 годы). 1987 г. 441 с.

2. Боровский Б.В., Хачиян Т.П., Язвин А.Л. Оценка ресурсного потенциала для питьевого водоснабжения населения и обеспечения водой объектов промышленности на территории Российской Федерации. ЗАО «ГИДЭК, Москва, 2011 г.
3. Борисов В.Б., Майер А.А., и др. Отчёт о результатах работ по объекту: «Инженерно-геологическая с гидрогеологическим доизучением съёмка масштаба 1:200 000. Листы N-41-II, VIII» (в 4 книгах и 1 папке). ФГУП «Челябинскгеосъёмка», Челябинск, 2001 г.
4. Вишняк А.И. Отчёт по научно-исследовательской работе "Анализ существующих гидрогеологических условий подземных вод и оценка изменения гидрогеологических условий при ликвидации отработанной выработки угольного разреза "Коркинский". АО "Томинский ГОК", ООО НПФ "ММПИ", г. Екатеринбург, 2017 г.
5. Воронов С.Г. Отчёт по теме «Оценка обеспеченности населения Челябинской области ресурсами подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения (второй этап). Копейск, 2000 г.
6. Рекомендации по оценке прогнозных ресурсов категорий Р2 и Р3 питьевых, технических и минеральных подземных вод, выявленных в ходе регионального гидрогеологического изучения территории Российской Федерации и требования к порядку их учета и апробации. М.: ФГУП «ВСЕГИНГЕО», 2014 г.
7. Скалин А.В., Докина Л.Г., Новикова Н.В. Региональная оценка эксплуатационных запасов подземных вод Тобольского артезианского бассейна. (Отчет ТП по поисковым работам за 1983-1987 гг.). 1987 г.

УДК 556.3

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РОДНИКОВОГО СТОКА В ТРЕЩИННО-КАРСТОВОМ БАСЕЙНЕ НА ПРИМЕРЕ ВЕРХОВЬЕВ Р. ЧЕРНАЯ

И.А. Чиганов*¹, В.А. Бакшевская², С.П. Поздняков³

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: ilya-chiganov@mail.ru

²Институт Водных Проблем РАН, г. Москва, Россия, E-mail: bakshev@mail.ru

³Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: sppozd@mail.ru

Аннотация

Разработана концептуальная модель осадки-сток формирования подземного стока карстового массива. Для рядов суточного разрешения наблюдений за расходом реки Черная на гидропосте в с. Родниковское и данных метеостанции Ай-Петри модель откалибрована на примере представительного 34 летнего ряда наблюдений. Модель может быть использована для прогноза изменения карстового стока с использованием даунскейлинга глобальных климатических моделей.

Ключевые слова: карстовый массив, поверхностный сток, подземный сток, моделирование

MODEL OF SPRING FLOW FORMATION IN THE FRACTURE-KARST BASIN BY THE EXAMPLE OF THE UPPER CHERNAYA RIVER

I.A. Chiganov*¹, V.A. Bakshevskaya², S.P. Pozdnyakov³

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: ilya-chiganov@mail.ru

²Water Problem Institute, RAS, Moscow, Russian Federation, E-mail: bakshev@mail.ru

³Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: sppozd@mail.ru

Abstract

A conceptual model of precipitation-runoff formation of the karst massif groundwater flow was developed. The model was calibrated for the series of daily resolution observations of the flow of the Chernaya River at the gauging station "Rodnikovskoye" and data from the Ai-Petri weather station using a representative 34-year observation series as an example. The model can be used to predicting changes in karst flow using downscaling of global climate models.

Key Words: karst massif, surface runoff, groundwater runoff, simulation

Введение

Формирование и изменчивость подземного стока карстовых массивов – предмет многочисленных научных исследований, как с позиций описания этой изменчивости, так и построения прогнозных моделей стока. Количественные модели, связывающие режимообразующие факторы и подземный сток карстовых массивов, важны в том числе и в связи с климатическими изменениями, происходящими в настоящее время. Эти модели могли бы быть использованы для ответа на вопрос, каким образом можно результаты даунскейлинга климатических прогнозов для того или иного сценария использовать для прогноза изменения карстового стока. Целью настоящей работы является построение и верификация модели стока карстового массива на примере крупного родника (источник Скельский), дренирующего карстовое плато Ай-Петри в юго-западном Крыму [3; 4]. При построении модели предполагалось, что она будет использоваться не для календарных прогнозов, а для оценки влияния климатических изменений на сток. Для достижения этой цели в качестве исходных данных использовались временные ряды суточного разрешения наблюдений за расходом реки Черная на гидропосте в с.Родниковское за 1947-1981 гг. и ряды осадков и температур по ближайшей к нему метеостанции Ай-Петри. Выбор указанного гидропоста связан с тем, что р.Черная в районе с.Родниковское на 93% формируется за счет разгрузки трещинно-карстовых вод в Скельский источник и на 7% - за счет поверхностного стока [1].

Модель формирования стока

В качестве концептуальной модели формирования стока используется предпосылка о том, что в любой момент времени расход воды Q , измеряемый на гидропосте, формируется за счет прямого поверхностного стекания Q_s и разгрузки подземных вод Q_{gw} :

$$Q(t) = Q_s(t) + Q_{gw}(t) \quad (1)$$

Расход поверхностного стекания есть результат трансформации поверхностного стокообразования в период дождей и снеготаяния q_s . Предполагается, что этот расход может быть вычислен по модели трансформации единичного гидрографа [5]:

$$Q_s(t) = \int_0^t q_s(\tau) u(t-\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $u(t)$ – функция Нэша трансформации единичного гидрографа для поверхностного стока:

$$u(t) = \alpha_s^{-1} (t \alpha_s^{-1}) \exp(-t \alpha_s^{-1}) \quad (3)$$

Для оценки параметра задержки α_s используется эмпирическое уравнение, связывающее характерное время стекания t_s в сутках с площадью поверхностного водосбора A в кв км:

$$\alpha_s = t_s^{-1}; t_s = 0.8A^{0.2} \quad (4)$$

Расход разгрузки подземных вод формируется за счет инфильтрационного питания Q_w , состоящего из двух частей. Первая часть — это быстрое питание Q_{fw} , связанное с инфильтрацией поверхностного стока в карстовые воронки, быстро достигающего по карстовым полостям уровня грунтовых вод. Вторая часть — это медленное питание Q_{sw} , формирующееся в результате нормального геогидрологического цикла трансформации впитавшихся осадков в почве и подстилающей зоне аэрации. Для динамики разгрузки подземных вод используется модель линейного подземного резервуара, описываемая уравнением (2) с подынтегральной функцией $Q_w(t)$ и экспоненциальной функцией трансформации единичного гидрографа u_{gw} :

$$u_{gw}(t) = \alpha_{gw}^{-1} \exp(-\alpha_{gw} t); Q_w(t) = Q_{fw}(t) + Q_{sw}(t), \quad (5)$$

где α_{gw} — параметр задержки водоносного горизонта.

Для оценки интенсивностей стокообразования и составляющих питания используется моделирование водообмена на поверхности земли и в зоне аэрации для типового ландшафта на карстовом плато с помощью двух взаимосвязанных субмоделей. Первая субмодель — модель трансформации влаги на поверхности земли, реализованная с помощью программы SurfBal [2]. Результаты расчетов по ней определяют интенсивность формирования поверхностного стока $I_{st}(t)$ и граничное условие для второй субмодели. Она представлена моделью одномерного вертикального влагопереноса от поверхности почвы до расчетной нижней границы профиля, на которой формируется гравитационное стекание влаги вниз $I_{sw}(t)$ к уровню грунтовых вод. Вторая субмодель реализована с помощью программы Hydrus-1D [6]. Предполагается, что рассчитанная в любой момент времени интенсивность формирования поверхностного стока разделяется на две части — непосредственно поверхностное стекание и формирование быстрого инфильтрационного питания за счет попадания части стока в карстовые воронки:

$$I_s = \lambda I_{st}; I_w = (1 - \lambda) I_{st} \quad (6)$$

Результаты и их обсуждения

Модель (1-6) содержит неизвестные параметры α_{gw} и λ . Кроме того, вычисляемые интенсивности питания и расходы связаны через площадь подземного водосбора, которая,

строого говоря, для данного источника неизвестна [4]. Программа Surfbal для вычисления суточного стокообразования использует модель нумерованных кривых стока, требующую задания номера кривой CN , а также параметр β связи скорости снеготаяния с суточной температурой. Все эти параметры требуют определения при верификации модели.

Для калибровки модели использовалась следующая процедура. Так как интенсивности и расходы связаны через неизвестную площадь A , то расчетный модельный расход $Q_m(t)$ на гидропосте можно записать как:

$$Q_m(t) = A \int_0^t \left[\lambda I_{st}(CN, \beta, \tau) g(t) + ((1 - \lambda) I_{st}(CN, \beta, \tau) + I_{sw}(CN, \beta, \tau)) g_{gw}(t) \right] d\tau \quad (7)$$

Сравнение модельных $Q_m(t)$ и измеренных расходов $Q(t)$ позволяет получить наилучший набор параметров при достижении их наилучшего сходства. Для этого использовалась ручная калибровка. В качестве калибровочных критериев использовались:

- равенство среднееголетних модельных и наблюдаемых расходов, что позволяет однозначно определить параметр A ;
- максимизация значения критерия Нэша – Сатклиффа (NSE) для среднедекадных величин стока;
- минимизация разницы стандартного отклонения суточных наблюдаемых и модельных расходов;
- минимизация отклонения модельного от наблюдаемого характерного времени автокорреляции $T_c = \int_0^{t_m} r(\tau) d\tau$ в пределах масштаба времени $t_m=3$ мес.

По результатам калибровки была получена модель, которая воспроизводит основные черты среднееголетних колебаний расхода родника (Рис. 1) и автокорреляцию наблюдаемого стокового ряда (Рис. 2).

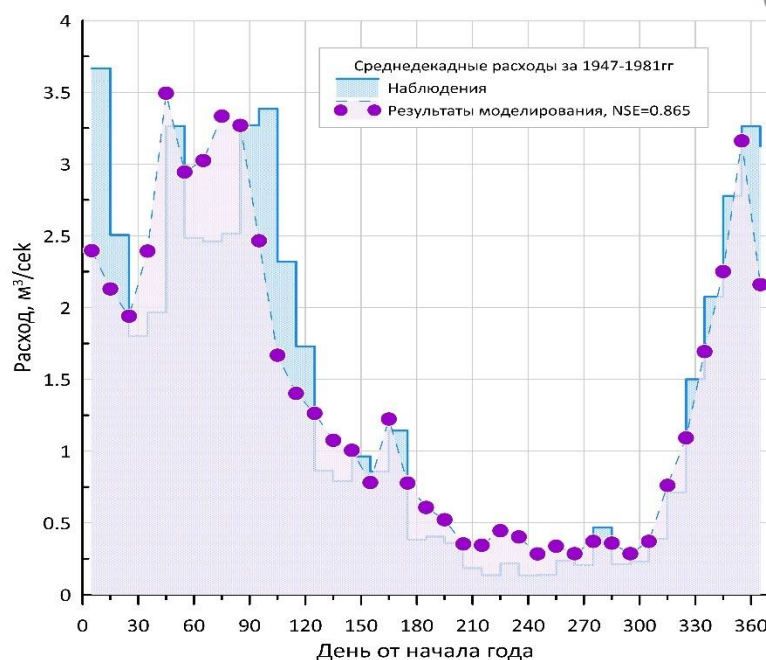


Рис.1 Среднемноголетняя внутригодовая изменчивость расхода р. Черная на гидропосте с. Родниковское в период 1947-1981 гг.

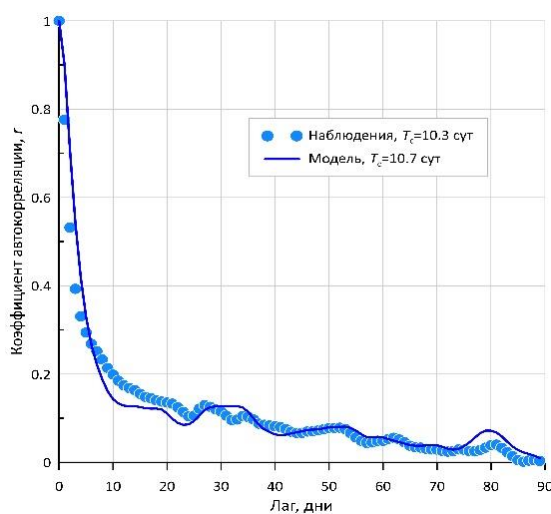


Рис. 2 Автокорреляционная функция расхода р. Черная на гидропосте с. Родниковское в период 1947-1981 гг.

Приведенные на рис. 1-2 модельные результаты получены при следующих параметрах, подобранных в процессе калибровки (Табл. 1).

Табл. 1 Расчетные параметры модели.

Параметр, [размерность]	Значение
Номер кривой стока CN, [-]	85
Коэффициент стаивания β , [см ⁴ /(г*°C)]	5
Доля поверхностного стекания в стокообразовании λ , [-]	0,15

Параметр задержки водоносного горизонта α_{gw} , [1/сут]	0,35
Площадь водосборного бассейна A , [км ²]	81

Модельные результаты получены при совпадении среднегодовых расходов, величина которых составляет 1,41 м³/сек, и достаточно близких величинах стандартного отклонения суточных расходов за весь период наблюдений (3,23 м³/сек для наблюдаемых и 3,00 м³/сек для модельных величин). Меньшее стандартное отклонение модельных расходов видимо определяется тем, что согласно рис. 1 в летние месяцы модельные значения расхода превышают наблюдаемые. Это может быть связано с частичной разгрузкой подземного стока p в русло р. Черной ниже выбранного створа, где визуально наблюдаются до 12 выходов подземных вод. Полученное при калибровке значение площади, с которой собирается сток (81 км²), весьма близко к водосборной площади подконтрольной створу в с. Родниковское, оцениваемой в 87 км².

По результатам моделирования получены следующие генетические составляющие стока p . Черной в районе Скульского источника (Табл. 2).

Табл. 2 Расчетные генетические составляющие стока.

Составляющие расхода стока	[мм/сут]	Доля в общем стоке, [%]
Поверхностное стекание	0,16	9,5
Инфлюационное (быстрое) питание	1,08	64,5
Инфильтрационное (медленное) питание	0,43	26

Заключение

Разработанная модель «осадки-сток» основана на концепции инфильтрационного водообмена подземных и поверхностных вод, связанной с процессами трансформации осадков на поверхности земли и в почве. В модели учтена специфика карстовых регионов с поверхностными формами карстопроявления. В этих регионах часто формируются два типа питания подземных вод: за счет инфлюации поверхностного стока и инфильтрации. Результаты применения этой модели к конкретному региону показали, что она может быть достаточно успешно откалибрована. Эта модель может быть использована для даунскейлинга глобальных климатических прогнозов на изменение стока карстовых массивов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2021-0001 (№ государственной регистрации 121040700170-9) Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы

1. Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Гидрогеология карста Альпийской складчатой области юга СССР. М.: Наука, 1984. 124 с.
2. Гриневский С. О., Поздняков С. П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. — 2010. — Т. 37, № 5. — С. 543–557.
3. Приблуда В.Д., Коджаспиров А.А., Дублянский В.Н. Баланс подземных вод юго-западной части Горного Крыма // Геологический журнал. 1979. Т. 39. № 2. С. 38-46.
4. Токарев С.В. Уязвимость карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование. Дисс. на соискание ученой степени к.г.н. 2020. 186 с.
5. Ramírez, J. A., 2000: Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics. Chapter 11 of Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities Eds. Ellen Wohl; Cambridge University Press.
6. J. Simunek, M. Sejna, M. Th. Van Genuchten Hydrus-1D Manual version 4.16, Department of environmental sciences, university of California, Riverside, California, 2008

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ОТКАЧКЕ ВОДЫ ИЗ СКВАЖИНЫ В ПРИСУТСТВИИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

А.А. Арсеньева*^{1,2}, П.К. Коносавский^{1,2}, К.В. Титов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, E-mail:

aleksandra-mihailenko@mail.ru, k.titov@spbu.ru

²ООО «Геологический центр СПбГУ», Санкт-Петербург, Россия, E-mail: konosavsky@dhspb.ru

Аннотация

Проведен модельный анализ поведения потенциала естественного электрического поля (ЕП) при откачке воды из напорного водоносного горизонта в присутствии фильтрационных неоднородностей различной конфигурации. Фильтрационная неоднородность представлена в виде плановой линейной границы и пласта-полосы. Моделирование ЕП, вызванного откачкой воды из скважины, проводилось в 3D постановке с использованием программного кода MODFLOW. Результаты численного моделирования показывают реакцию ЕП на фильтрационную неоднородность заданную в виде плановой линейной границы и пласта-полосы. Полученные закономерности поведения ЕП при откачке воды из скважины дают возможность дополнить и детализировать интерпретацию фильтрационных опробований применением метода ЕП.

Ключевые слова: естественное электрическое поле, откачка воды, скважина, напорный водоносный горизонт, фильтрационная неоднородность.

NUMERICAL SIMULATION OF ELECTIC SELF-POTENTIAL DURING PUMPING TEST IN HETEROGENEOUS AQUIFER

А.А. Arseneva*^{1,2}, P.K. Konosavsky^{1,2}, K.V. Titov¹

¹St Petersburg State University, St Petersburg, Russian Federation, E-mail: aleksandra-mihailenko@mail.ru,

k.titov@spbu.ru

²LLC «Geological Centre of SPSU», St Petersburg, Russian Federation, E-mail: konosavsky@dhspb.ru

Abstract

Authors carried out a numerical analysis of Self-Potential (SP) signals produced by pumping test experiment from confined aquifer with heterogeneities of different configuration in hydraulic conductivity. Heterogeneities are presented as planned linear boundary and seam strip. Numerical 3D experiments were carried out with MODFLOW. It is hydrodynamic and SP reaction on planned linear

boundary and seam strip inhomogeneities in hydraulic conductivity. These results get a possibility to supplement and detail the interpretation of pumping tests with SP.

Key Words: Self-Potential, pumping test, well, confined aquifer, heterogeneity.

Введение

Одной из основных задач, решаемых в гидрогеологии, является оценка запасов подземных вод. Для решения этой задачи проводятся опытно-фильтрационные опробования с целью получения значений фильтрационных параметров водоносного горизонта, в первую очередь, проводимости/коэффициента фильтрации.

В ходе проведения опытной откачки желательно иметь достаточное количество наблюдательных скважин, что повысит качество интерпретации эксперимента. При недостатке наблюдательных скважин возможно рассмотреть применение геофизических методов, а именно, метода естественного электрического поля (ЕП). Данный метод представляет практический интерес, поскольку при откачке воды из скважины создается фильтрационный поток, который сопровождается электрическим полем. В 1983 году появилась пионерская работа, в которой описан новый метод изучения электрического поля, основанный на решении сопряженной задачи потока воды или тепла и электрического поля [6].

Ранее проводились работы по оценке возможности применения метода при гидрогеологических работах [2-5; 7], в частности, при численной оценке чувствительности ЕП при откачке воды из пласта с перетеканием. Согласно полученным результатам [8], в масштабе времени данные ЕП и откачки дополняют друг друга в отношении определения параметров. Однако, отклик к проявлению перетекания намного раньше во временном масштабе по изменению сигнала ЕП, чем по изменению напора.

В рамках данной работы рассматривается возможность применения метода ЕП для улучшения интерпретации опытной откачки из водоносного горизонта в присутствии фильтрационной неоднородности.

Методы исследований

В ходе выполнения работ по гранту РНФ (№ 17-17-01160 «Физико-химические модели вызванной и спонтанной поляризации применительно к опытно-фильтрационному опробованию водоносных горизонтов») авторами данной публикации была разработана и протестирована серией численных экспериментов методика численного моделирования ЕП, вызванного откачкой воды из скважины в 3D постановке [1]. Решение поставленной задачи с помощью численного моделирования проводится в три последовательных этапа. На первом этапе определяется пространственное распределение напоров подземных вод с помощью программного кода MODFLOW (в рамках пакета Processing Modflow v.5.3) [1]. На втором этапе

решается задача вычисления источников электрического поля фильтрационной природы с помощью специально разработанного программного кода ElSources (П.К. Коносовский). На последнем этапе на основе электродинамической аналогии вновь с помощью программного кода MODFLOW, но в стационарной постановке реализуется задача вычисления электрического поля путем решения соответствующего уравнения Пуассона.

В прошлых работах [4; 7; 8] авторы приводят результаты численного моделирования ЕП в условиях двухмерного фильтрационного потока. В ходе отработки разработанной методики моделирования ЕП фильтрационной природы было проведено совместное тестирование 2D и 3D подходов (Рис. 1). Полученные результаты указывают на возможность корректного использования кода MODFLOW (дополненного вычислением источников электрического поля) для численного моделирования естественного электрического поля фильтрационной природы в 3D постановке, что позволяет изучать гидродинамику достаточно сложных фильтрационных потоков, которые не реализуются в 2D постановке.

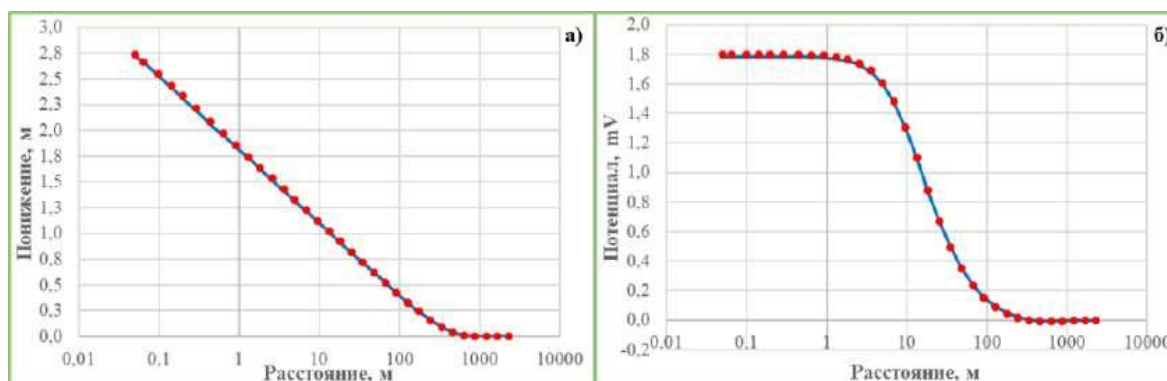


Рис. 1 Зависимость на конец откачки а) понижения в водоносном горизонте и б) потенциала ЕП от расстояния до откачивающей скважины (синяя линия – 2D, красные точки – 3D).

Таким образом, оценки чувствительности сигнала ЕП к наличию фильтрационной неоднородности выполнялись с помощью численного моделирования на базе подхода, разработанного авторами данной работы. В рамках решения поставленной задачи рассмотрены 2 наиболее типичные конфигурации зон плановой фильтрационной неоднородности: одиночная плановая граница и пласт-полоса. Рассматриваются 4 варианта опытной откачки из напорного, неограниченного в плане и изолированного в разрезе водоносного горизонта, сложенного хорошо проницаемыми отложениями с коэффициентом фильтрации (k_1) 1 м/сут, в присутствии фильтрационной неоднородности. Для анализа полученных результатов используются аномальные поля - разность вычисленных значений (потенциала и понижения) и этих же значений для однородного водоносного горизонта.

Результаты и их обсуждения

В рамках первых моделей рассматривалась неоднородность в виде одиночной линейной границы (полуограниченный и полупроницаемый пласт). Граница со слабопроницаемыми отложениями (модель 1а) моделирует выклинивание основного водоносного горизонта. Граница с высокопроницаемыми отложениями (модель 1б) моделирует откачку вблизи реки или озера с постоянным напором ($H=\text{const}$). Начальное расстояние до границы составляет 10,5 м, затем расстояние до границы увеличивалось.

Полученные результаты для модели 1а (Рис. 2) показывают, что граница плановой неоднородности фиксируется максимумами кривой понижения (значения от 0,5 м до 5,8 м) и кривой потенциала (значения от 0,2 мВ до 2 мВ). При расстоянии до границы фильтрационной неоднородности более 300 м и понижение, и потенциал проявляют себя как в случае однородного пласта.

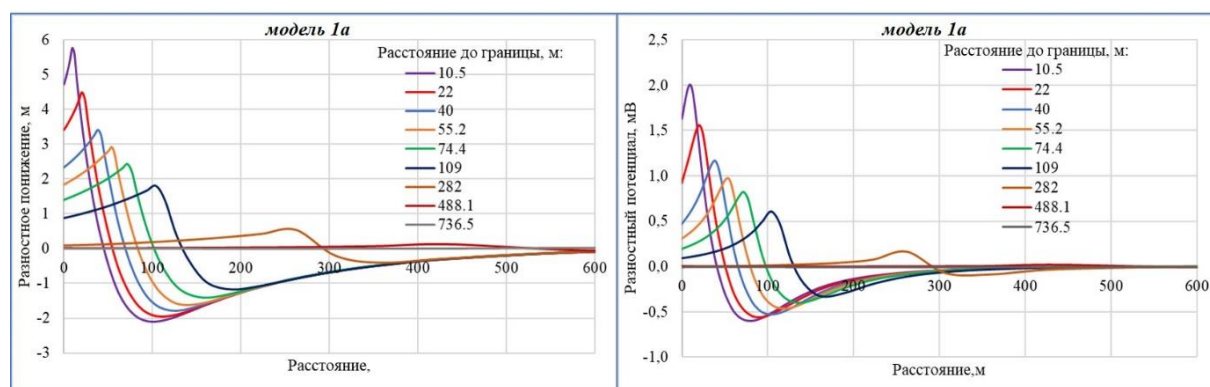


Рис. 2 Распределение понижения уровня подземных вод (слева) и потенциала (справа) для модели 1а (одиночная линейная граница со слабопроницаемыми отложениями).

Одиночная плановая граница фильтрационной неоднородности, представленная высокопроницаемыми отложениями (модель 1б), отмечается минимумами кривой понижения (значения от -0,6 м до -6,2 м) и кривой потенциала (значения от -0,4 мВ до -1,6 мВ) (Рис. 3). При расстоянии от скважины до границы более 300 м граница фильтрационной неоднородности не фиксируется, распределение и понижения, и потенциала ЕП соответствует распределению в однородном пласте.

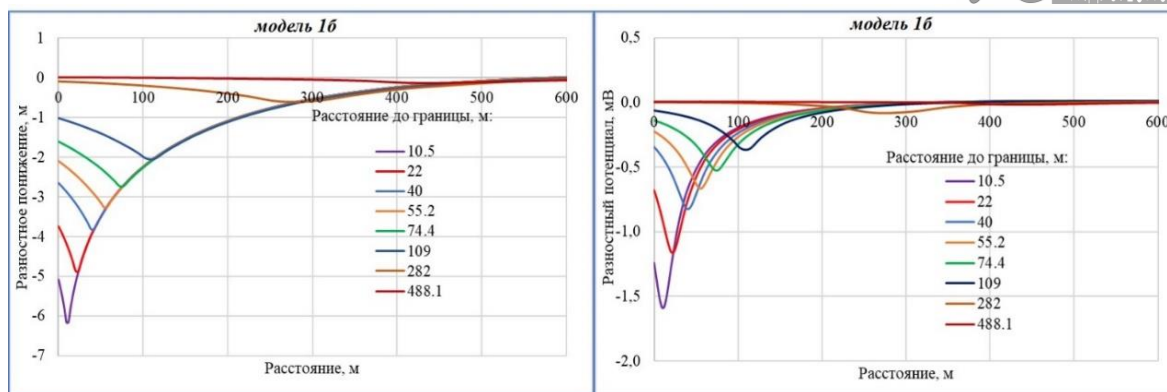


Рис. 3 Распределение понижения уровня подземных вод (слева) и потенциала (справа) для модели 1б (одиночная линейная граница с высокопроницаемыми отложениями).

В рамках двух других моделей рассматривалась неоднородность в виде пласта-полосы. Слабопроницаемый пласт (модель 2а) отвечает линзовидному (в разрезе) включению глин или суглинков. Пласт-полоса с высокопроницаемыми отложениями отражает зону дробления пород, либо палеодолину, выполненную гравийным материалом (модель 2б). Ближняя граница фильтрационной неоднородности расположена в 40 м от откачивающей скважины. Начальная ширина неоднородности 6 м, далее ширина пласта увеличивалась.

Для модели 2б получена реакция ЕП и понижения уровня подземных вод только на ближнюю (первую к скважине) границу неоднородности. Ближней границе отвечает минимум кривой понижений (значения от -1,7 м до -3,8 м) и кривой потенциала (значения от 0,47 мВ до -0,82 мВ). Вторая граница пласта-полосы не фиксируется, что обусловлено высоким значением коэффициента фильтрации отложений, слагающих неоднородность, и малым градиентом напора в этой зоне. Вновь получено сходное распределение понижения и потенциала ЕП.

Для модели 2а (Рис. 4) получена реакция и понижения, и потенциала ЕП на ближнюю границу (первую к скважине) границу неоднородности. Ближней границе неоднородности отвечает максимум кривой понижения (значения от 2,2 м до 3,4 м) и кривой потенциала ЕП (значения от 0,9 мВ до 1,3 мВ). Внешняя граница пласта-полосы отчетливо отмечается минимумом кривой понижения (от -2 м до -2,5 м). Минимум кривой потенциала (от -0,9 мВ до -1,1 мВ) несколько смещен относительно минимума кривой понижения. При прохождении волной гидродинамического возмущения через неоднородность происходит резкий спад значений понижения и подъем после прохождения дальней границы. Стоит отметить, что при значении расстояния между скважиной и внешней (дальней) границей более 100 м, внешняя граница не фиксируется.

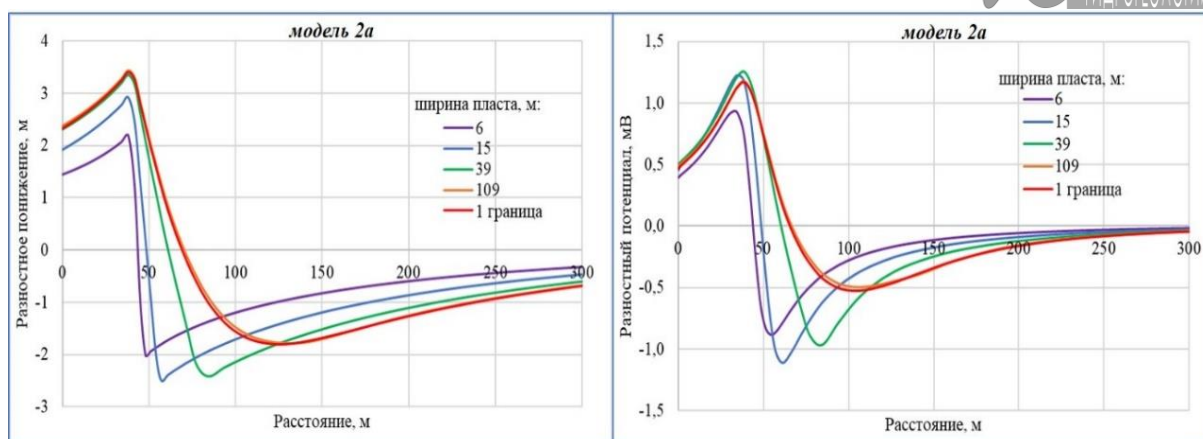


Рис. 4 Распределение понижения уровня подземных вод (слева) и потенциала (справа) для модели 2а.

Заключение

Результаты моделирования показывают корреляцию сигналов электрического поля и понижения уровня подземных вод в присутствии фильтрационной неоднородности с низким коэффициентом фильтрации для случаев одиночной плановой границы и границы в виде пласта-полосы.

Список литературы

1. Михайленко, А.А., Коносавский, П.К., Титов, К.В. (2020). Электрическое поле при откачке из водоносного горизонта в присутствии фильтрационной неоднородности. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 65 (4), 782–794.
2. Bogoslovsky V.A. and A.A. Ogilvy, 1973. Deformations of natural electric fields near drainage structures, Geophysical Prospecting, 21, 716-723.
3. Jardani A., A. Revil, W. Barrash, A. Crespy, E. Rizzo, S. Straface, M. Cardiff, B. Malama, C. Miller and T. Johnson, 2009. Reconstruction of the water table from self-potential data: a Bayesian approach, Ground Water, 47, 213-227.
4. Konosavsky P., Mainault A., Narbut M., Titov K. Self-potential response to periodic pumping test: a numerical study / Konosavsky P., Mainault A., Narbut M., Titov K. // Geophysical Journal International. – 2017. – №210. – P.1901–1908.
5. Rizzo E., B. Suski, A. Revil, S. Straface and S. Troisi, 2004. Self-potential signals associated with pumping tests experiments, Journal of Geophysical Research – B, 109, B10203.
6. Sill, William. R. Self-potential modeling from primary flows // Geophysics, 1983. Vol.48. Issue 1. P.76.
7. Titov K., A. Revil, P. Konosavsky, S. Straface and S. Troisi, 2005. Numerical modelling of self-potential signals associated with a pumping test experiment, Geophysical Journal International, 162(2), 641-650.
8. Titov, K., Konosavsky, P., Narbut, M. Pumping test in a layered aquifer: numerical analysis of self-potential signals // Journal of Applied Geophysics, 2015. №123. P.188–193.

УДК 556.3+550.34

РАЗВИТИЕ МЕТОДА НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ (НА ПРИМЕРЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА, ДАЛЬНИЙ ВОСТОК РОССИИ)

С.В. Болдина*¹, Г.Н. Копылова¹

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», Камчатский филиал,
Петропавловск-Камчатский, Россия, E-mail: boldina@emsd.ru

Аннотация

Рассматривается метод обработки данных наблюдений за вариациями уровня воды в скважинах, позволяющий оценивать водопроницаемость T и упругие свойства водонасыщенных пород, а также их изменчивость во времени, без возмущения естественного гидродинамического режима. Основу метода составляют результаты расчетов барометрической эффективности (БЭ), а также амплитуд и фазовых сдвигов отдельных приливных волн гравитационного потенциала Земли в изменениях уровня воды по отношению к соответствующим амплитудам и фазам приливной объемной деформации водонасыщенных пород (обычно используется волна M_2 с периодом 12,42 ч). Оценка величины T проводится по модели Бредехофта [1; 3] по наилучшему соответствию между экспериментальными и теоретическими амплитудами и фазовыми сдвигами приливных откликов в изменениях уровня воды. Приводится пример обработки многолетнего временного ряда уровня воды в скважине и атмосферного давления с использованием программы приливного анализа ETERNA 3.0 [8]. В изменениях временных рядов БЭ и приливных параметров обнаружены внутригодовые сезонные вариации, соответствующие фазам изменения сезонного гидростатического напора в районе скважины. С учетом ошибок определения БЭ и приливных параметров вариаций уровня воды, а также их сезонных изменений, проанализированы изменения фазового сдвига, водопроницаемости и проницаемости водонасыщенных пород на стадии подготовки сильного землетрясения.

Ключевые слова: скважина, уровень воды, приливной анализ, водопроницаемость, землетрясение

DEVELOPMENT OF THE OBSERVATION METHOD IN WELLS OF SEISMIC ACTIVE REGIONS (BY THE EXAMPLE OF THE KAMCHATKA PENINSULA, THE FAR EAST OF RUSSIA)

S.V. Boldina*¹, G.N. Kopylova¹

¹Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KB GS RAS),
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, E-mail: boldina@emsd.ru

Abstract

A method for processing observational data on water level variations in wells is considered, which makes it possible to estimate the transmissivity T and the elastic properties of water-bearing rocks, as well as their variability over time, without perturbing the natural hydrodynamic regime. The basis of the method is the results of calculations of the barometric efficiency (BE), as well as the amplitudes and phase shifts of individual tidal waves of the Earth's gravitational potential in changes in the water level in relation to the corresponding amplitudes and phases of the tidal volumetric deformation of water-bearing rocks (usually, an M_2 wave with a period of 12.42 h is used). The T value is estimated using the Bredehoeft model of [1; 3], based on the best fit between the experimental and theoretical amplitudes and phase shifts of tidal responses in water level changes. An example of processing a long-term time series of water level in a well and atmospheric pressure using the ETERNA 3.0 [8] tidal analysis program is given. Intra-annual seasonal variations were found in the changes in the BE time series and tidal parameters, corresponding to the phases of changes in the seasonal hydrostatic head in the well area. Taking into account the errors in determining the BE and tidal parameters of water level variations, as well as their seasonal changes, changes in the phase shift, transmissivity and permeability of water-bearing rocks at the stage of preparation of a strong earthquake are analyzed.

Key Words: well, water level, tidal analysis, water transmissivity, earthquake

Введение

При проведении наблюдений в пьезометрических скважинах сейсмоактивных районов Земли особое внимание уделяется изучению гидрогеодинамических предвестников и вызывающих их процессов в системах «скважина – водовмещающая порода» [4-7]. Внедрение автоматизированных систем прецизионных наблюдений за вариациями уровня/давления подземных вод сопровождается ростом интереса к методам определения свойств водовмещающих пород и их изменчивости во времени без возмущения естественного режима скважин, в частности, по откликам системы «скважина – водовмещающая порода» на земноприливное и барометрическое воздействие. Широко известна модель приливного отклика уровня воды в скважине [3], созданная для условий однородного, изотропного протяженного замкнутого водоносного горизонта, которая применяется для оценки водопроводимости T по величине фазового сдвига между приливными изменениями уровня воды и гравитационного потенциала для суточной и полусуточной групп приливных волн для реальных скважин. Величина водопроводимости T и удельной упругой емкости S находятся по наилучшему соответствию между амплитудами приливных откликов уровня воды и их фазовых сдвигов, которые определяются по синхронным часовым временным рядам вариаций уровня воды и атмосферного давления с помощью программ приливного анализа. При реализации этого метода

для скважин сейсмоактивных регионов возникает закономерный вопрос о точности и надежности получаемых оценок параметров водовмещающих пород, в частности, величины водопроницаемости, и ее изменчивости в связи с землетрясениями. Для прояснения этого вопроса выполнена обработка данных прецизионных уровнемерных наблюдений в скважине ЮЗ-5, полуостров Камчатка [2]. Параметры приливного и барометрического отклика уровня воды за весь период наблюдений и в скользящем временном окне длиной 30 суток с шагом в одни сутки получены с использованием программы приливного анализа ETERNA 3.0 [8]. По полученным оценкам БЭ, амплитудного фактора и фазового сдвига волны M_2 были рассчитаны величины T и упругих параметров водовмещающих пород за весь период наблюдений и с дискретизацией одни сутки с учетом ошибок их определения и внутригодового сезонного изменения. Проанализирована изменчивость величины T во времени местного сильного землетрясения.

Методы исследований

Для расчетов величин БЭ и приливных параметров наиболее мощной и наименее зашумленной волны M_2 из полусуточной группы приливных волн (отношение сигнал/шум 270) по отношению к объемной деформации водовмещающих пород, а также отношения сигнал/шум и ошибок определения всех параметров, использовались синхронные временные ряды среднечасовых значений уровня воды и атмосферного давления с 27.07.2012 г по 01.02.2018 г. (всего 2017 сут). Из этих рядов были исключены 250 суток, в которые происходили сильные землетрясения, вызывающие резкие изменения структуры временного ряда уровня воды; сутки после таких землетрясений, а также сутки с выбросами величин уровня воды, вызванные техническими работами на скважине. Определения БЭ, приливных параметров и их ошибок были получены для всего ряда и в скользящем 30-суточном временном окне с шагом 1 сутки. Получены средние величины: БЭ = $-0,385 \pm 0,004$ см/гПа; амплитуда волны M_2 в изменениях уровня воды $0,923 \pm 0,006$ см, амплитудный фактор $0,0907 \pm 0,0006$ см/ 10^{-9} ; сдвиг фазы $-17,1 \pm 0,4^\circ$, соответствующий величине $T = 1,7$ м²/сут. По суточным временным рядам значений БЭ и приливных параметров были построены модели сезонности и оценены диапазоны индексов их сезонного изменения в течение года: БЭ $0,047 - -0,026$ см/гПа, амплитуда волны M_2 $0,013 - -0,012$ см, сдвиг фаз $0,5 - -0,5^\circ$. На Рис. 1 представлены сезонные изменения уровня воды в скважине, величины БЭ и приливных параметров волны M_2 в изменениях уровня воды.

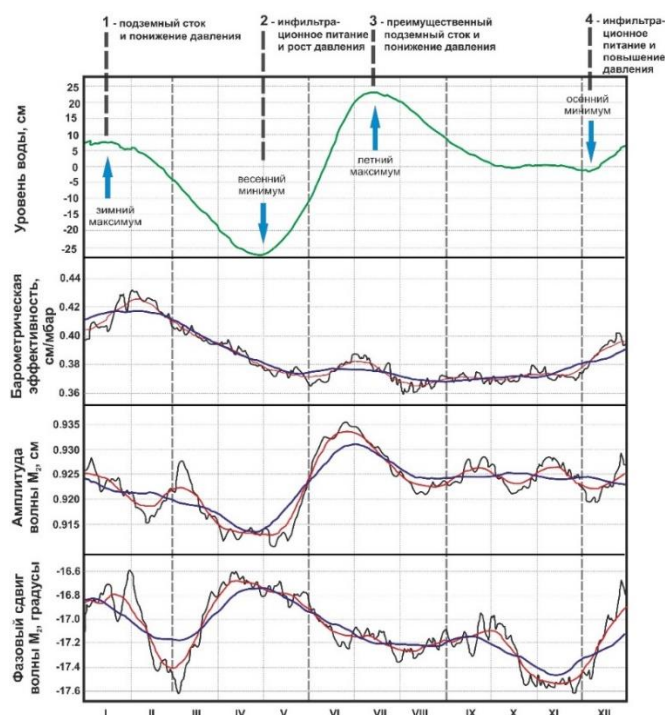


Рис. 1 Сезонные изменения (сверху вниз) уровня воды с выделением фаз гидрогеодинамического режима, БЭ, амплитуды волны M_2 и фазового сдвига. Рассчитанные значения показаны черным цветом, красный цвет – сглаживание по 30 сут, синий – сглаживание по 60 сут с шагом 1 сутки.

На рис. 2 представлены изменения сдвига фаз волны M_2 в изменениях уровня воды перед Жупановским землетрясением (ЖЗ) 30.01.2016 г., $M_w = 7,2$, $d_e = 80$ км, показывающие увеличение этой величины до $-19,3 \pm 0,4^\circ$ и, соответственно, уменьшение T по модели [1; 3] до $1,4\text{--}1,5 \text{ м}^2/\text{сут}$ (или примерно на 15% по отношению к средней величине $1,7 \text{ м}^2/\text{сут}$).

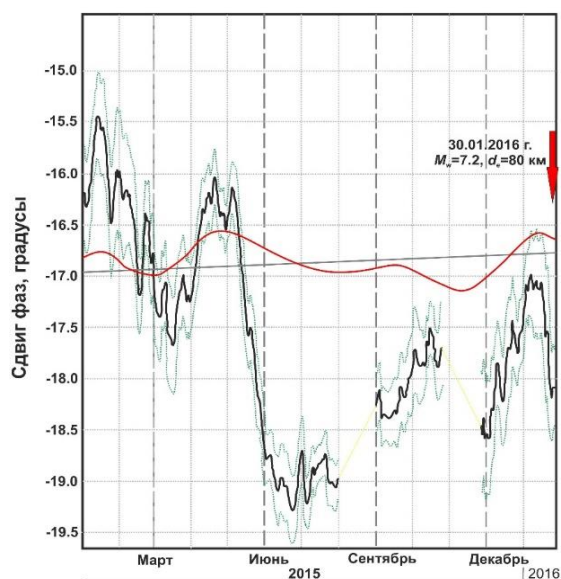


Рис. 2 Изменения фазового сдвига волны M_2 в изменениях уровня воды перед ЖЗ в сопоставлении с ошибками определения отдельных значений (зеленые линии) и средним сезонным поведением (красная линия).

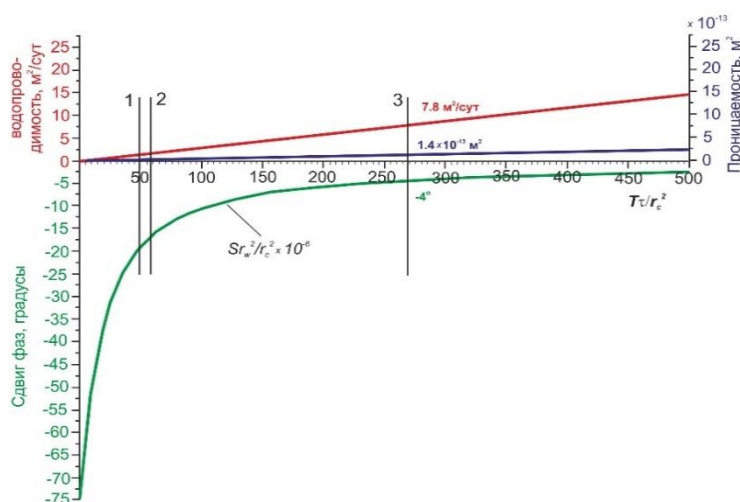


Рис. 3 Графики изменений сдвига фазы между компонентой M_2 в изменениях уровня воды и соответствующей компонентой гравитационного потенциала Земли при различных значениях $T\tau/r_c^2$, где T – водопроницаемость, τ – период волны M_2 , в сопоставлении с величиной водопроницаемости в интервале величин от 0 до $10 \text{ м}^2/\text{сут}$. 1-3 – оценки величины T по приливному анализу и по откачке: 1 – на стадии подготовки ЖЗ, 2 – по средней величине сдвига фаз за весь период наблюдений, 3 – по откачке. Параметр $Sr_w^2/r_c^2 \cdot 10^{-6} = 9,4 \cdot 10^{-6}$, при величине упругой емкости $S = 19,9 \cdot 10^{-5}$, $r_w^2 = 0,084 \text{ м}$, $r_c^2 = 0,123 \text{ м}$.

Сопоставление величин T , полученных по приливному анализу, с величиной $T = 7,8 \text{ м}^2/\text{сут}$ по данным откачки (Рис. 3), показывает, что они различаются в 4,6–5,4 раза. Если использовать для определения проницаемости водовмещающих пород формулу $K = \mu T / d \rho g$, где $\mu = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – вязкость воды при температуре воды 5°C ; $d = 100 \text{ м}$ – мощность водовмещающих пород, плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ и гравитационная постоянная $g = 9,8 \text{ м}^2/\text{с}$, то получаем среднюю величину проницаемости $K = 3,0 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ и величину $K = 2,4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ перед ЖЗ (Рис. 3). Таким образом, результаты приливного анализа позволяют предполагать, что перед землетрясением проницаемость водовмещающих пород уменьшалась на 20%. При этом величина проницаемости, полученная из величины T по данным откачки, отличается от величин проницаемости по приливному анализу в 5–6 раз.

Заключение

1. С использованием программы ETERNA 3.0 для обработки временного ряда прецизионных уровнемерных наблюдений длиной 5,5 года, были обнаружены сезонные изменения величин барометрической эффективности и приливных параметров. При этом из рассмотрения исключены данные наблюдений, искаженные воздействием сильных землетрясений и техногенными нарушениями. Эффект сезонности изменения БЭ и приливных параметров необходимо учитывать при оценке водопроницаемости водовмещающих пород и ее изменчивости во времени.

2. На стадии подготовки ЖЗ обнаружено относительное увеличение сдвига фазы волны M_2 в изменениях уровня воды по отношению к теоретическому изменению соответствующей компоненты гравитационного потенциала Земли в течение примерно 8 месяцев, указывающее на уменьшение водопроницаемости и проницаемости водовмещающих пород примерно на 20% по отношению к средним многолетним величинам. Кроме этого, полученные из приливного анализа оценки водопроницаемости отличаются от соответствующей величины T по данным откачки в 5–6 раз. Такие различия ставят под сомнение возможность получения количественных оценок изменчивости во времени свойств водовмещающих пород, получаемых из приливного анализа. Вместе с тем, возможность качественных оценок изменчивости свойств водовмещающих пород не вызывает сомнения по данным приливного анализа прецизионных данных уровнемерных наблюдений в связи с землетрясениями при аккуратном учете формальных ошибок определения приливных параметров и с учетом естественной и техногенной изменчивости гидрогеодинамического режима наблюдательной скважины.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23 и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 112-119.
2. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г. Опыт регистрации вариаций уровня воды и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 4. С. 43-56.
3. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. №.10 (23). pp. 1824-1832.
4. Kopylova G. and Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula // Front. Earth Sci. 2020. 8:576017.
5. Kopylova G., Boldina S. Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model // Minerals. 2021. 11, 731.
6. Wang, C-Y.; Manga, M. Earthquakes and Water. Lecture Notes in Earth Sciences / Germany: Springer Berlin, 2010. 225 p.
7. Wang Ch.-Y., Manga M. Water and Earthquakes. Lecture Notes in Earth System Sciences / Switzerland: Springer Cham, 2021. 387 p.
8. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. № 118. pp. 8719-8721.

УДК 556

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И ПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

Б.В. Боровский*¹¹АО «ГИДЭК», Москва, Россия, E-mail: borevsky@hydec.ru**Аннотация**

Рассмотрено влияние полноты и состава исходных данных, получаемых при гидрогеологических исследованиях, на достоверность выполняемых прогнозов и принимаемых на их основании инженерных решений. Показано, что достоверность прогнозов и требования к полноте информации, положенных в их основу, зависят от сложности гидрогеологических условий. Полнота и надежность имеющейся в распоряжении гидрогеолога информации зависит как от комплекса выполненных исследований, так и от требований нормативной базы.

В настоящее время образовался существенный разрыв между широкими возможностями выполнения прогнозов с использованием разработанных математических решений и численного моделирования и полнотой, и достоверностью имеющейся для их реализации информации.

Для преодоления этого разрыва необходимо совершенствование методики и широты выполняемых исследований и требований нормативных документов к их содержанию и результатам.

Ключевые слова: достоверность, гидравлические прогнозы, разведочное моделирование, проектные решения, информация

INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND COMPLETENESS OF INFORMATION ON THE RELIABILITY OF HYDROGEOLOGICAL FORECASTS

B.V. Borevsky*¹¹Hydec, Inc., Moscow, Russian Federation, E-mail: borevsky@hydec.ru**Annotation**

The effect of the completeness and composition of the initial data obtained during hydrogeological studies on the reliability of forecasts and engineering decisions taken on their basis is considered. It is shown that the reliability of forecasts and the requirements for the completeness of information underlying them depend on the complexity of hydrogeological conditions. The completeness and reliability of the information available to a hydrogeologist depends both on the complex of studies performed and on the requirements of the regulatory framework.

At present, a significant gap has formed between the wide possibilities for making forecasts using the developed mathematical solutions and numerical modeling and the completeness and reliability of the information available for their implementation.

To overcome this gap, it is necessary to improve the methodology and breadth of the research being carried out and the requirements of regulatory documents for their content and results.

Key Words: reliability, hydraulic forecasts, exploration modeling, design decisions, information

1. Продуктом гидрогеологических исследований инженера-гидрогеолога является информация. От надежности и достаточности полученной в процессе гидрогеологических исследований информации зависит обоснованность выполняемых на ее основании прогнозов и принимаемых проектных решений и возникающих ошибок или даже аварийных ситуаций при ее недостаточности или недостоверности.

В этом смысле работа гидрогеолога ничем не отличается от работы врача или военначальника. Решения, принимаемые на основе недостаточной или недостоверной информации, могут иметь самые серьезные экономические, экологические и даже трагические последствия.

Следовательно, достаточность и достоверность имеющейся информации и их оценка являются необходимым и решающим условием эффективности любых гидрогеологических прогнозов.

Достоверность гидрогеологических прогнозов при решении различных задач, связанных с расчетами снижения уровней, величины водопритоков в горные выработки и дренажные системы, оценкой изменения качества подземных вод, влияния водоотбора на окружающую среду и т.д., являются решающим результатом эффективности и оптимальности принимаемых на их основании проектных, строительных и управленческих решений.

Несмотря на исключительно важное значение достоверности прогнозирования, в т.ч. при аварийных ситуациях, этой проблеме в настоящее время уделяется совершенно недостаточное внимание.

В этом отношении можно постулировать, что достоверность гидрогеологических прогнозов зависит от выбранной методики прогнозирования и полноты, детальности и обоснованности исходных данных, положенных в основу выполненных прогнозов.

При этом совершенно очевидно, что если прогнозы можно выполнить различными методами, легко дополнить или пересчитать в относительно короткое время, то недостаточность и погрешности исходных данных компенсировать значительно сложнее, а в ряде случаев, по существу, невозможно. Следовательно, и достоверность прогнозов окажется весьма невысокой или даже относительно низкой, даже при использовании самого совершенного и современного математического аппарата прогнозирования. Причем сама оценка достоверности прогнозов

достаточно надежно может быть выполнена только путем сопоставления данных гидрогеологических прогнозов с фактически наблюдаемыми в течение достаточно длительного времени.

2. Рассматриваемому направлению большое внимание начало уделяться в конце 60-х-начале 70-х годов XX века.

В это время под руководством Н.Н.Биндемана была выполнена по всей территории Советского Союза масштабная работа по сопоставлению результатов разведки и эксплуатации подземных вод. Результаты этих работ показали, что в большинстве случаев расчетные понижения уровней подземных вод оказались существенно больше прогнозируемых. В основном эти расхождения были связаны с неучетом всех источников формирования водоотбора и существенным завышением (примерно на 1.5-2 порядка) расчетных значений коэффициента пьезопроводности и радиуса влияния водоотбора, т.е. размеров воронки депрессии по площади и глубине, значительно превышающих фактически наблюдаемые.

В связи с полученными результатами для преодоления существенных расхождений прогнозов и фактов на первом этапе Н.Н.Биндеманом было введено понятие обобщенных параметров как некоторых (по-существу, гидравлических) коэффициентов, учитывающих совокупность всех факторов, определяющих величину и закономерности снижения уровней подземных вод. Впоследствии в связи с развитием и внедрением в практику методов математического моделирования от использования обобщенных параметров отказались. Тем не менее, при прогнозах гидравлическим методом с использованием достигнутых закономерностей изменения уровней или их удельных понижений принятые коэффициенты могут рассматриваться как аналоги обобщенных параметров. Н.Н.Биндеман сформулировал такие прогнозы как совместное применение гидравлического и гидродинамического методов.

Результаты проведенных работ были обобщены и проанализированы Л.С.Язвиным в его докторской диссертации «Гидрогеологические основы оценки достоверности прогнозов при подсчете эксплуатационных запасов подземных вод» (1972 г.).

Приведу основные выводы, сделанные Л.С.Язвиным, применительно к оценке запасов подземных вод, поскольку они не только не потеряли своей актуальности, но безусловно требуют возврата к этой весьма актуальной проблеме.

1) Под степенью достоверности оценки запасов полезных ископаемых подразумевается степень соответствия прогнозов, выполненных по результатам разведочных работ, фактическим данным, получаемым при эксплуатации.

2) В качестве критерия достоверности прогнозов предлагается принимать степень обоснованности исходных данных, используемых при оценке запасов подземных вод, т.е. надежность установления основных источников формирования запасов, расчетных гидрогеологических параметров и гидрохимических условий.

3) Надежность установления перечисленных факторов, а, следовательно, и степень соответствия расчетной схемы конкретным природным условиям определяется сложностью гидрогеологических условий.

Следовательно, более сложные условия требуют либо значительного увеличения объема и состава исходных данных для прогнозирования, либо снижения требований к достоверности прогнозов. На практике используется комбинация этих вариантов, т.к. объем необходимых исходных данных реально не может быть получен при гидрогеологических исследованиях, либо его получение экономически нецелесообразно.

3. В практике подсчета запасов подземных вод необходимый объем исходных данных, изученность запасов и соответствующая ей достоверность прогнозов качественно определяется их категорийностью (категории А, В, С₁ и С₂).

Для анализа достоверности принимаемых решений автором данной статьи был выполнен анализ 350 протоколов ГКЗ СССР по рассмотрению подсчетов запасов подземных вод, т.е. всех протоколов за период 1966-1970 гг.

На основании этого анализа Л.С.Язвиным и Б.В.Боревским были выделены 3 группы сложности гидрогеологических условий и сформулированы предложения по дифференциации категорийности запасов для таких групп. Чем сложнее условия, тем ниже требуемая категорийность запасов или требования к достоверности их подсчета. Эти предложения и разработки были приняты ГКЗ при Совете Министров СССР в 1976 г.

Тем не менее, вопрос об оптимальном соотношении необходимых исходных данных для прогнозирования и достоверности прогнозов не имеет количественных критериев и в настоящее время.

Более того, если в 70-е и 80-е годы XX века при обосновании требований к объему и составу исходных данных и к достоверности прогнозирования, этот вопрос решался при проектировании и проведении разведочных работ путем расширения методов исследований, их объема и комплексирования, то в настоящее время объемы и состав исследований значительно сузились. В тоже время, за последние десятилетия значительно расширился набор математических методов решения различных гидрогеологических задач и численного моделирования. По-существу, разработанное программное обеспечение позволяет выполнить прогнозные расчеты для гидрогеологических условий любой сложности при решении самых разнообразных инженерных задач.

Однако, достоверность и совокупность имеющихся исходных данных для таких прогнозных расчетов совершенно неадекватна их возможностям. Между ними образовался существенный разрыв, который все время возрастает в связи с эффективным развитием методов математических расчетов и численного моделирования и соответствующем полным

отсутствием хоть какого-нибудь прогресса в обоснованности и полноте исходных данных для прогнозирования особенно в сложных и весьма сложных гидрогеологических условиях.

4. Преодоление этого разрыва требует безусловного повышения обоснованности гидрогеологических прогнозов исходными данными, расширением и совершенствования методов исследований и технологии их проведения, обеспечивающих полноту и достоверность исходных данных для прогнозирования.

Особое внимание следует уделять достоверности результатов, получаемых при проведении гидрогеологических исследований и выборе с этой целью методов и технологии их проведения.

Как никогда актуальны при этом слова В.А.Мироненко: «Экспресс-откачки самый дешевый метод получения неверных результатов». Между тем, прогнозы водопритоков в карьеры или подземные горные выработки осуществляются преимущественно на данных экспресс-откачек.

Однако задача повышения полноты и достоверности исходных данных требует различных ограничений, как по экономическим, так и по технологическим причинам. Возникает совершенно обоснованный вопрос: «Какой состав исследований и их объем необходим и оптимален для решения поставленной задачи?», тем более, когда количественные критерии для ответа на этот вопрос отсутствуют.

Следовательно, следует оценить как наиболее эффективно решить задачу оптимизации видов и объемов планируемых работ в различных по сложности гидрогеологических условиях.

5. Одним из весьма эффективных методов решения этой задачи является разведочное моделирование.

В моей практике разведочное моделирование начало применяться в начале 60-х годов XX века.

Приведу два примера, в одном из которых было проведено обоснование целесообразности проведения ранее не практикуемых работ, а во втором – нецелесообразность их проведения.

Пример 1. На крыле синклинали в Северном Казахстане продуктивным горизонтом являлась узкая полоса интенсивно трещиноватых турнейских известняков с водопродимостью около 2000 м²/сут при ширине полосы 150-200 м. С обеих сторон эта полоса контактировала со слаботрещиноватыми эффузивами и толщей терригенных пород с водопродимостью около 50 м²/сут. Ранее предполагалось, что эти породы при гидродинамических прогнозах можно рассматривать как непроницаемые. Выполненное на кафедре гидрогеологии МГРИ в 1963 году тестовое моделирование показало, что именно приток к полосе из слаботрещиноватых пород является определяющим в формировании баланса водопритоков к скважинам, расположенным в пределах полосы.

На этом основании было обоснованно и реализовано проведение кустовых откачек из слаботрещинистых пород для определения гидродинамических параметров, т.к. изменение их водопроницаемости даже в небольшом диапазоне существенно влияло на величину запасов [2].

Пример 2. Разведка для водоснабжения г.Ухта проводилась в краевой части Печорского артезианского бассейна. Продуктивный водоносный горизонт в интенсивно-трещиноватых доломитах изучался в области их выхода на поверхность под четвертичные заболоченные отложения, дренируемые небольшими ручьями. Пласт круто погружался в направлении центральной части бассейна.

При погружении пласта существенно уменьшалась водопроницаемость водовмещающих пород и увеличивалась глубина скважин. В проекте работ было предусмотрено бурение профиля скважин для оценки изменения водопроницаемости с глубиной погружения пласта. Поскольку при бурении каждой следующей скважины существенно менялась их глубина в 1966 году было совместно с Л.К.Гохбергом и Б.М.Зильберштейном во Втором Гидрогеологическом Управлении выполнено разведочное моделирование с целью оценки целесообразности дальнейшего бурения скважин при погружении пласта. В результате тестового разведочного моделирования было установлено, что при погружении кровли пласта примерно на 150 м задаваемые параметры перестают влиять на прогнозные решения.

По результатам разведочного моделирования может быть обоснован оптимальный комплекс геолого-разведочных работ или гидрогеологических исследований при проведении инженерных изысканий. Анализ полученных материалов позволяет исключить или существенно сократить затраты на изучение факторов, незначительно влияющих на достоверность прогнозных решений и, напротив, повысить изучение наиболее значимых факторов и параметров.

К сожалению, разведочное моделирование для оптимизации объемов геолого-разведочных или изыскательских работ применяется в редких случаях. Между тем, применение разведочного моделирования позволяет рассмотреть самые разнообразные, в т.ч. аварийные ситуации, которые могут влиять на инженерные решения, их экономические показатели и надежность принимаемых проектных решений на объектах строительства и геологические риски на этапе эксплуатации.

6. Особое внимание следует обратить на изменение качества питьевых подземных вод при эксплуатации, результаты которой противоречат выполненным прогнозам его сохранения. Я уже неоднократно поднимал этот вопрос, т.к. высокая стоимость водоподготовки при использовании, например, обратного осмоса требует дополнительных существенных затрат и, соответственно, повышения тарифов отпуска воды населению.

К сожалению, никаких заметных сдвигов в этом направлении не происходит. Практикуемая методика гидрогеологических работ не позволяет получить необходимые

исходные данные для достоверного прогноза изменения или сохранения качества питьевых вод при эксплуатации.

Для решения этой задачи требуется совершенствование как методики изучения, так и методов прогноза.

Уже много лет предлагается выполнить работу по сопоставлению результатов прогноза качества подземных вод по данным разведки с данными эксплуатации. Она до сих пор не выполнена. Между тем, на государственном учете состоят многие крупные месторождения питьевых подземных вод, благоприятный прогноз качества воды по которым по результатам разведки противоречит данным эксплуатации.

7. Другим направлением повышения достоверности гидрогеологических прогнозов является совершенствование действующей нормативной базы, определяющей объем и состав выполняемых исследований. Это направление является не менее важным, но в отличие от совершенствования методики и технологии гидрогеологических исследований применительно к особенностям и сложности геолого-гидрогеологических условий изучаемого объекта, оно носит не объективный, а субъективный характер.

Не могу не отметить, что за последние десятилетия содержание нормативных документов и требования к результатам гидрогеологических исследований изменились в направлении бюрократизации, т.е. выполнения некоторых часто не имеющих гидрогеологического смысла формальных процедур, взамен требований к содержательному профессиональному поиску наиболее эффективных инженерных решений.

Я не говорю уже о каком-то научном обосновании требований нормативной базы, которое в Советском Союзе выполняли отраслевые институты и, в частности, в Мингео СССР институт ВСЕГИНГЕО.

В качестве одного из ярчайших примеров рассмотрим требования к обоснованию границ различных поясов зоны санитарной охраны водозаборов питьевых подземных вод и их проектированию.

Перечисление наиболее значимых недостатков действующих санитарных норм и правил заняло бы довольно большой объем и требует отдельного рассмотрения.

Отметим лишь наиболее кричащие из них:

- проектирование зоны санитарной охраны (ЗСО) это единственный вид проектирования, для которых не проводятся инженерные изыскания;
- защищенность подземных вод не учитывается при обосновании размеров и границ ЗСО;
- в пределах ЗСО не допускается размещение сооружений по утилизации остаточных продуктов водоподготовки путем их закачки в глубокие водоносные горизонты;

- существующие требования приводят к существенному завышению размеров ЗСО, что вызывает их неоправданно большие размеры и трудности при согласованиях с землепользователями.

Предполагается, что необходимые исходные данные должны быть получены при геолого-разведочных работах для оценки запасов подземных вод. Между тем при подсчете запасов требуется обоснование границ ЗСО, но никаких специальных работ для обоснования исходных данных как границ ЗСО, так и для проектирования не приводится.

8. Особое критическое отношение вызывает состав гидрогеологических исследований при инженерных изысканиях для целей строительства.

Критике их состава и содержания посвящены многие работы М.В.Лехова.

В этом автор данной статьи является его единомышленником.

Их основные недостатки связаны, с нашей точки зрения с тем, что гидрогеологические исследования входят в состав инженерно-геологических изысканий. Но проблема заключается в том, что объектом инженерно-геологических изысканий является площадка строительства, а гидрогеологических и территория за пределами площадки строительства, т.е. зоны влияния дренажа и формирования водопритоков.

При инженерно-геологических исследованиях совершенно не уделяется внимание изучению режима подземных вод, в то время, как при гидрогеологических прогнозах этот вопрос имеет принципиальное значение, особенно при прогнозах подтопления в периоды паводков. Выделение инженерно-гидрогеологических изысканий в отдельный вид инженерных изысканий давно назрела и созрела.

9. Соотношение детальности изучения площадки размещения инженерных сооружений и прогнозирования к ним водопритоков и зоны влияния водоотбора и формирования водопритоков также требует специального рассмотрения не только в вопросах строительства.

Этот вопрос крайне актуален при прогнозировании водопритоков к открытым и подземным горным выработкам при добыче твердых полезных ископаемых.

Обычно все исследования проводятся в пределах горного отвода, ограниченного площадью разработки. Зона влияния водоотлива за пределами горного отвода практически не изучается. Численные модели, используемые для прогнозирования, разрабатываются для всей зоны влияния.

В результате эти модели обеспечены информацией на крайне незначительной площади разработки по сравнению с размерами зоны влияния, не обеспеченной достаточной информацией. Очевидно, что невозможно провести исследования на всей площади формирования водопритоков, но оценить влияние недостаточности имеющейся информации на погрешности прогнозирования и достоверность выполнения прогнозов гидрогеолог обязан.

10. Все приведенные примеры свидетельствуют о необходимости оценки достоверности гидрогеологических прогнозов и возможных масштабах их погрешностей.

Несомненно, достоверность выполненных прогнозных расчетов и их погрешности зависят от объема и достаточности имеющейся в распоряжении гидрогеолога информации. Следовательно, оценка достаточности имеющейся в распоряжении гидрогеолога информации и ее достоверности необходимы для выполнения гидрогеологических прогнозов и последствий ошибок прогнозирования.

Список литературы

1. Биндеман Н.Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. Госгеолиздат, 1963.
2. Боровский Б.В. и др. Опыт разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод в трещинно-карстовых пластах (на примере Пожняель-Седьюского месторождения). Москва, 1970 (Изд. 2 ГУ).
3. Гавич И.К. и др. Использование аналоговых сеточных машин на предварительных стадиях разведки с целью уточнения методики и объемов дальнейших гидрогеологических исследований. Тр. коорд. совещаний по гидротехнике, вып. XXV, Москва, Энергия, 1966.
4. Язвин Л.С. Достоверность гидрогеологических прогнозов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод. Москва, 1972 (Изд. ВСЕГИНГЕО).

УДК 556.3

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОНИЦАЕМОСТИ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ДИСПЕРСИЮ ВЕЩЕСТВА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ (ДОЛИНА Р. ДУНАЙ, УЧАСТОК СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС ПАКШ II)

М.В. Вилькина^{*1,2}, А.М. Никуленков^{1,2}, В.Г. Румынин^{1,2}, Л.Н. Синдаловский^{1,2}

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН, Санкт-Петербург, Россия,

E-mail: wilkina.mari@hgepro.ru

²Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

На основе вариограммного анализа результатов опытно-фильтрационных опробований аллювиального водоносного горизонта проанализированы модели, описывающие макродисперсию вещества в стохастически неоднородной по проницаемости среде. Построены графики одномерных решений $C(x, t)$ при различных функциональных зависимостях $\delta_L(x)$, а также сопоставлены расчетные значения продольной дисперсивности δ_L с ранее опубликованными данными.

Ключевые слова: вариограммы коэффициента фильтрации, макродисперсия, загрязнение подземных вод, ANSDIMAT

IMPACT OF THE ALLUVIAL DEPOSITS' PERMEABILITY ANISOTROPY ON THE DISPERSION IN GROUNDWATER (DANUBE'S RIVER VALLEY, PAKS II NPP CONSTRUCTION SITE)

M.V. Vilkina^{*1,2}, A.M. Nikulenkov^{1,2}, V.G. Rumynin^{1,2}, L.N. Sindalovskiy^{1,2}

¹St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, E-mail: wilkina.mari@hgepro.ru

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

Based on the variogram analysis of the pumping tests' results carried out in the alluvial aquifer, the models describing macrodispersion processes in a stochastically heterogeneous medium have been studied. The plots of the one-dimensional solutions $C(x, t)$ for different functional relationships $\delta_L(x)$ have been plotted. The calculated longitudinal dispersion δ_L values are compared with previously published materials.

Key Words: hydraulic conductivity variogram, macrodispersion, groundwater contamination, ANSDIMAT

Введение

В основании проектируемой АЭС Пакш II лежит достаточно мощная толща обводненных четвертичных отложений, дренирование которых является одним из мероприятий, обеспечивающих инженерную защиту строительства станции. Это обусловило выполнение инженерных изысканий, в том числе, связанных с детальным изучением фильтрационных свойств отложений. Помимо вопросов обоснования строительного и эксплуатационного дренажа, существенное значение имеет определение гидрогеологических параметров, контролирующих миграцию загрязняющих веществ, либо уже присутствующих в подземных водах (следствие эксплуатации первой очереди станции Пакш I), либо веществ, связанных с потенциальными авариями на новых энергоблоках АЭС Пакш II. Верхняя часть гидрогеологического разреза представлена аллювиальным водоносным горизонтом, изучение которого представляет наибольший интерес с позиций оценки химического и радиационного загрязнения подземных вод в районе АЭС.

Методы исследований

Масштабы загрязнения подземных вод в условиях плановой фильтрации определяются конвекцией (действительной скоростью фильтрации, u), фактором сорбционной задержки (R), радиоактивным распадом (константой распада λ), рассеивающими эффектами – дисперсией фронта загрязнения, компоненты которой (D_L и D_T) в «полевых» условиях контролируются пространственной изменчивостью проницаемости пород (проводимости, или коэффициента фильтрации) [5; 9; 10]. Согласно традиционным представлениям, считается, что коэффициенты дисперсии линейно связаны со скоростью u :

$$D_L = \delta_L u, \quad D_T = \delta_T u, \quad (1)$$

где δ_L и δ_T – «макроскопические» аналоги коэффициентов поровой дисперсивности.

Асимптотическое поведение коэффициентов дисперсии. В строгой постановке для описания фильтрации и миграционного процесса (переноса вещества подземными водами) в неоднородных водоносных горизонтах используются стохастические модели, в которых изменчивость коэффициента фильтрации k подчиняется логнормальному закону распределения (т.е. $Y = \ln k$ – функция гауссовского распределения) и характеризуется некоторым корреляционным масштабом l_Y , определяющим тренды пространственной изменчивости данного свойства Y . Их анализ позволяет определить, наряду с эффективной проводимостью [5] в задачах фильтрации, структуру эффективных коэффициентов дисперсии

для построения упрощенных аналитических моделей, учитывающих масштабные эффекты при миграции в гетерогенных средах [3–7].

Коэффициенты дисперсивности, рассчитываемые в рамках представлений о Фиковом характере миграции, являются в общем случае нестационарными функциями [$\delta = f(t)$, или $\delta = f(x)$]. Так, анализ трехмерного процесса в изотропной стохастической среде [3] позволил получить выражения для основных компонент коэффициента дисперсии $D_{ij}(t)$ или дисперсивности $\delta_{ij}(t)$. Для начальных моментов времени ($\tau = ut/l_Y \ll 1$, τ – нормированное время) формулы для коэффициентов продольной и поперечной дисперсивности имеют вид:

$$\delta_L = \frac{8}{15} \sigma_Y^2 ut, \quad \delta_T = \frac{1}{15} \sigma_Y^2 ut. \quad (2)$$

Оба коэффициента линейно связаны с дисперсией $\ln k$, σ_Y^2 , не зависят от корреляционного масштаба и растут пропорционально времени, или, поскольку $ut \approx x$, линейно зависят от расстояния, пройденного концентрационным фронтом в пористой среде:

$$\delta_L = \frac{8}{15} \sigma_Y^2 x, \quad \delta_T = \frac{1}{15} \sigma_Y^2 x. \quad (3)$$

Близкий результат получен в ряде других работ [4; 5; 6; 7]. По прошествии довольно больших периодов времени ($\tau \gg 1$), наблюдается стабилизация коэффициентов дисперсивности, определяемая асимптотикой:

$$\delta_L = \sigma_Y^2 l_Y, \quad \delta_T = \frac{\sigma_Y^2}{8} (\delta'_L + 3\delta'_T), \quad (4)$$

где δ'_L и δ'_T – показатели поровой (микроскопической) дисперсивности.

Анализ 3D процессов в средах с анизотропной корреляционной структурой также может проводиться в рамках асимптотических моделей, подобных (2)–(4) [5].

Одномерные аналитические модели макродисперсии. Существование двух асимптотик послужило для многих авторов стимулом к разработке аналитических моделей, являющихся альтернативой существующим стохастическим моделям посредством масштабирования коэффициентов дисперсии. Хотя такого рода модели конвективной дисперсии носят эмпирический характер, они могут оказаться полезными для описания транспорта, который демонстрирует поведение, зависящее от пространственно-временного масштаба.

Дж. Пикенс и Г. Гризак [8] предложили несколько функций для коэффициента продольной дисперсивности, зависящей от расстояния:

$$D_L(x) = \delta_L(x)u. \quad (5)$$

Данный тип пространственных функций был впоследствии расширен до функций дисперсии, зависящих от времени [2], полагая справедливым выполнение приближенного равенства: $\delta_L(x) \approx \delta_L(ut)$. Преимущество такого преобразования состоит в том, что решения для $\delta_L(t)$ имеют более простой вид [2].

Аналитические решения уравнений конвективной дисперсии для различных моделей дисперсивности $\delta_L(x)$ и $\delta_L(t)$ получаются с помощью преобразований Лапласа или/и Фурье; они представлены специальными функциями или интегралами их включающими. В ряде публикаций решения в замкнутой форме получены с помощью *power series method*. Все упомянутые решения были включены в последнюю версию программного комплекса ANSDIMAT [1]. Например, для определения связи между длиной переноса и коэффициентом дисперсии предлагаются три математических зависимости:

линейная

$$\delta_L = ax; \quad (6)$$

линейная асимптотическая

$$\delta_L = \begin{cases} ax & x \leq x_0, \\ \delta_L^* & x > x_0 \end{cases} \quad (7)$$

экспоненциальная

$$\delta_L = \sigma_y^2 l_y \left[1 - \exp\left(\frac{-ax}{l_y}\right) \right] \quad (8)$$

где a – постоянная, δ_L^* – асимптотический максимум дисперсивности. Эти параметры характеризуют масштабно-зависимый процесс одномерного рассеяния растворенного вещества. Аналитические представления этих параметров связываются с автокорреляционной функцией, характеризующей коррелируемое поле распределения Y – дисперсию $\ln k$, σ_Y^2 , и корреляционный масштаб Y , l_Y .

На практике тип функции дисперсивности, $\delta_L = f(x)$ (или $\delta_L = f(t)$) может быть выбран в соответствии с наблюдаемой взаимосвязью между дисперсией точек концентрационного

распределения, σ_Y^2 , и средним расстоянием x (или временем, t), устанавливаемым в результате полевых трассерных (опытных) опробований или данных мониторинга.

Результаты ОФР и их анализ. В процессе изысканий на площадке строительства АЭС Пакш II было проведено 36 опытных одиночных откачек из скважин на аллювиальный водоносный горизонт, сложенный крупно- и среднезернистыми песками (Рис. 1). Мощность слоя песков достигает 15 м, ниже залегает высоко-проводящая толща, сложенная гравием.

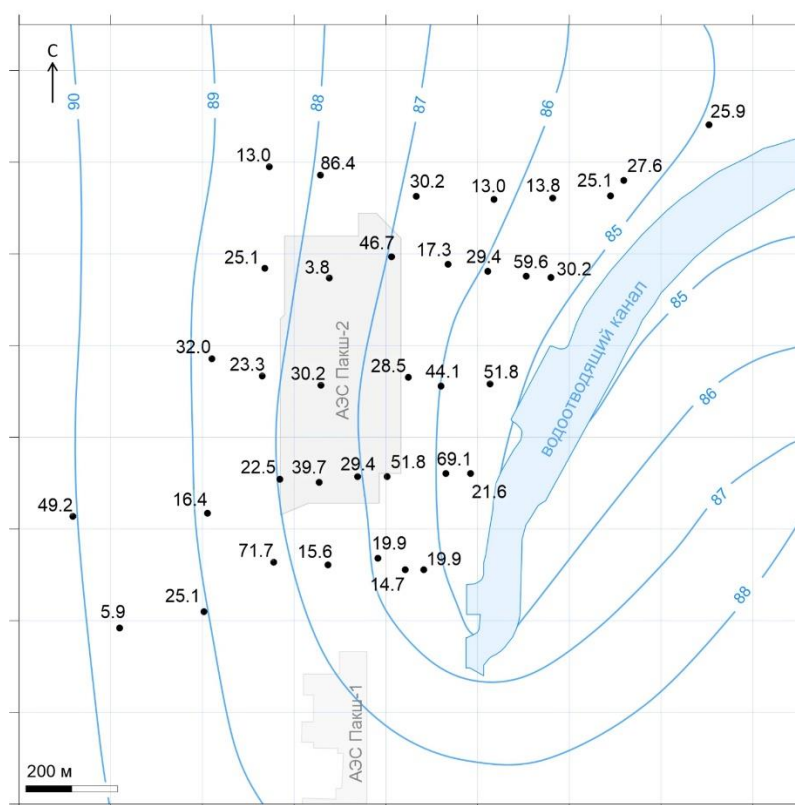


Рис. 1 Карта гидроизогипс аллювиального водоносного горизонта и коэффициенты фильтрации по данным одиночных откачек.

Результаты определения коэффициента фильтрации приведены к основанию натурального логарифма и представлены на графике функции плотности вероятности (Рис. 2).

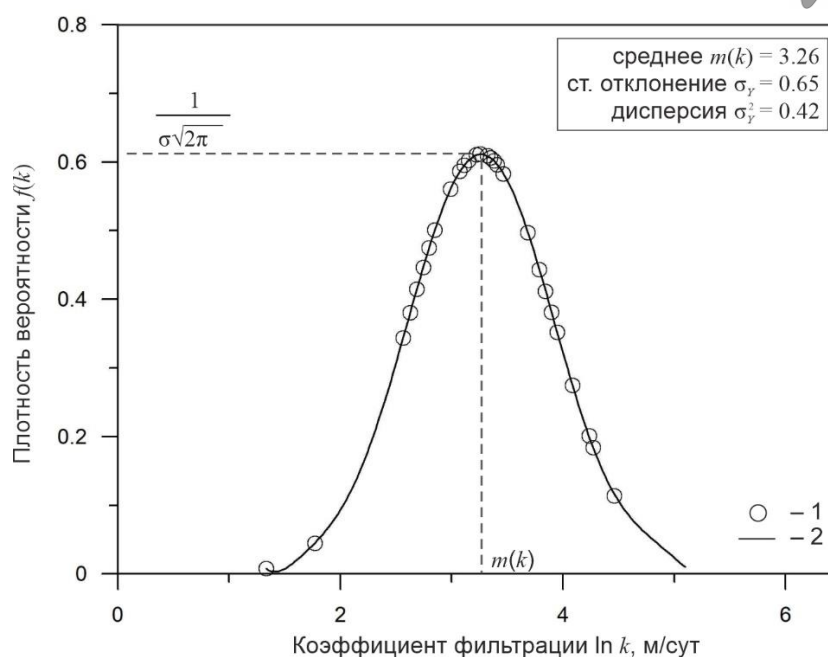


Рис. 2 График функции плотности вероятности

(1 – замеренный коэффициент фильтрации; 2 – функция плотности вероятности).

Как видно из графика, полученные значения обладают свойством логнормального Гауссова распределения и описываются следующим выражением:

$$f(Y) = \frac{1}{\sigma_Y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\frac{1}{2}(Y-m)^2}{\sigma_Y^2}}, \quad (9)$$

где $f(Y)$ – функция плотности вероятности; Y – натуральный логарифм коэффициента фильтрации k ; m – среднее значение логарифма коэффициента фильтрации; σ_Y^2 – дисперсия коэффициента фильтрации; σ_Y – среднеквадратичное отклонение, м/сут.

Так, основные статистические параметры изучаемой толщи принимают следующие значения (в логарифме): дисперсия σ_Y^2 равна 0,42, среднее $m(k)$ равно 3,26. Большое значение дисперсии обусловлено высокой неоднородностью изучаемой толщи. Так, в пределах одного квадратного километра коэффициент фильтрации варьирует от 3,8 до 86,4 м/сут (Рис. 1).

На основе опытных данных была построена экспериментальная неориентированная вариограмма (Рис. 3). В качестве шага (лага) вариограммы принималось среднее расстояние между скважинами, принятое равным 50 м. Экспериментальные данные логарифмов коэффициента фильтрации были аппроксимированы теоретической гауссовой вариограммой. Теоретическая вариограмма принимает следующие значения: дисперсия σ_Y^2 равна 0,42, радиус вариограммы (range) равен 105 м. Отметим, что численная дисперсия, полученная из функции плотности вероятности, равна дисперсии вариограммы.

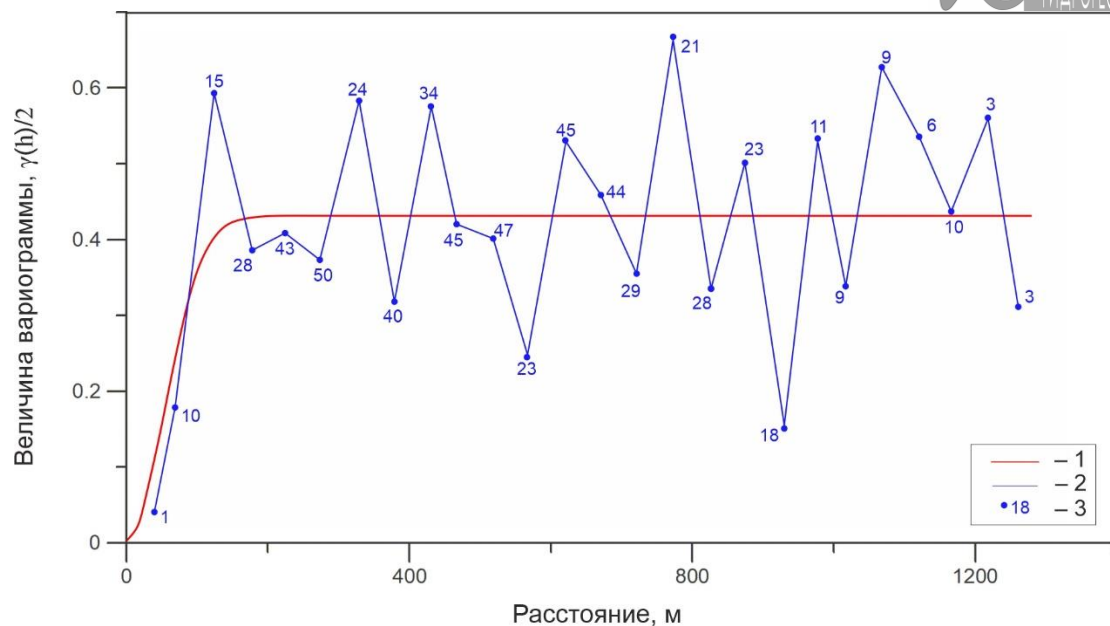


Рис. 3 Экспериментальная и теоретическая вариограммы

(1 – теоретическая вариограмма; 2 – экспериментальная вариограмма; 3 – количество пар скважин, использованных для расчета каждой точки экспериментальной вариограммы).

Результаты и их обсуждение

Проведенный теоретический анализ и полученные экспериментальные результаты позволяют проанализировать влияние стохастической структуры аллювиального водоносного горизонта на характер дисперсии концентрационных фронтов в случае одномерной миграции в плоскопараллельной фильтрационном потоке. Пусть скорость Дарси $v = 0,15$ м/сут, активная пористость $n = 0,25$ ($u = 0,6$ м/сут), мигрирует инертный стабильный компонент. Из анализа вариограммы $\sigma_Y^2 = 0,42$, $l_Y = 35$ м (корреляционный масштаб l_Y равен 1/3 радиуса вариограммы). При построении графиков $C(x)$ (расчетные моменты времени 10, 500 и 5 000 сут) использовались две функциональные зависимости $\delta_L(x)$: линейная (6) и линейная асимптотическая (7) (Рис. 4). Расчеты дополнены $\delta_L = \text{const}$: $\delta_L = \sigma_Y^2 l_Y = 14,7$ м – эта величина является асимптотическим значением в зависимости (7). Структура параметра a в (6) и (7) была определена в терминах стохастической модели изотропной среды для асимптотики Г. Дагана (3) $a = \alpha \sigma_Y^2 = 0,224$ (при $\alpha = 8/15$). Для линейной асимптотической модели параметр x_0 был определен исходя из равенства значений дисперсивностей на пересечении двух участков графика $\delta_L(x)$: $\alpha x_0 = \delta_L^* = \sigma_Y^2 l_Y$ ($a = \alpha \sigma_Y^2$), откуда $x_0 = l_Y / \alpha = 65,63$ м.

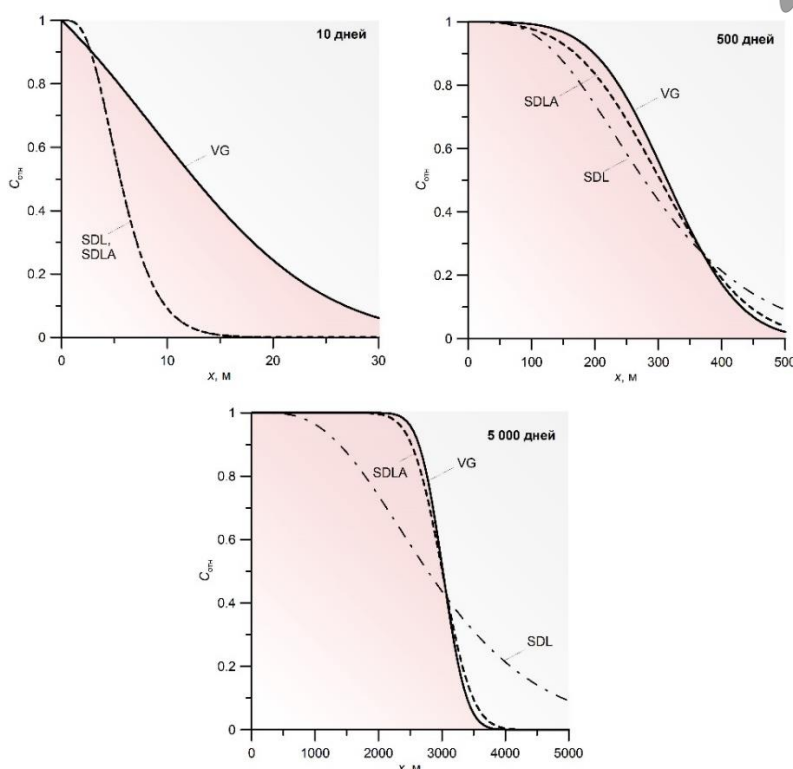


Рис. 4 Влияние вида функциональной зависимости $\delta(x)$ на характер концентрационного фронта вещества в одномерном потоке: штрихпунктирная кривая – линейная функция SDL (6), штриховая кривая – линейная асимптотическая SDLA (7), сплошная кривая – решение с постоянными коэффициентами дисперсивности.

Как видно из графиков, на начальных этапах миграции линейная и линейная асимптотическая модели дают весьма близкие результаты, которые, однако, сильно отличаются от расчетов с использованием решения с постоянным асимптотическим коэффициентом дисперсивности $\delta_L = \sigma_Y^2 l_Y$. Со временем происходит сближение кривых распределения с этим решением. На больших временах фронт загрязнения для линейной модели выглядит значительно более размытым, нежели при использовании моделей с постоянным коэффициентом дисперсивности или линейных моделей с асимптотикой.

Заключение

При пространственных масштабах переноса загрязнения в аллювиальном водоносном горизонте долины р. Дунай на изучаемом участке строительства Пакш II, измеряемых сотнями метров и временем до нескольких лет, рассеяние вещества контролируется масштабными эффектами – зависимостью коэффициента дисперсии от расстояния или времени нахождения загрязнения в подземных водах. Анализ вариограммы коэффициента фильтрации позволяет предположить, что предпочтительной для миграционных расчетов должна быть линейная модель для коэффициента $\delta_L(x)$ (6). Ее близость с линейной асимптотической моделью (7)

объясняется сопоставимостью значений пороговой характеристики x_0 с длиной фронта переноса за рассмотренный промежуток времени (около трех лет).

Наконец, зависимости (7) и (8) при коэффициентах σ_Y^2 и l_Y , найденных при помощи стохастического анализа опытных откачек на площадке АЭС Пакш II, не противоречат общему тренду опытного материала, обобщенного в статье [9] (Рис. 5).

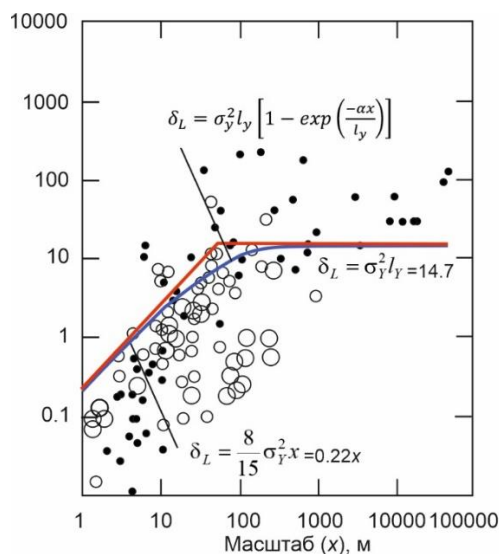


Рис. 5 Влияние масштаба миграционного процесса на эффективное значение продольной дисперсивности, δ_L для неконсолидированных разностей пород [9] (Размер кружков пропорционален надежности определений δ_L).

Однако, как видно, в аллювиальном горизонте на участке Пакш II следует ожидать более высокую степень рассеяния загрязняющего вещества по сравнению с величиной, рассчитанной по «среднестатистическим» данным.

Список литературы

1. Синдаловский Л.Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT / СПб.: Изд-во Наука, 2021. 891 с.
2. Basha, H.A., El-Habel, F.S. 1993. Analytical solution of one-dimensional time-dependent transport equation. Water Resources Research, Vol. 29, No. 9, p. 3209-3214.
3. Dagan, G. Flow and Transport in Porous Formations. Berlin, N. Y. Springer-Verlag Heidelberg, 1989. 465 p.
4. Dagan, G. Theory of solute transport by groundwater // Ann. Rev. Fluid Mechanic. 1987. Vol. 19. P. 183–215.
5. Gelhar, L.W. Stochastic subsurface hydrology. Prentice-Hall Inc, Englewood Clift, New Jersey. USA, 1993. 390 p.
6. Gelhar, L.W., Axness C.L. Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers // Water Res. Res. 1983. Vol. 19. N 1. P. 161–180.

7. Neuman, Sh. P., Zhang, Y.K. A quasi-linear theory of Non-Fickian and Fickian subsurface dispersion // Water Res. Res. 1990. Vol. 26. N 5. P. 887–902.
8. Pickens, J.F., Grisak, G.E., 1981b. Modeling of scale-dependent dispersion in hydrogeologic systems. Water Resour. Res. 17 (6), 1701–1711.
9. Schulze-Makuch, D. 2005. Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior, Ground Water, 43(3), 443–456, doi:10.1111/j.1745-6584.2005.0051.x.
10. Zech, A., Attinger, S., Cvetkovic, V., Dagan, G., Dietrich, P., Fiori, A., Rubin, Y., Teutsch, G. 2015. Is unique scaling of aquifer macrodispersivity supported by field data?, Water Resources.

УДК 556.38

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Г.Е. Ершов¹, О.А. Олиферова^{*1}, А.Л. Язвин¹

¹АО «ГИДЭК», Москва, Россия, E-mail: ershov@hydec.ru, olga.oliferoval@gmail.com, alyazvin@hydec.ru

Аннотация

Анализ опыта применения геофильтрационного и геомиграционного моделирования при проведении оценки запасов подземных вод с использованием постоянно-действующих, региональных и локальных моделей показал, что в настоящее время существует значительный разрыв между высокотехнологичными расчетными программными комплексами и достаточно ограниченным информационным обеспечением природных моделей и соответствующих им расчетных схем. В связи с этим, очевидна актуальность восстановления региональных наблюдательных сетей и придания им юридического статуса, необходимо законодательно закрепить требования к ведению эксплуатационного мониторинга на участках добычи подземных вод. Постановка опытно-фильтрационного опробования и геомиграционных опытов требует не формального подхода, нацеленного на определение чувствительных к прогнозным уровням параметров водоносных и слабопроницаемых горизонтов.

Ключевые слова: численная модель, месторождение подземных вод, водоотбор, геофильтрация

THE CURRENT STATE OF APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION FOR THE PURPOSE OF ESTIMATING GROUNDWATER RESERVES

G.E. Ershov¹, O.A. Oliferoval^{*1}, A.L. Yazvin¹

¹HYDEC, Moscow, Russian Federation, E-mail: : ershov@hydec.ru, olga.oliferoval@gmail.com, alyazvin@hydec.ru

Abstract

After analysing the experience of using flow and transport modelling to assess groundwater reserves through continuous operation of regional and local models, it was found that there is currently a significant gap between high-tech computational software systems and the rather limited information support available for conceptual models and their corresponding design computational schemes. Therefore, it is urgent to restore regional observation networks and give them legal status. It is necessary to legislate the requirements for conducting operational monitoring at groundwater extraction sites.

Non-standard approaches are required to determine the parameters of aquifers and aquitards that are sensitive to predicted levels in hydraulic tests and transport tests.

Key Words: numerical model, groundwater deposit, water sampling, groundwater flow

Введение

Крупные прикладные гидрогеологические задачи для целей оценки ресурсного потенциала и запасов подземных вод, обоснования систем водопонижения на месторождениях твердых полезных ископаемых, а также для ведения регионального мониторинга подземных вод в настоящее время решаются с применением численного математического моделирования. В соответствии с поставленной гидрогеологической задачей разрабатываются геофильтрационные и геомиграционные модели разного масштаба – региональные и детальные (локальные).

Региональные постоянно-действующие модели (ПДМ) для территорий, характеризующихся масштабным освоением ресурсов подземных вод и сложными гидрогеологическими условиями с целью оценки запасов для большого количества водозаборов одного или нескольких недропользователей (в основном для крупных городских территорий). На таких моделях возможно выполнение геофильтрационных и геомиграционных расчетов для разных этапов развития водохозяйственной обстановки территории, при этом модели актуализируются и детализируются при изучении новых водозаборных участков. На каждом из последующих этапов изучения месторождения подземных вод прогнозное моделирование при оценке запасов для разных участков выполняется относительно уровней подземных вод, полученных при калибровке модели на период текущей оценки запасов.

Удачным примером длительного функционирования ПДМ является модель Казанского региона, разработанная АО «ГИДЭК» в 1999г. для выполнения оценки запасов подземных вод Столбищенского месторождения для водоснабжения г. Казани. Впервые по результатам геофильтрационного и геомиграционного моделирования на этой модели в 2002 г. были утверждены запасы подземных вод Столбищенского месторождения в количестве 212,2 тыс.м³/сут с прогнозом качества подземных вод в условиях подтока соленоватых вод из нижних горизонтов. Затем модель использовалась для подсчета запасов нескольких месторождений в пределах Казанского региона: Смартситинское (12,0 тыс.м³/сут – 2014 г.), Пригородное (20,0 тыс.м³/сут - 2015 г.), Акинское (9,7 тыс.м³/сут - 2016 г.), Азинское (7,1 тыс.м³/сут - 2018 г.), Танкодромное (9,5 тыс.м³/сут – 2019 г.), Северо-Царевское (5,7 тыс.м³/сут - 2023 г.). При этом, на каждом из этапов изучения этих месторождений по результатам их разведки детализировались и актуализировались отдельные части общей модели региона (модели–врезки каждого из месторождений).

До некоторого времени в качестве ПДМ функционировала региональная модель центральной части Московского артезианского бассейна, разработанная компаниями ЗАО

«Геолинк Консалтинг» и АО «ГИДЭК» в 2002 г., ведение модели до 2017 г. осуществлялось АО «Геоцентр-Москва».

Региональные модели для единовременной оценки запасов подземных вод, характеризующие состояние потока подземных вод разрабатываются для определенного периода водохозяйственной обстановки. Полученные при этом результаты решения прогнозных задач могут быть использованы только для оценки запасов подземных вод месторождения по состоянию на период проведения разведочных работ. Достаточно часто полученные при моделировании на таких моделях прогнозные депрессионные воронки используются для получения «прогнозных срезов» при проведении последующих оценочных работ на этом месторождении. Такой прием правомерен, если доказано, что водохозяйственная обстановка (дебиты всех работающих на территории месторождения водозаборов) в течение периода между двумя оценочными работами оставалась неизменной. Кроме того, должно быть показано, что прогнозная схема распределения эксплуатационных нагрузок на территории месторождения (ранее оцененные запасы подземных вод и разрешенный водоотбор по участкам водозаборов) не изменилась со времени первой оценки запасов. В некоторых случаях необходимость учета явно превышенного разрешенного водоотбора и величин ранее оцененных несколько десятилетий назад запасов подземных вод, которые используются только на 30-50% приводит к ситуации, когда на оцениваемом участке водозабора расчетные понижения превышают допустимые и соответственно запасы подземных вод не могут быть обоснованы в количестве заявленной потребности. Такая ситуация сложилась при оценке запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Рязани (2013 г.). В пределах Рязанского месторождения суммарная величина ранее утвержденных запасов по всем водозаборным участкам месторождения составила 212,4 тыс. м³/сут, а величина суммарного водоотбора по г. Рязани и его окрестностям – 93,7 тыс.м³/сут. В тоже время, разрешенный лицензиями суммарный водоотбор по месторождению составлял 307,3 тыс. м³/сут и значительно превышал как оцененные запасы, так и современный водоотбор. Это связано с тем, что в 90-е годы прошлого века совершенно не обосновано были выданы лицензии на добычу подземных вод по некоторым водозаборам: «Водстрой» - 30,0 тыс.м³/сут, «Диниса» - 25,0 тыс.м³/сут, «Чистые воды» - 30,0 тыс.м³/сут. Задание в модели таких прогнозных величин водоотбора не дало возможность обосновать в северо-восточной части месторождения необходимую величину запасов по нескольким участкам Водоканала г. Рязани. В настоящее время ставятся работы по переоценке запасов Рязанского месторождения в условиях окончания действия лицензий по трем водозаборам с суммарным разрешенным водоотбором 85,0 тыс.м³/сут, что даст возможность увеличить запасы по водозаборам Водоканала г. Рязани.

Региональные модели для решения задач оценки запасов в сложных гидрогеологических и водохозяйственных условиях разработаны АО «ГИДЭК» в основном для территорий крупных городов Тамбов, Тюмень, Сургут, Брянск, Казань, Рязань, Липецк, Воронеж, Тверь.

Локальные модели разрабатываются для решения задач на отдельных участках месторождений, имеющих сложное гидрогеологическое строение, сложные гидрогеохимические условия, резкое внутригодичное изменение уровней и баланса подземных вод, что определяет необходимость учитывать при оценке запасов гидродинамические, гидрогеохимические и природоохранные ограничения. Приведем некоторые примеры.

Задачи с гидродинамическими ограничениями:

оптимизация схемы проектного водозабора на Троицком месторождении в Краснодарском крае в условиях прогнозируемого осушения целевого четвертичного водоносного горизонта при высокой перспективной потребности;

прогнозирование работы водозаборов в сквозных таликах в областях развития многолетнемерзлых пород в период привлечения емкостных запасов при отсутствии поверхностного стока в промерзших реках - Омчакское, Ергалахское, Амбарнинское месторождения подземных вод;

обоснование прогнозной схемы водоотбора подземных вод с ограничением величины водоотбора в меженный период (пересыхание рек) на участках горных рек Черноморского побережья (р.р. Дюрсо, Адерба).

Задачи с гидрогеохимическими ограничениями:

гидрогеохимический прогноз работы водозабора г. Элиста в природной линзе пресных подземных вод, сформировавшейся среди соленых вод, оптимизация схемы расположения эксплуатационных скважин и их дебитов для исключения подтягивания соленых вод;

оптимизация работы водозаборов для водоснабжения города Казань в условиях подтягивания жестких вод из нижних частей гидрогеологического разреза при интенсивной эксплуатации неоген-четвертичного водоносного горизонта палеодолины;

обоснование схемы дренажной системы на территории Новолипецкого металлургического комбината, предназначенной для защиты реки от техногенного загрязнения;

оценка возможного влияния техногенного загрязнения подземных вод среднефаменского водоносного горизонта органическими соединениями на участке ОАО «Пигмент» (г. Тамбов) на работу водозабора «Красненский» показала, что загрязнение из прудов-отстойников не достигает водоносный горизонт при перетекании загрязненных подземных вод через разделяющий пласт.

Задачи с природоохранными ограничениями:

оценка влияния снижения уровней подземных вод на водный баланс поверхностных вод при эксплуатации проектных водозаборов на Приокском месторождениях подземных вод;

обоснования системы эксплуатации водозабора подземных вод с искусственным пополнением запасов (возврат части водоотбора в реки) на территории Пушкинского месторождения (Приморский край) для сохранения санитарного стока рек в меженный период (рыбоохранные ограничения);

оценка влияния работы проектного Зеленодольского водозабора (республика Татарстан) на изменение водного баланса озер и растительность на территории Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника показала, что фильтрационные потери из озер составляющие около 2% от объема воды в озерах будут ежегодно компенсироваться в период прохождения паводка, угнетения гидроморфной растительности в долинах рек не будет происходить в связи с ежегодным восполнением запасов зоны аэрации, а тем более, проектный водоотбор не повлияет на произрастание автоморфной растительности на водораздельных участках.

Обширный опыт применения моделирования геофильтрации и геомиграции компанией АО «ГИДЭК» для целей оценки запасов подземных вод показывает, что в настоящее время существует значительный разрыв между высокотехнологичными расчетными программными комплексами и достаточно «скудным» информационным обеспечением природных моделей и соответствующих им расчетных схем. При этом, развитие компьютерной техники позволяет в разумные временные сроки решать нелинейные задачи (для чего уже существуют и современные программные средства, такие как TOUGH, PH-KIN, FEFLOW и др.) с учётом многофазности потоков, например, воды, газа и нефти, или с учётом зависимости вязкости от температуры, рассматривать неполную влагонасыщенность в зоне аэрации и др. Однако, обоснование параметров таких моделей полевыми и лабораторными измерениями (а порой даже и достаточно достоверными справочными данными), особенно учитывая масштабные эффекты, остаётся весьма и весьма невысокой. Поэтому использование такого рода программных комплексов с практическими целями, а не с целями научного анализа, в ряде случаев может быть не только нецелесообразно, но и довольно опасно. Полноценный геологический и гидрогеологический анализ при возможном упрощении расчётных моделей даже в весьма сложных условиях зачастую может дать гораздо более достоверные оценки, чем формальный, пусть даже и даже полуавтоматический, перебор нескольких десятков различных мало обоснованных параметров.

Практически все модели месторождений подземных вод в настоящее время разрабатываются на основе обширных материалов целенаправленных разведочных работ 60-х-80-х годов прошлого столетия, включавших бурение, кустовые и эксплуатационные откачки, режимные наблюдения в специально пробуренных ярусных кустах скважин, наземную и скважинную геофизику, миграционные опыты и изотопные исследования. Современные материалы представлены, как правило, результатами обследования участков, опробованием

существующих скважин (кратковременные одиночные откачки, каротаж), режимными наблюдениями в течение одного года в скважинах водозабора и материалами мониторинга по одному-двум кустам региональной сети мониторинга, гидрологическими наблюдениями и данными гидрогеохимического опробования. Схематизация природных условий выполняется, таким образом, как правило, по фондовым материалам и несколько «актуализируется» с использованием отдельных современных материалов. Процесс калибровки разработанных геофильтрационных и геомиграционных схем базируется на результатах решения обратных задач. Здесь необходимо отметить, что методика автоматической калибровки моделей в последние годы продвинулась далеко вперед и стала применяться значительно чаще, чем в предыдущее десятилетие. И в этом следует особо отметить важную роль в этом процессе сотрудников кафедры гидрогеологии МГУ. Вместе с тем, при распространении практики её использования, следует делать особый акцент на внимательной и геологически обоснованной схематизации в процессе создания концептуальных моделей месторождений, поскольку кажущаяся лёгкость такого рода процедур в ряде случаев приводит к формальному подходу и принципиально неверному построению моделей, противоречащих геологическим предпосылкам формирования потока подземных вод месторождений.

Достоверность получаемых в процессе калибровки величин параметров и граничных условий непосредственным образом зависит от наличия и достоверности сведений о фактическом водоотборе и уровнях подземных вод.

Водоотбор, как правило, задается по данным статистической отчетности недропользователей и обычно не соответствует действительности, вследствие сознательного занижения, отсутствия приборов учета и других причин. Данный вопрос был детально проработан при создании региональной модели центральной части Московского артезианского бассейна (2002 г.). Как известно, ее калибровка была выполнена на основе данных середины 1980-х годов, что объяснялось максимальным за весь период эксплуатации отбором подземных вод, наибольшей степенью достоверности информации о его величине, а также наличием достаточно большого объема информации о положении уровня подземных вод в наблюдательных скважинах.

По официальным сведениям, отбор подземных вод в Московском регионе был максимальным во второй половине 1980-х годов и составлял 4,2 млн. м³/сут. В 2001 г. по данным отчетности он уменьшился до 3,1 млн. м³/сут. Однако, согласно выполненным в инверсной постановке расчетам, величина «восстановленного» на модели водоотбора 2001 г. составила практически те же самые 4,0 млн. м³/сут, из чего следует вывод о недостоверности отчетных данных. Таким образом, было установлено превышение фактического отбора над отчетным в целом по области на 30%, а на отдельных территориях в 1,5 раза и более.

Сформированные еще в 1960-80-е годы прошлого века нормативно-методические документы содержат требование учета взаимодействия отбора подземных вод на оцениваемом участке и на всех участках с запасами. Величины ранее утвержденных запасов подсчитывались применительно к заявленной потребности, которая базировалась на не оправдавшихся ожиданиях существенного роста как общего, так и душевого водопотребления. В результате, в течение нескольких десятилетий возрастал разрыв между фактическим и планируемым водоотбором, что приводит к крайне низкой достоверности прогноза состояния подземных вод за счет «фиктивного» взаимодействия. Это препятствует экономически эффективному освоению недр, т.к. прогнозы оказываются намного более жесткими, чем реально наблюдаемая картина, а проекты новых водозаборных узлов - нерациональными и более дорогостоящими.

Единственным источником сведений по уровням подземных вод, в результате завершающегося процесса «естественной» ликвидации государственной наблюдательной сети, являются материалы объектного мониторинга, которые, как правило, характеризуют режим только на участках действующих водозаборов.

Постановка опытно-фильтрационного опробования и геомиграционных опытов требует не формального подхода, нацеленного на определение чувствительных к прогнозным уровням параметров водоносных и слабопроницаемых горизонтов, а также значительных средств и возможностей для проведения длительных и сложнопостроенных опытов. Достаточно продуктивным является интерпретация методом моделирования «групповых» откачек, которые проводились при разведке месторождений в 70-80 годов.

Таким образом, можно сделать вывод, что современные материалы не могут служить основой разработки моделей крупных территорий в интенсивно эксплуатируемых районах, поскольку имеющиеся данные недостаточны и недостоверны. Классической схемой калибровки геофильтрационных моделей является воспроизведение структуры потока на момент разведки, при максимальном водоотборе и на период работ по переоценке запасов. Анализ представительных данных, характеризующих, по возможности, минимальный (в пределе – в естественных условиях) и максимальный отбор на изучаемой территории, позволяет установить зависимость между расходом и изменением уровней, что необходимо для проведения прогнозных расчетов.

В свете изложенного очевидна также актуальность восстановления наблюдательных сетей и придания им юридического статуса. Декларируемая необходимость ведения эксплуатационного мониторинга на участках добычи подземных вод, в том числе - наличия соответствующих приборов учета, должна быть подкреплена положениями законодательства, обеспечивающими соблюдение этих требований недропользователями.

УДК 556.3+550.34

СЕЙСМОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ: ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА И МИРА

Г.Н. Копылова*¹, С.В. Болдина¹

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», Камчатский филиал, Петропавловск-Камчатский, Россия, E-mail: gala@emsd.ru

Аннотация

Проводится анализ сейсмогидрогеологических эффектов (СГГЭ), зарегистрированных в изменениях уровня и химического состава воды в пьезометрических и самоизливающихся скважинах при сильных землетрясениях на основе унифицированного методического подхода, учитывающего параметры землетрясений (магнитуда, удаленность), интенсивность сейсмического воздействия в районе наблюдений (балльность, плотность сейсмической энергии в волне) и зональность расположения наблюдательной скважины по отношению к области очага землетрясения с учетом его размера. Основу работы составляют результаты *многолетних прецизионных* наблюдений в сейсмоактивных регионах. Основное внимание уделяется аномальным изменениям давления и химического состава подземных вод перед землетрясениями или гидрогеологическим предвестникам (ГП). В скважинах Камчатки ГП проявлялись в течение времени от 1 до 9 месяцев перед землетрясениями с магнитудами $M_w = 6,6-7,8$. При этом отношение расстояния от скважины до эпицентра к максимальному линейному размеру очага землетрясения (в км) составляло не более 1–5. Приводятся результаты 20-летнего эксперимента по диагностике ГП в изменениях давления воды в пьезометрической скважине Е-1 (Камчатка) в режиме реального времени с выдачей еженедельных заключений о наличии/отсутствии ГП в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений.

Ключевые слова: скважина, режим подземных вод, сейсмогидрогеологические эффекты, предвестники землетрясений

SEISMOHYDROGEOLOGICAL PHENOMENA: REVIEW OF THE WELL OBSERVATIONS IN THE KAMCHATKA PENINSULA AND THE WOLD

G.N. Kopylova*¹, S.V. Boldina¹

¹Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KB GS RAS), Petropavlovsk–Kamchatsky, Russian Federation, E-mail: boldina@emsd.ru

Abstract

The generalization of the data on seismohydrogeological effects (SHGE) recorded in water level in piezometric wells and in chemical composition of groundwater changes of self-flowing wells during strong earthquakes are presented. The work is based on the results of long-term precision observations in seismically active regions. Particular attention is paid to the rare phenomenon of hydrogeological precursors (HP) in changes in pressure and chemical composition of groundwater before earthquakes. The various types of SHGE in individual wells are considered on the basis of a unified methodological approach, taking into account the parameters of earthquakes (magnitude, distance) and the intensity of seismic impact in the observation area. It has been established that HP manifested in wells of Kamchatka during the period from 1 to 9 months before earthquakes with magnitudes $M_w = 6.6-7.8$ at a ratio of the epicentral distance to the observation well to the maximum linear size of the earthquake source no more than 1–5. The results of a 20-year experiment on diagnosing HP in groundwater pressure changes in the well E-1 in real time with the issuance of weekly conclusions on the presence/absence of HP to the Kamchatka branch of the Russian Expert Council for Earthquake Prediction are presented.

Key Words: well, groundwater regime, seismohydrogeological effects, earthquake precursors.

Введение

Наблюдения в скважинах с целью изучения влияния сейсмичности в изменениях параметров подземных вод проводятся в течение многих десятилетий в сейсмоактивных районах мира. Большая часть таких данных представлена измерениями уровня (давления) подземной воды, реже измерялись концентрации компонентов ионного и газового состава воды. Описания гидрогеологических эффектов, зарегистрированных при землетрясениях, приводятся в [9; 10] и других публикациях. Ниже они называются «сейсмогидрогеологическими эффектами» (СГГЭ) и разделяются на гидрогеологические предвестники (ГП), ко- и постсейсмические эффекты. Авторы систематически занимались сбором таких данных, полученных при проведении наблюдений в скважинах на территории полуострова Камчатка [1-8] с привлечением данных о гидрогеохимических предвестниках в различных регионах Мира [3; 5]. Обобщение таких данных осуществлялось с использованием оригинального способа единообразного представления совокупности зарегистрированных типов СГГЭ, выделенных в отдельных наблюдательных скважинах, в сопоставлении с величинами магнитуды и удаленности землетрясений, а также интенсивности сейсмического воздействия в районе наблюдений. Рассмотрение различных типов СГГЭ для отдельных скважин позволяет учитывались локальные геолого-гидрогеологические условия в пунктах наблюдений, технические особенности строения скважин, а также региональные сеймотектонические различия регионов. Единообразие подхода к анализу гидрогеологических материалов о СГГЭ обеспечивалось

использованием данных о землетрясениях из международного каталога NEIS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>).

На примере скважины Е-1, представлены результаты многолетнего эксперимента по мониторингу ГП в изменениях давления воды в режиме реального времени, которые показывают возможность практического использования данных прецизионных наблюдений в скважинах в региональной системе прогнозирования сильных землетрясений.

Методы исследований и результаты

На рис. 1, на примере данных наблюдений за химическим составом воды из трех самоизливающихся скважин и за вариациями уровня/давления подземной воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, представлены выделенные типы СГГЭ, включая гидрогеологические предвестники (ГП показаны звездами), в зависимости от параметров землетрясений: магнитуды M_w , эпицентрального расстояния d_e , плотности сейсмической энергии e , максимального линейного размера очага землетрясения L , км. Наблюдательные скважины вскрывают напорные пресные и солоноватые холодные и слаботермальные подземные воды на глубинах 300–2500 м в скальных водовмещающих породах. Периодичность наблюдений за химическим составом подземных вод составляла 3–6 суток, за вариациями уровня (давления) – от 10 мин до 10 Гц. Рассматривались три вида СГГЭ: (1) – гидрогеодинамические и гидрогеохимические предвестники отдельных землетрясений, проявляющихся в нескольких ($n \geq 2$) скважинах; (2) – косейсмические скачки в изменениях давления воды при местных землетрясениях в течение минут после вступления сейсмических волн и (3) – четыре типа вибрационных эффектов сейсмических волн в изменениях уровня воды [4].

Гидрогеологические предвестники проявлялись в скважинах, расположенных в ближней и средней (промежуточной) зонах очагов землетрясений, для которых величины $d_e/L = 1–3,5$. Время и заблаговременность проявления ГП перед такими землетрясениями составляли от 1 до 9 месяцев. Проявление ГП перед наиболее сильными землетрясениями являются показателями связи между ГП и процессами подготовки таких землетрясений и является косвенным свидетельством практической значимости скважинных наблюдений в системе регионального сейсмического прогнозирования. Количественные оценки связи ГП и других видов СГГЭ с параметрами землетрясений (Рис. 1) могут использоваться в исследованиях гидрогеологических систем и других полей Земли при подготовке и реализации землетрясений.

ГП в форме понижения воды с повышенной скоростью (Рис. 2) используется для составления прогнозов землетрясений по данным текущих наблюдений на скважине Е-1.

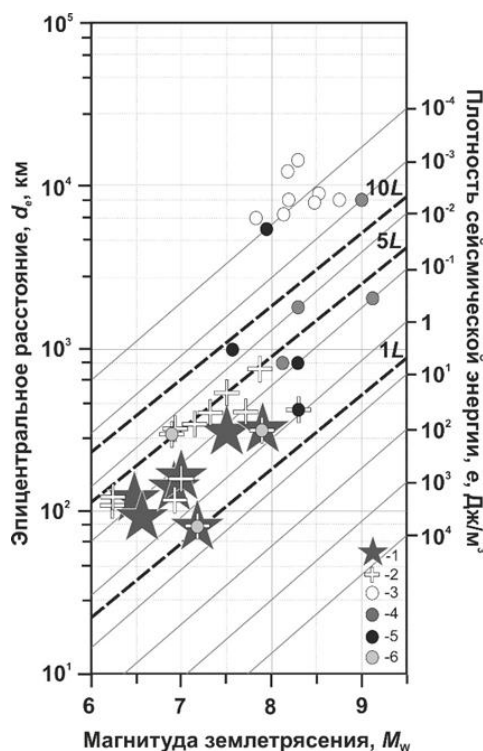


Рис. 1 Распределение проявлений ГП в нескольких скважинах (1), а также косейсмических скачков давления воды (2) и различных типов вибрационных эффектов сейсмических волн (3-6): 3 – тип I (колебания), 4 – тип II (колебания и кратковременное повышение давления), 5 – тип III (кратковременное повышение давления), 6 – тип IV (длительное понижение давления), в зависимости от величин магнитуды M_w и эпицентральных расстояний землетрясений до скважин d_e .

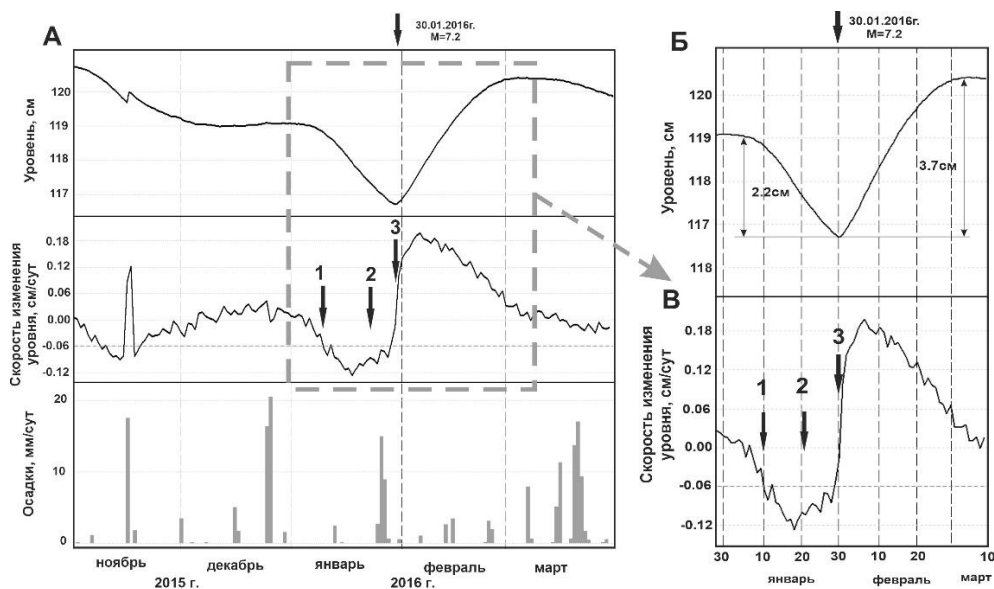


Рис. 2 Скважина Е-1: ГП в изменениях уровня воды и его суточной скорости перед Жупановским землетрясением: 1 – начало проявления ГП, 2 – подача прогнозного заключения в КФ РЭС, 3 – землетрясение.

Заключения о наличии или отсутствии ГП передаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС) [1; 2; 7]. Заблаговременность проявления гидрогеодинамического предвестника землетрясений с магнитудами ≥ 5 на расстояниях $d_e \leq 350$ км составляет сутки – недели, что позволяет оповещать специализированные советы по прогнозу землетрясений о возможности сильного землетрясения по данным наблюдений в скв. Е-1. С 2022 г. авторами в сотрудничестве с Камчатским филиалом РЭС проводится эксперимент по использованию этого вида ГП для прогнозирования землетрясений в реальном времени путем составления еженедельных заключений о наличии/отсутствии ГП по текущим данным наблюдений.

Заклучение

Получены оценки параметров землетрясений и интенсивности их воздействия в районе наблюдений при проявлении гидрогеологических предвестников в нескольких ($n = 2-4$) скважинах Камчатки: $M_w = 6,5-7,8$, $d_e = 80-300$ км, $e \geq 0,1$ Дж/м³, $I_{MSK-64} \geq 4-6$ баллов. Время и заблаговременность проявления ГП перед такими землетрясениями составляли от 1 до 9 месяцев. Скважины, в которых проявлялись ГП, расположены в ближней и средней (промежуточной) зонах очагов землетрясений, для которых величины $d_e/L = 1-3,5$. Установленные связи проявлений ГП с параметрами землетрясений могут использоваться в исследованиях природных гидрогеологических систем при подготовке и реализации землетрясений, а также других полей Земли, связанных с изменениями в водонасыщенной среде сейсмоактивных регионов.

Главным результатом многолетнего эксперимента (2002 г. – настоящее время) по использованию ГП в изменениях уровня воды в скважине Е-1 для прогнозирования землетрясений являются успешные (по заключениям КФ РЭС) прогнозы семи землетрясений с $M = 5.3-7.2$, из которых пять событий имели величины магнитуд 6,4–7,2. Перед землетрясением 3 апреля 2023 г., $M_w = 6,6$, $d_e = 70$ км, $I_{MSK-64} = 5-6$ баллов в г. Петропавловске-Камчатском, ГП также был выявлен в реальном времени.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23 и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Список литературы

1. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977-2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3-20.
2. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ООО «Камчатпресс». 2019. 144 с.
3. Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю., Болдина С.В. Гидрогеохимические предвестники землетрясений (на примере районов полуострова Камчатка, Россия, и Республики Узбекистан) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2000. №4. Вып. 48. С. 5-20.
4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. 2020. № 4. С. 102-122.
5. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Серафимова Ю.К. Предвестники землетрясений в изменениях ионного и газового состава подземных вод: обзор мировых данных // Геохимия. 2022. Т.67. № 10. С. 921-941.
6. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Сейсмогидрогеологические эффекты как проявление триггерного воздействия землетрясений на подземные воды (на примере скважин Петропавловск-Камчатского полигона, полуостров Камчатка) // Физика Земли. 2023. № 3. С. 78-95.
7. Kopylova G. and Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula // Front. Earth Sci. 2020. 8:576017.
8. Kopylova G., Boldina S. Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model // Minerals. 2021. 11, 731.
9. Wang, C-Y.; Manga, M. Earthquakes and Water. Lecture Notes in Earth Sciences / Germany: Springer Berlin, 2010. 225 p.
10. Wang Ch.-Y., Manga M. Water and Earthquakes. Lecture Notes in Earth System Sciences / Switzerland: Springer Cham, 2021. 387 p.

УДК 550.34.097

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОТКЛИКИ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ТУРЦИИ 6 ФЕВРАЛЯ 2023, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ НА ТЕРРИТОРИИ ГФО «МИХНЕВО»

С.М. Петухова*¹, А.Н. Беседина¹, Э.М. Горбунова¹

¹Институт динамики геосфер имени М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия.

E-mail: sofya.petukhova@gmail.com

Аннотация

В статье представлены результаты регистрации на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» гидрогеологических откликов на землетрясения, произошедшие 6 февраля 2023 г. в Турции с магнитудами 7,8 и 7,7. Высокоточные измерения выполняются в двух скважинах глубиной 60 и 115 м, оборудованных на верхний слабонапорный водоносный горизонт и нижний напорный водоносный горизонт. Амплитуды косейсмических вариаций порового давления при прохождении сейсмических от двух землетрясений с максимальными значениями скорости 2,2 и 2,6 мм/с составили 554 и 1400 Па в верхнем горизонте, 59 и 78 Па – в нижнем горизонте соответственно. Постсейсмические эффекты в виде увеличения порового давления в нижнем горизонте на 25,9 и 18,1 Па установлены при двух землетрясениях, в верхнем горизонте – прослежено только при втором землетрясении и составило 45 Па. Реакция водонасыщенного коллектора на сейсмическое воздействие зависит от гидрогеологических параметров. Верхний слабонапорный водоносный горизонт характеризуется более высокими значениями водопроницаемости по сравнению с нижним напорным горизонтом. Косейсмические вариации соответствуют пороупругой реакции водонасыщенного коллектора. Постсейсмические эффекты, вероятно, обусловлены скин-эффектом, связанным с кольтатацией микротрещин в околоскважинном пространстве.

Ключевые слова: высокоточный гидрогеологический мониторинг, водонасыщенный коллектор, водопроницаемость, сейсмическое воздействие, косейсмические отклики, постсейсмические эффекты

HYDROGEOLOGICAL RESPONSES TO THE EARTHQUAKES IN TURKEY ON FEBRUARY 6, 2023 REGISTERED AT THE «MIKHNEVO» GPO

S.M. Petukhova*¹, A.N. Besedina¹, E.M. Gorbunova¹

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.

E-mail: sofya.petukhova@gmail.com

Abstract

The results of registration at the territory of the «Mikhnevo» geophysical observatory of the IDG RAS of hydrogeological responses to earthquakes that occurred on February 6, 2023 in Turkey with magnitudes of 7,8 and 7,7 are presented in study. High-precision measurements are carried out in two observation wells with a depth of 60 and 115 m, equipped in the weakly confined and confined aquifer. The amplitudes of coseismic variations of pore pressure during the passage of seismic waves from two earthquakes with maximum ground velocity of 2,2 and 2,6 mm/s were 554 and 1400 Pa in the upper horizon (weakly confined), 59 and 78 Pa in the lower horizon (confined), respectively. Postseismic effects as increase of pore pressure in the lower horizon by 25,9 and 18,1 Pa were established for two earthquakes. In the upper horizon, a post-seismic pressure increase of 45 Pa was noted only for the second earthquake. The reaction of the water-saturated reservoir to the seismic impact depends on the hydrogeological parameters of aquifer. The upper weakly confined aquifer is characterized by higher transmissivity values, determined by both standard and remote methods, compared to the lower confined aquifer. Coseismic variations correspond to the poroelastic reaction of a water-saturated reservoir. Post-seismic effects are probably caused by the skin effect associated with the microfracture colmatation in the near-wellbore zone.

Key Words: precision hydrogeological monitoring, water-saturated reservoir, water transmissivity, seismic impact, coseismic responses, post-seismic effects

Введение

6 февраля 2023 г. в юго-восточной части Турции произошли землетрясения, сопровождаемые многочисленными афтершоками, которые привели к обширным разрушениям и жертвам среди населения. Первое землетрясение с магнитудой 7,8 в 01:17:35 GMT приурочено к Восточно-Анатолийскому разлому с эпицентром вблизи г. Газиантеп. Второе событие с магнитудой 7,7 в 10:24:49 GMT — в зоне влияния разлома Кардак с эпицентром в г. Экинёзю. Расстояние между эпицентрами двух землетрясений не превышало 100 км. Землетрясения мелкофокусные, глубина очагов составила 10-14,5 км [1].

Гидрогеологические отклики на вышеперечисленные землетрясения были зарегистрированы в наблюдательных скважинах на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево»), расположенной в 80 км к югу от Москвы. Основная цель выполненной работы — исследование реакции водоносных горизонтов Московского артезианского бассейна на прохождение сейсмических волн от землетрясений, произошедших в Турции в феврале 2023 г.

Характеристика объекта исследований

В течении 15 лет на территории ГФО «Михнево» проводится высокоточный мониторинг уровня подземных вод. В наблюдательных скважинах вскрыты верхний слабонапорный каширский горизонт среднего карбона в интервале глубин 43,6-56,2 м и нижний напорный алексинско-протвинский горизонт нижнего карбона в интервале 92-115 м. Водовмещающие породы каширского горизонта в скважине № 2 представлены известняками светло-серыми трещиноватыми, кавернозными. Водонасыщенный коллектор алексинско-протвинского горизонта в скважине № 1 сложен известняками коричневатого-серыми, доломитизированными, неравномерно трещиноватыми.

По результатам пробных откачек водопроницаемость каширского водоносного горизонта составляет $15 \text{ м}^2/\text{сут}$, алексинско-протвинского – $3 \text{ м}^2/\text{сут}$. По расходомерии в верхнем горизонте интенсивный водоприток прослежен в зоне открытого ствола скважина, в нижнем горизонте — выделен в интервалах 92-94 и 99-100 м [2]. По данным мониторинга, проводимого в скважинах № 1 (2011-2021 гг.) и № 2 (2015-2021 гг.), отклики двух разновозрастных водоносных горизонтов на квазистационарные и периодические факторы различаются. Верхний слабонапорный горизонт характеризуется повышенной чувствительностью к атмосферному давлению, влияние земных приливов слабо выражено. Нижний напорный горизонт отличается от верхнего более низким значением коэффициента барометрической эффективности и повышенной чувствительностью к земным приливам [3].

Методы исследований

На территории ГФО «Михнево» расположены две наблюдательные скважины глубиной 115 и 60 м, оборудованные датчиками уровня LMP 308i для проведения высокоточного гидрогеологического мониторинга. Для измерения атмосферного давления применяется датчик РАА-33Х. Данные гидрогеологических и барометрических измерений сформированы в единую базу за весь период измерений 2008-2023 гг. При анализе реакции подземных вод на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений дополнительно используются данные малоапертурной сейсмической группы ГФО «Михнево» [4] и станции «Обнинск» ФИЦ ЕГС РАН.

В результате обработки базы данных ИДГ РАН экспериментально определен нижний порог скорости регистрации сейсмических событий в вариациях уровня подземных вод, который использован для формирования выборки гидрогеологических и сейсмических записей с частотой опроса 1 Гц в интервалах, соответствующих времени прохождения волн от удаленных землетрясений. В группах поверхностных волн, выделенных на сейсмограммах скорости смещения грунта и в уровне напорного и слабонапорного горизонтов, определялись

максимальные значения амплитуд, измеренные между последовательным максимумом и минимумом в скользящем окне длительностью 72 с и перекрытием 50%

Для анализа реакции на землетрясения используется метод непрерывного вейвлет-преобразования в программном пакете Matlab, представляющий собой разложение одномерных сигналов временных рядов по базису, который собран из специальных функций при помощи их масштабного изменения и переноса вдоль оси времени. Применение вейвлет-анализа позволяет детально изучить изменение спектрального состава сигнала во времени. Преимущество этого анализа перед Фурье-преобразованием состоит в более эффективном выделении как высокочастотных, так и низкочастотных характеристик сигналов, т.к. базисная функция изменяет размер окна при увеличении или уменьшении масштаба.

Результаты и их обсуждение

За период наблюдений 2010-2023 гг. на территории ГФО «Михнево» зарегистрированы многочисленные гидрогеологические отклики на удаленные землетрясения с магнитудой 6,1-9,1, произошедшие на эпицентральных расстояниях от 1456 до 16553 км. Наряду с косейсмическими вариациями в нижнем водоносном горизонте прослежено постсейсмическое увеличение порового давления при скорости смещения грунта 1,8-3,8 мм/с [2].

Синхронный отклик разновозрастных водоносных горизонтов на сейсмическое воздействие прослежен при 8 землетрясениях с магнитудами 7,1-8,3 при скорости смещения грунта 0,12-2,56 мм/с на эпицентральных расстояниях 1873-14020 км. Наибольший интерес представляют данные регистрации двух землетрясений, которые произошли в Турции 6 февраля 2023 г., при которых постсейсмический эффект отмечен как в напорном, так и в слабонапорном водоносных горизонтах (Рис. 1).

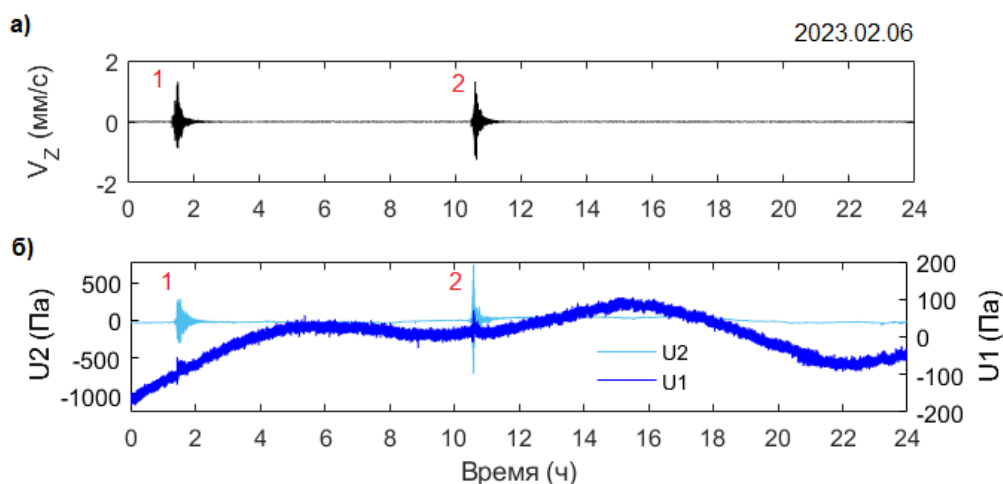


Рис. 1 Диаграммы скорости смещения грунта по вертикальной компоненте (а) и вариаций порового давления (б) (верхний водоносный горизонт U2 – голубая линия, нижний U1 – синяя). Цифрами обозначены землетрясения в Турции 06.02.2023 г. (1 – 01:21:42 GMT; 2 – 10:28:46 GMT).

При прохождении сейсмических волн от первого землетрясения с максимальной скоростью 2,18 км/с вариации порового давления в верхнем горизонте составили 554 Па, в нижнем горизонте – 59 Па [3]. При сейсмическом воздействии второго землетрясения с максимальной скоростью 2,56 мм/с, произошедшего через 9 часов, амплитуда вариаций порового давления в верхнем горизонте увеличилась до 1,4 гПа, в нижнем – до 78 Па. После первого землетрясения плавное постсейсмическое увеличение порового давления на 27 Па зарегистрировано только в нижнем водоносном горизонте в течении 20 минут. После второго землетрясения, которое оказало большее сейсмическое воздействие на водонасыщенный коллектор, постсейсмическое увеличение давления проявилось в обоих горизонтах. В верхнем горизонте через 1,5 час достигло максимального значения 45 Па. В нижнем горизонте постсейсмическое увеличение порового давления на 17 Па проявилось кратковременно в течении 8,3 минут.

Для более детального анализа сейсмического воздействия двух землетрясений на водонасыщенный коллектор результаты гидрогеологических измерений представлены на вейвлет-диаграммах (скейлограммах) в виде нормированного сигнала по аналогии с обработкой сейсмических данных (Рис. 2).

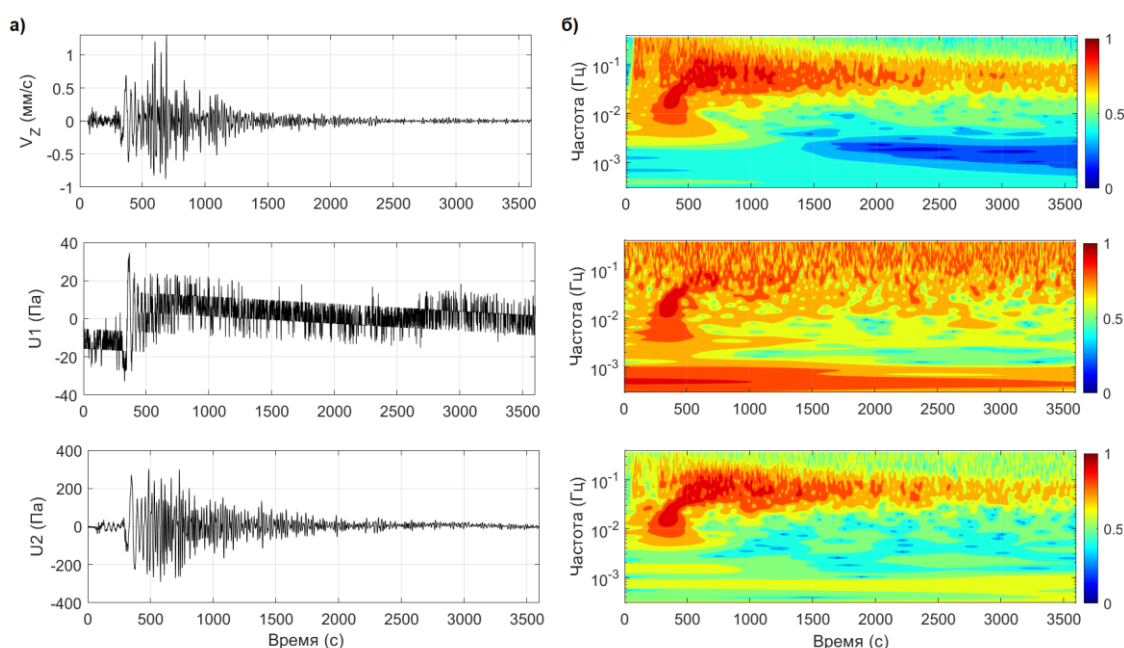


Рис. 2 Диаграммы скорости смещения грунта по вертикальной компоненте и вариаций порового давления (а) и их скейлограммы (б) от землетрясения в Турции 06.02.2023 г. 01:21:42 GMT (скорость смещения грунта – верхняя панель, вариации порового давления нижнего горизонта U1 – средняя панель и верхнего U2 – нижняя панель; начало отсчета 0 – время регистрации вступления сейсмических волн на станции «Обнинск»).

При первом землетрясении на скейлограмме нормированного значения скорости смещения грунта по вертикальной компоненте прослежено смещение интенсивности сигнала в область более высоких частот от 0,02 к 0,1 Гц в течение 6 минут, на скейлограмме порового давления верхнего горизонта – от 0,01 к 0,09 Гц в течение 6,8 минут. Скейлограмма нижнего горизонта отличается, так как проявляются два диапазона интенсивности сигнала. Первый – в более узком диапазоне частот 0,01-0,05 Гц в течение 3 минут. Второй – в низкочастотной области $(5-6) \cdot 10^{-4}$ Гц.

При втором землетрясении в 10:28:46 GMT реакция подземных вод на прохождение сейсмических волн подобна, но, так же как нормированный сигнал скорости смещения грунта, проявляется в более узком частотном диапазоне 0,02-0,09 Гц. В нижнем горизонте наряду с ростом интенсивности сигнала в высокочастотной области в диапазоне 0,02-0,07 Гц выделяется увеличение интенсивности нормированного сигнала при более низких частотах $(6-10) \cdot 10^{-4}$ и $(1,6-2) \cdot 10^{-3}$ Гц. Отклик на третье землетрясение, которое произошло в Турции 20 февраля 2023 г. с магнитудой 6,4 и скоростью грунта 0,09 мм/с, прослежен только в слабонапорном водоносном горизонте с амплитудой 4,1 мм.

Заключение

Пороупругая реакция водонасыщенного коллектора зависит от амплитудно-частотного состава сейсмических волн землетрясения и проявляется в более узком диапазоне частот. Косейсмические отклики на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений при невысоком значении водопроницаемости выражены слабее. Увеличение интенсивности сигнала порового давления в низкочастотной области, вероятно, соответствует постсейсмическим эффектам, которые устойчиво проявляются в нижнем напорном водоносном горизонте, отличающемся низкой водопроницаемостью по сравнению с вышележащим слабонапорным горизонтом. Постсейсмические эффекты в виде эпизодического увеличения порового давления могут быть вызваны скин-эффектом – кольтмацией микротрещин околоскважинного пространства коллоидными частицами при интенсивном сейсмическом воздействии.

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 122032900172-5 (FMWN-2022-0015) Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Chen J., Zilio L.D., Zhang H., Yang G., Shi Y., Liu C. Decoding stress patterns of the 2023 Turkey-Syria earthquake doublet // Research Square. Preprint. May 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2922091/v1
2. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М. Реакция водонасыщенных коллекторов на динамическое воздействие (по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод) // Физика Земли. № 5. 2021. DOI: 10.31857/S000233721050070
3. Besedina A., Gorbunova E., Petukhova S. Hydrogeological Responses to Distant Earthquakes in Aseismic Region // Water. 2023. V. 15. No. 7. Art. 1322. P. 1-19. DOI: 10.3390/w15071322

4. Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. «Михнево»: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С. 108-119. DOI: 10.7868/S0002333715060010

УДК 550.8.02:621.039

УТОЧНЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СКАЛЬНОГО МАССИВА УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. Расторгуев^{1,2}, Г.Д. Неуважаев¹, Д.А. Озерский¹, К.Д. Смирнов^{*1,2}

¹ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия, E-mail: atomicks96@mail.ru

² Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: alvr9@mail.ru

Аннотация

Скальные магматические и метаморфические породы обладают низкими фильтрационными свойствами. Их проницаемость связана с отдельными трещинами и разрывными нарушениями. Наличие проводящих зон, связанных с этими трещинами, необходимо учитывать при оценке водопритоков в горные выработки, а также при прогнозных оценках возможных фильтрационных воздействий горного предприятия. Сложность состоит в том, что стандартные опытно-фильтрационные работы в разведочных скважинах не позволяют оценить свойства трещин или разрывных нарушений. Для этого необходимо проведение поинтервальных пакерных исследований, позволяющих проводить измерения и опыты в узких зонах развития трещин, выделяя их в массиве. Первичные результаты обработки специализированных экспериментов в скальном массиве, сложенном гнейсами, приведены данной работе.

Ключевые слова: опытно-фильтрационные работы, пакерные исследования, подземная исследовательская лаборатория, скальные породы

ESTIMATING THE HYDRAULIC PARAMETERS OF THE YENISEI HARD ROCK MASSIF WITH THE USE OF PACKER EQUIPMENT

A.V. Rastorguev^{1,2}, G.D. Neuvazhaev¹, D.A. Ozerskiy¹, K.D. Smirnov^{1,2}

¹ Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, E-mail: atomicks96@mail.ru

² Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail *E-mail: alvr9@mail.ru

Abstract

Rock magmatic and metamorphic rocks have low permeability properties. Their permeability is associated with individual fractures and faults. The presence of conductive zones, which are associated with these fractures, should be considered when estimated water inflows into the mine workings, as well as in predicting the possible filtration effects of the mining company. The difficulty lies in the fact that standard aquifer tests in wells do not allow to assess the properties of fractures or

faults. For this purpose, it is necessary to conduct interval packer studies, which allow to measure in narrow zones of fracture development, isolating them in the massif. The primary results of the processing of specialized experiments in the rock massif, composed of gneiss, are given in this paper.

Key Words: Slug test, aquifer tests, igneous rocks, Underground Research Laboratory

Введение

На Енисейском участке разрез представлен трещиноватыми скальными породами (преимущественно гнейсами), характеризующимися весьма низкими фильтрационными свойствами. Исследования, проведенные на поисковой и оценочной стадиях [2] показали, что массив неоднороден и в нем выделяются зоны повышенной трещиноватости. В скальных породах основная водопроводимость сосредоточена именно в таких зонах. При предшествующих исследованиях [2] проводилось определение модуля трещиноватости по керновому материалу, геофизические исследования и поинтервальные опытно-фильтрационные работы (ОФР). Сопоставление этих результатов показало отсутствие хорошей корреляции между зонами с повышенным модулем трещиноватости и проницаемости. Отсутствие прямой связи было обнаружено и в зарубежных исследованиях. Наибольший объем информации о методике и результатах детальных исследований в аналогичных Енисейскому участку геологических и гидрогеологических условиях представлен на сайтах компаний и SKB (Швеция) и Posiva (Финляндия) [6; 7]. Ими было установлено, что только 10% зон трещиноватости выявленных геологическими и геофизическими методами подтверждается ОФР. В качестве основного метода оценки проницаемости трещиноватого массива используются нагнетания с постоянным давлением поддерживаемом в межпакерном интервале.

Поинтервальные нагнетания широко используются для исследования водопроницаемости скальных пород отечественными гидротехниками и даже регламентируются ГОСТом [1]. Основным результатом этих исследований чаще всего оказывается удельное водопоглощение – качественный параметр, полезный для выделения зон повышенной проницаемости, но недостаточный для выполнения прогнозов. В случае, когда удастся определить коэффициент фильтрации, используют приближенные зависимости для стационарного режима, не учитывающие историю проведения опыта и период восстановления. В шведской компании SKB отработана методика интерпретации, позволяющая использовать результаты нагнетаний и восстановления, полученные при неустановившемся режиме [6]. Обзор методов интерпретации нагнетаний приведен в работе [4]. Основным результатом в этих опытах является график изменения расходов, которые довольно быстро, менее чем за час выходят на стационар. Однако измерение расходов при нагнетаниях в скальных породах требует расходомера с точностью измерений до 1 мл/мин. Приобрести или сделать подобное устройство

пока не удалось, поэтому в качестве исследований был использован мгновенный налив (экспресс налив).

В данной работе представлены первичные результаты обработки и закономерности проведения пакерных исследований в скальном массиве в скважине Р-8. Представлены различные графики хода восстановления уровней и оценочные значения проводимости некоторых интервалов.

Методы исследований

С помощью пакерного оборудования, схема установки в скважину представлена на рис. 1, летом 2021 года была исследована скважина Р-8 глубиной 700 метров, пробуренная ранее на Енисейском участке. В ходе подготовки и проведения эксперимента были встречены различные трудности связанные, в том числе и с недоработками оборудования.

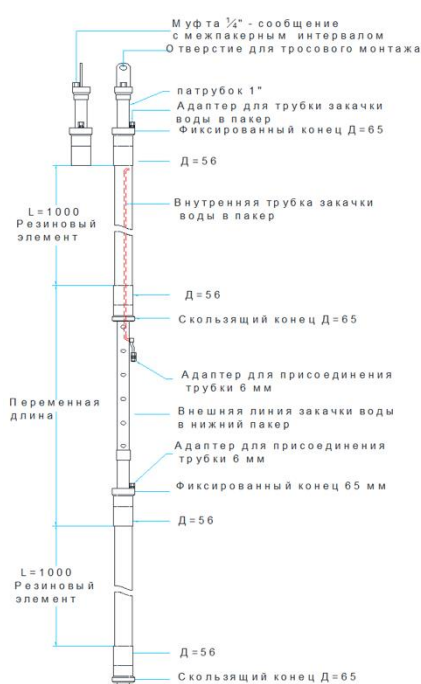


Рис. 1 Схема оборудования скважины пакерами (слева), пакеры (справа).

Многokrатно были проведены наливыв во весь открытый интервал скважины (для этого опыта пакеры не требовались). Экспериментальные графики (Рис. 2) показывают, что в течение времени восстановления происходило по-разному. В начальный период времени графики восстановления были более «крутые», в конечный более «пологие». Авторы объясняют это кольтматацией скважины в результате постоянной репрессии скважины, при которой вода из ствола скважины закачивалась в трещины.

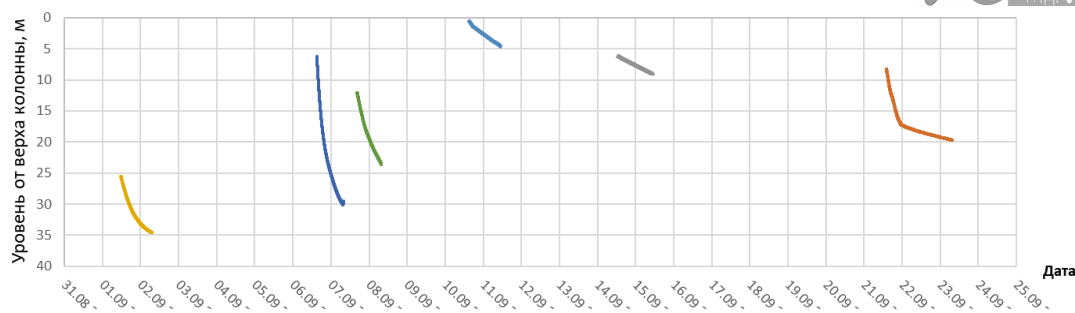


Рис. 2 Ход восстановления уровня подземных вод во всём стволе скважины Р-8 за всё время работ 2021 года.

Обработка результатов проводилась с помощью программы SLUG [3], реализующей аналитическое решение, полученное Б.С. Шержуковым [5]. Данное решение позволяет определять водопроницаемость T , водоотдачу μ , сопротивление прискважинной зоны ζ .

Результаты и их обсуждения

Результаты интерпретации налива в скважину Р-8 для интервала 250-586 м приведены на рис. 3.

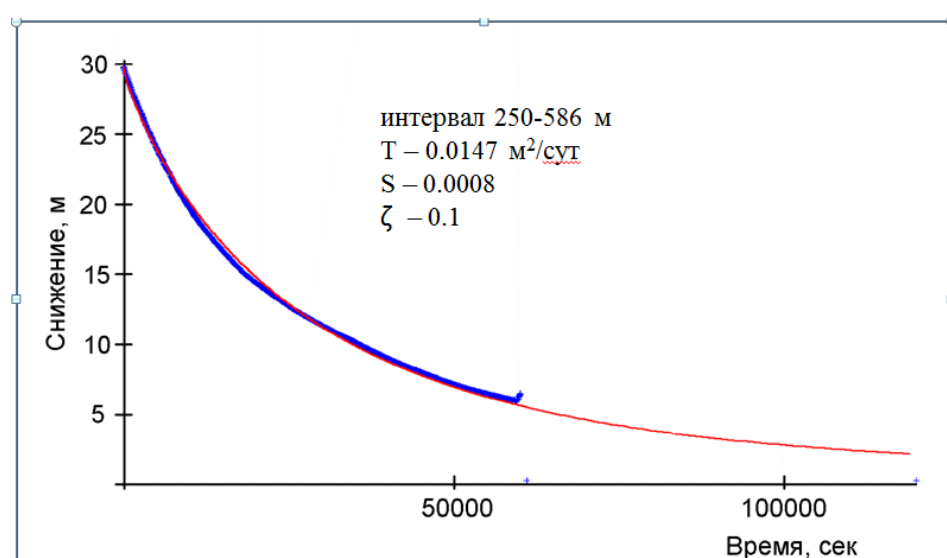


Рис. 3 Результат интерпретации налива в скважину Р-8 интервал 250-586 м. Синяя кривая – экспериментальная, красная – теоретическая.

В табл. 1 приведены результаты определения фильтрационных параметров различных интервалов скважины Р-8 и приведено сравнение с результатами фильтрационных экспериментов, проведённых при оценочных работах в 2010 г. Значения, полученные в 2021 году, отличаются на порядок, что возможно связано с большей герметичностью пневматических пакеров применяемых в данном исследовании.

Табл. 2 Результаты определения фильтрационных параметров различных интервалов.

№ п/п	Интервал, м	T, м ² /сут	ζ	μ, *10 ⁻⁵	k, м/сут, *10 ⁻⁴	
					2021 г.	2010 г.
1	250 - 700	0,0194	0	3	0,431	4,3
2	250-586,7	0,0147	0,1	80	0,437	4,7
3	497,6 – 507,6	0,002	0,1	8	2	-
4	250 - 700	0,019	109	3	0,422	4,3

Заключение

Поинтервальные исследования с дискретностью 10 м в глубокой скважине Р-8 на Енисейском участке выполнены впервые и приобретенный опыт имеет большое значение для совершенствования оборудования и методики исследований в будущем. В ходе исследования для перемещения пакерного снаряда необходимо было постоянно работать в условиях репрессии в скважине. Исследования показали, что при репрессии в скважине реакция проницаемых участков на повышение уровня со временем замедляется, что может быть, как свойством массива, так и следствием колюматажа трещин механической взвесью (Рис. 2).

В ходе исследования был выделен хорошо проницаемый интервал 500 - 650 м от устья скважины, в котором наблюдались значительные скорости восстановления уровня в скважине после налива.

Список литературы

- ГОСТ 23278-2014 Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости
- Озерский А.Ю., Караулов В.А. Гидрогеологические исследования при изысканиях для подземного строительства в пределах массива кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа // Инж. изыскания. 2012. № 11. С. 52–59.
- Расторгуев И.А. Решение задач фильтрации устойчивыми явными методами: Дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 Москва, 2006 155 с. РГБ ОД, 61:06-1/1226
- Тесля В. Г., Расторгуев А. В. Особенности планирования детального изучения гидродинамических и гидрохимических свойств участка «Енисейский» Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 58—70. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-58-70.
- Шержуков Б.С., Алексеев В.С., Курманенко А.Д. Рекомендации по определению параметров горных пород и грунтов методом экспресс-налива в несовершенные скважины. ВНИИ ВОДГЕО, 1979.
- Walger Ellen at all. Single-hole injection tests and pressure pulse tests in borehole KFM08A. P-06-94, SKB, 2006.
- Working Report 2013-07. Monitoring Hydraulic Conductivity with HTU at Eurajoki, Olkiluoto, Drillholes OL-KR31 and OL-KR32, in 2011, Posiva, 2013, 53 p.

УДК 504.06

МИГРАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ И ХЛОРОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

А.В. Расторгуев*¹, А.И. Нурисламов¹, Я.В. Сорокоумова¹, А.В. Султанов¹,
И.А. Чиганов¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: alvr9@mail.ru

Аннотация

Углеводородные соединения такие как нефть и продукты ее переработки (бензин, керосин, дизель и др.), как правило, легче воды, и в литературе, прежде всего зарубежной, их называют LNAPL (*light nonaqueous phase liquids* – легкая неводная фаза). Хлорорганические соединения – это химические соединения (тетрахлорэтилен, четыреххлористый углерод, хлороформ и др.), которые, напротив, тяжелее воды и часто называются DNAPL (*dense nonaqueous phase liquids* – тяжелые неводные жидкости). Общим между ними является способность мигрировать в виде отдельной жидкой фазы, незначительно растворяться в воде и переходить в газообразное состояние. Эти вещества часто называются общим названием NAPL (*nonaqueous phase liquids*) и миграция описывается теорией трехфазной фильтрации. Основы миграции NAPL читаются в курсе «Физикохимическая гидрогеодинамика», используются студентами и аспирантами при подготовке своих работ. Результаты этих исследований, связанных с прогнозированием миграции NAPL, разработкой программного обеспечения для прогнозирования миграции и обоснования мероприятий по реабилитации приведены в докладе.

Ключевые слова: нефтепродукты, хлорорганические вещества, трехфазная фильтрация, моделирование.

MIGRATION OF HYDROCARBON AND CHLORORGANIC COMPOUNDS

A.V. Rastorguev*¹, A.I. Nurislamov¹, Y.V. Sorokoumova¹, A.V. Sultanov¹,
I.A. Chiganov¹

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: alvr9@mail.ru

Abstract

Hydrocarbon compounds are oil and its refined products (gasoline, kerosene, diesel, etc.). As a rule, they are lighter than water, and in the literature, they are called LNAPL (*light nonaqueous phase liquids*). Organochlorine compounds are chemical compounds (tetrachloroethylene, carbon tetrachloride, chloroform, etc.) which are 'on the contrary heavier than water and are often called

DNAPL (dense nonaqueous phase liquids - heavy nonaqueous liquids). What they have in common is the ability to migrate as separate liquid phases, dissolve to a small extent in water and change to a gaseous state. These substances are often referred to by the generic name NAPL (nonaqueous phase liquids) and the migration is described by the three-phase flow theory. The basics of NAPL migration are taught in the course «Physicochemical Hydrogeodynamics» and are used by undergraduate and graduate students in the preparation of their papers. The results of these studies related to the prediction of NAPL migration, development of software for migration prediction, and justification of remediation measures are presented in the paper.

Key Words: petroleum products, organochlorine compounds, three-phase flow, modeling.

Введение

Возможно одно из первых упоминаний о загрязнении подземных вод нефтепродуктами можно найти в книге Бочевера, Лапшина и Орадовской [1]. Наиболее полный обзор последних статей (не более 10 лет давности), связанных с миграцией LNAPL, приведен в работе [9]. Автор сгруппировал статьи по основным направлениям: лабораторные эксперименты, полевые исследования, математическое моделирование. Основная работа, связанная с адаптацией теории трехфазной фильтрации применительно к миграции NAPL в верхней части подземной гидросферы, приведена в работах [8; 13]. Три фазы в этой модели представлены нефтепродуктами, водой и воздухом. Учитывая значительные плановые размеры линз нефтепродуктов и их меньшую плотность, по сравнению с водой, была предложена плановая модель миграции линз LNAPL [13]. Основные теоретические положения трехмерной и плановой многофазной фильтрации приведены в работе [4]. В конце 20 начале 21 века в РФ стояла задача ликвидации возможно одной из самых крупных в мире линз нефтепродуктов в г. Новокуйбышевск Самарской области. Здесь даже утверждены запасы техногенного месторождения нефти по категории C1 в объеме 1650 тыс. тонн на территории более 500 га. Для обоснования стратегии откачки нефтепродуктов в организациях «Геолинк-Консалтинг» и НИИ ВОДГЕО разрабатывались плановые программные коды. В ЗАО «Геолинк-Консалтинг» И.С. Клейном был разработан конечноразностный код TFDD. В НИИ ВОДГЕО на основе метода конечных элементов был разработан код Oilfem [4].

В относительно простых случаях прогнозы миграции нефтепродуктов могут быть получены на основе простых аналитических зависимостей, изложенных в работе [12]. Оценка запасов техногенных нефтепродуктов и обоснование оптимальной стратегии их откачки в простых случаях могут также быть выполнены на основе аналитических зависимостей, собранных в программе LDRM [6].

В случае, когда структура потока существенно трехмерная и нельзя использовать плановое приближение, как правило, используют программный код TOUGH2 [14]. Примеры

использования TOUGH2 и детальные объяснения основных вопросов теории многофазной фильтрации приведены в учебнике В.Г. Румынина [5].

Код TOUGH2 может быть использован также для расчетов миграции тяжелых хлорорганических соединений [5]. Миграция растворенных в воде нефтепродуктов или хлорорганических соединений также может быть выполнена с помощью кода TOUGH2. Для расчетов миграции растворенных NAPL на основе модели акцепции электронов с учетом кинетики Моно может быть использовано расширение кода MT3DMS – код RT3D [7]. Для скрининговых оценок миграции растворенных нефтепродуктов без учета кинетики может быть использована программа BIOSCREEN, основанная на аналитическом решении [10].

Методы исследований

Была проведена разработка и тестирование новой версии программного кода Oilfem, для расчетов многофазной фильтрации и геомиграции. Также выполнено моделирование миграции свободных нефтепродуктов с помощью кода TOUGH2.

Результаты и их обсуждения

NAPL в виде отдельной жидкой фазы. Первой задачей реабилитации территорий, загрязненных NAPL, является удаление или минимизация жидкой фазы. Это может быть реализовано с помощью скважин или горизонтальных дренажей. Если свободную фазу не убрать, она сможет самостоятельно мигрировать. И даже находясь в защемленном состоянии, контролируемом силами поверхностного натяжения, жидкая фаза загрязняет подземные воды, в которых происходит миграция NAPL в растворенном виде. Ниже приведены примеры миграции LNAPL.

На территории Московского нефтеперерабатывающего завода (МНПЗ) многие годы существует линза легких нефтепродуктов на поверхности подземных вод. Эта линза существует в виде отдельной фазы, а также является источником загрязнения подземных вод нефтепродуктами в растворенном виде.

Для обоснования системы реабилитации необходима модель, позволяющая учитывать специфику загрязнения объекта, связанную с наличием нефтяной фазы. Следует отметить, что в настоящее время нет поддерживаемых программных кодов, позволяющих решать такие задачи. Предназначенные для этого программы TFDD и Oilfem разработаны более 20 лет назад и сейчас не поддерживаются и не используются.

В результате проведенной работы был разработан новый вариант кода программы для моделирования миграции линз нефтепродуктов Oilfem 2. Для кодирования, в отличие от предыдущей версии, написанной на Fortran, был использован язык Python 3. В программе реализованы все возможности предыдущей версии Oilfem, а также добавлены новые – встроен сеточный генератор; расход откачки нефтепродуктов из скважины зависит от мощности линзы;

возможность импорта файлов Modflow для подготовки фильтрационной части модели. Проведено тестирование программы на основе сопоставления с аналитическим решением для скважины, расположенной в центре линзы круглой формы [6].

Программа Oilfem 2 была использована для расчетов миграции линзы нефтепродуктов на МНПЗ. На рис. 1 показано положение линзы при усилении дренажа дополнительными скважинами.



Рис. 1 Положение и мощность линзы нефтепродуктов на 2032 г., при действующей системе дренажа, усиленного откачивающими скважинами.

Примером длительного загрязнения подземной гидросферы нефтепродуктами является территория сажевого завода в Ярославле. Ярославский сажевый завод, который входил в состав Резинокомбината, был запущен в эксплуатацию в 1933 году. Площадь промплощадки (непосредственно территория завода) составляет 0,14 км², расстояние от ограждения до уреза воды р. Волга 100 м. Сырьем для производства сажи служили ароматизированные фракции нефтяного происхождения (зеленое масло), которые доставлялись нефтеналивными судами по Волге и сливались в открытые земляные ямы, изнутри обмазанные глиной. Положение резервуаров с зеленым маслом показано на Рис. 2а. За многолетнюю эксплуатацию завода грунт в непосредственной близости от реки Волги оказался насыщенным нефтепродуктами, вымываемыми грунтовыми водами в Волгу. В 1979 году на данной площадке сажевое производство было закрыто. В том же году вышла книга [1], в которой рассказывалось о планируемых дренажных мероприятиях для сокращения разгрузки в Волгу. Однако дренажные мероприятия не имели успеха и до сих пор зеленое масло разгружается в Волгу.

В 2018 г. были проведены изыскания для обоснования нового проекта по ликвидации нефтяного загрязнения. На их основе было проведено моделирование миграции зеленого масла из захороненных резервуаров, с помощью программы TOUGH2, предполагая, что зеленое масло близко по физическим свойства к керосину. Результаты моделирования в разрезе,

перпендикулярном к р. Волга (Рис. 2б), позволяют представить разгрузку нефтепродуктов в р. Волга сегодня.

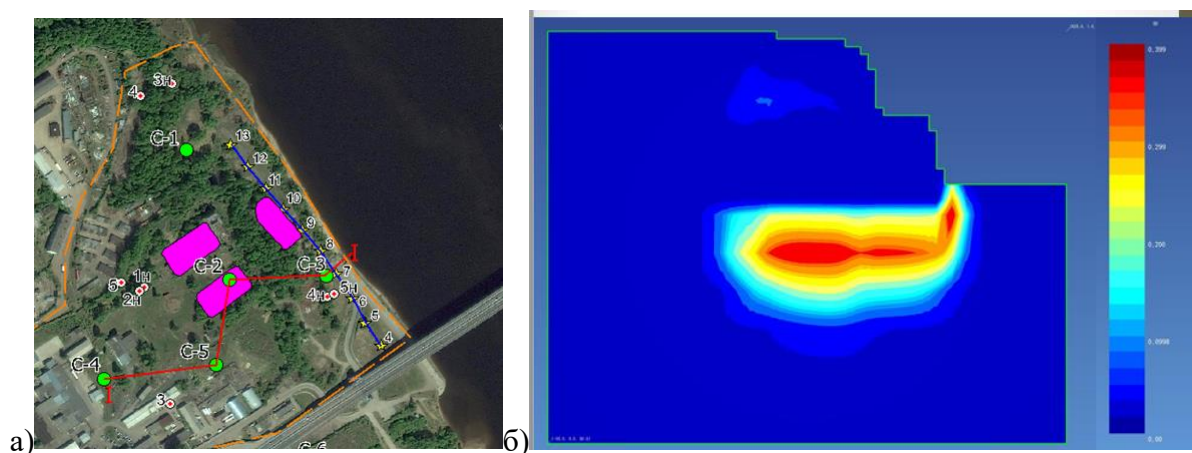


Рис. 2 Загрязнение нефтепродуктами в г. Ярославле. а) Положение источников загрязнения
б) Модельное распределение насыщенности нефтепродуктами в разрезе.

Приведенные примеры показывают, что территории, загрязненные нефтепродуктами, восстанавливаются долго, иногда десятилетиями. Для ускорения процессов извлечения свободной части нефтепродуктов и удаления остаточных, целесообразно использовать специальные технологии [9], например, применение поверхностно-активных веществ.

NAPL в растворенном виде. В реальных ситуациях NAPL присутствуют не только в отдельной жидкой фазе. В результате массообмена они оказываются также в воде и воздухе. Нефтепродукты – это многокомпонентные смеси и каждая из компонент, как правило, характеризуется своими индивидуальными свойствами, способностями к массообмену и переносу. Для того, чтобы решать задачи, связанные с восстановлением окружающей среды, загрязненной нефтепродуктами, необходимы модели, учитывающие не только многофазную фильтрацию, но и многокомпонентный перенос и массообмен. Такие модели называют композиционными. Математическая постановка и программные коды такой модели даны в работе [8].

Композиционная модель = Многофазная фильтрация + многокомпонентный перенос и массообмен.

Миграция растворенных в воде легких нефтепродуктов связана, главным образом, с ароматическими углеводородами: бензолом, толуолом, этилбензолом и ксилолом. В англоязычной литературе они обозначаются аббревиатурой ВТЕХ. Они неконсервативны, подвержены биоразложению. В работе [11] дан обзор исследований по определению констант скоростей биоразложения первого порядка по данным мониторинга, проведенного на пяти объектах в США, расположенных от Флориды до Аляски. Оказалось, что характерные значения констант скоростей биоразложения находятся в диапазоне $\lambda = 0,001-0,01 \text{ сут}^{-1}$.

На территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) существует загрязнение подземных вод растворенными нефтепродуктами, которое фиксируется наблюдательными скважинами. На основе данных мониторинга была разработана геомиграционная модель. В ходе калибровки модели до удовлетворительного совпадения модельных и наблюдаемых значений содержания нефтепродуктов (Рис. 3) были получены значения миграционных параметров: коэффициент сорбционного распределения $k_d=0,1$ л/кг, константа биоразложения $\lambda=0,001$ сут⁻¹.

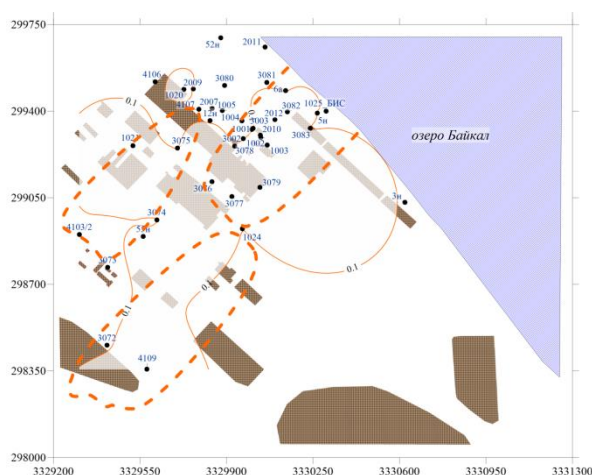


Рис. 3 Сопоставление фактических (сплошная линия) и модельных (пунктирная линия) ореолов растворенных нефтепродуктов на территории БЦБК на 2022 год.

Данные мониторинга водозаборных скважин в районе г. Подольска показали, что в ряде водозаборных скважин ПДК по перхлорэтилену превышены в 40 раз. На основе данных мониторинга была разработана геомиграционная модель, которая позволила установить возможные источники загрязнения. Это полигон «Щербинка» и закрытый уже Подольский химико-металлургический завод ПХМЗ. В настоящее время для очистки от хлорорганики на водозаборе г. Подольска используются угольные фильтры. На рис. 4 показан результат моделирования распространения загрязнения (перхлорэтилена) с территории полигона «Щербинка» и ПХМЗ в подольско-мячковском водоносном горизонте на момент мониторинга, синим цветом показана область, где концентрация перхлорэтилена больше 0,01 мг/л (2 ПДК), красными изолиниями показаны концентрации 0,1, 0,01, 0,001 и 0,0001 мг/л.

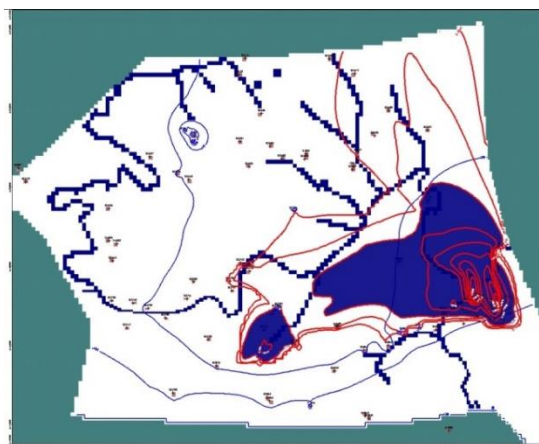


Рис. 4 Распространение загрязнения (перхлорэтилена) с территории полигона «Щербинка» и ПХМЗ в подольско-мячковском горизонте на момент мониторинга.

Заключение

NAPL являются опасными загрязнителями подземных вод. Приведенные примеры показывают, что миграция их в подземной гидросфере может происходить десятилетия. В настоящее время существуют технологии для более эффективной реализации реабилитационных мероприятий [9] – создание реакционных проницаемых барьеров, использование внутрипластового окисления, применение ПАВ и др. Разработка моделей и освоение этих технологий – задача для гидрогеологов на перспективу.

Список литературы

1. Бочеввер Ф. М., Лапшин Н. Н., Орадовская А. Е. Защита подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1979.
2. Нурисламов А.И., Расторгуев А.В. Моделирование реабилитации водоносных горизонтов от линз нефтепродуктов. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 2, 68-77, 2022
3. Клейн И.С. Численное моделирование линзы нефтяных загрязнений на поверхности подземных вод в районе расположения нефтеперерабатывающего завода // Прикладная геоэкология, чрезвычайные ситуации, земельный кадастр и мониторинг. 1997. № 2. С. 114–119.
4. Расторгуев А.В., Куранов П.Н. Гидравлические и гидродинамические модели многофазной фильтрации для обоснования защиты подземных вод от загрязнения. Сборник докладов конференции, посвященной 50-летию кафедры гидрогеологии. «Проблемы гидрогеологии XXI века: наука и образование». Москва, 2003 г., изд-во РУДН, стр. 171-183
5. Румынин В. Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод: Учебник для вузов. — СПб.: Наука, 2020. — 559 с
6. Charbeneau, R.J., Johns, R.T., Lake, L.W., and McAdams, M.J., Free-product recovery of petroleum hydrocarbon liquids, Groundwater Monit. Remediation, 2000, vol. 20, no. 3, pp. 147–158.
7. Clement, T.P. 1997. RT3D - A Modular Computer Code for Simulating Reactive Multi-Species Transport in 3-Dimensional Groundwater Aquifers. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA. PNNL-11720. Found online at: <http://bioprocess.pnl.gov/rt3d.htm>.

8. Katyal A.K., Kaluarachchi J.J., Parker J.C. MOFAT: A two-dimensional finite element program for multiphase flow and multicomponent transport // N.Y. Environmental Sci.EPA/600//020, 1991. P. 2–91.
9. Mineo. S. Groundwater and soil contamination by LNAPL: State of the art and future challenges. Sci Total Environ. Volume 874, 20 May 2023, 162394. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162394>
10. Newell C.J., Gonzales J., and McLeod R.K.,. BIOSCREEN Natural Attenuation Decision Support System., 1996, EPA/600/R-96/087. U.S. EPA, Center for Subsurface Modeling Support, Ada, OK
11. Newell C.J., Rifai H. S., Wilson J.T, Connor J.A., Aziz J.A., Suarez M.,P. Calculation and Use of First-Order Rate Constants for Monitored Natural Attenuation Studies. Ground Water Issue, EPA/540/S-02/500/, 2002, p 27
12. Parker J.C., Islam, M., 2000. Inverse modeling to estimate LNAPL plume release timing. Journal of Contaminant Hydrology, 45 303-327.
13. Parker J.C., Lenhard R.J. Vertical integration of threephase flow equations for analysis of light hydrocarbon plume movement // Transport in Porous Media. 1989. N 5.P. 187–206
14. Pruess, Karsten and Battistelli, Alfredo. TMVOC, A Numerical Simulator for Three-Phase Non-Isothermal Flows of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Saturated-Unsaturated Heterogeneous Media. Berkeley, CA, USA: Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, April 2002.LBNL-49375.

УДК 556.3

ИССЛЕДОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОДОЛЬСКО-МЯЧКОВСКОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА, ИСПОЛЬЗУЯ МЕТОДИКУ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ

К.Д. Смирнов*¹¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: atomicks96@mail.ru**Аннотация**

Для более точного прогноза движения подземных вод требуется знание пространственного распределения коэффициента фильтрации в водоносном горизонте. Известно, что карбонатные водоносные горизонты очень неоднородны из-за наличия трещин, в которых сосредоточены основные пути фильтрации [1]. Обычные опытно-фильтрационные работы (откачки или наливов) в результате дают осредненные значения коэффициента фильтрации и не дают полного представления о неоднородности. Для решения этой проблемы и получения пространственного распределения коэффициента фильтрации в начале 2000-х появился новый метод - фильтрационная томография, который был разработан на основе томографии в медицине и геофизике [2].

Объектом исследования является подольско-мячковский карбонатный водоносный горизонт на территории Звенигородской Биологической станции. В данной работе представлен новый комплексный метод обработки данных опытно-фильтрационных работ с использованием 3-D моделирования.

Ключевые слова: обратная задача, фильтрационная томография, опытно-фильтрационные работы, карбонатный водоносный горизонт, регуляризация

THE STUDY OF LARGE-SCALE HYDRAULIC HETEROGENEITY OF THE PODOLSKO-MYACHKOVSK AQUIFER, USING THE METHOD OF HYDRAULIC TOMOGRAPHY

K.D. Smirnov*¹¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: atomicks96@mail.ru**Abstract**

For more efficient prediction of groundwater movement, knowledge of the spatial distribution of the hydraulic conductivity in the aquifer is required. It is known that carbonate aquifers are very heterogeneous due to the fractures, in which the main flow paths are concentrated [1]. The usual aquifer tests as a result give average values of the hydraulic conductivity and do not provide a detailed

understanding of the heterogeneity. To solve this problem and obtain the spatial distribution of hydraulic conductivity, a new method - hydraulic tomography - was developed in the early 2000s, which is based on tomography in medicine and geophysics [2].

The object of the study is the Podolsko-myachkovsky carbonate aquifer on the site of the Zvenigorod Biological Station. This paper presents a new complex method of processing aquifer test data using 3-D modeling.

Key Words: Inverse problem, hydraulic tomography, aquifer test, carbonate aquifer, regularization

Введение

Объектом исследования является подольско-мячковский карбонатный водоносный горизонт на территории Звенигородской Биологической станции в 10 км западнее г. Звенигород, на правом берегу р. Москва, на ее I надпойменной террасе. На данном полигоне было проведено множество опытно-фильтрационных и миграционных работ другими исследователями [1]. Исследуемый водоносный горизонт перекрыт аллювиальными отложениями мощностью 6 м и подстилается ростиславльским терригенно-карбонатным водоупорным горизонтом (C_{2rst}) верхней части каширского горизонта среднего карбона.

Известно, что карстовые карбонатные водоносные горизонты крайне неоднородны, поскольку имеют такие структурные элементы, как слабопроницаемая матрица и хорошо проницаемые трещины, в которых сосредоточены основные пути потока подземных вод. Моделирование карстового процесса в совокупности трещин показывает, что со временем формируется тонкая зона закарстованности, приуроченная к входным участкам трещин на контакте литологических разностей карбонатных пород [1]. По таким горизонтальным зонам сосредоточена основная часть проводимости всего горизонта.

Фильтрационная томография – новый метод в гидрогеологии, который позволяет изучить фильтрационную неоднородность различных водоносных горизонтов, в том числе карбонатных [2; 3]. Суть метода заключается в проведении перекрестных наливов или откачек. Полученные многочисленные данные изменения уровня подземных вод в наблюдательных скважинах обрабатываются при помощи различных методов решения обратных задач численного моделирования с использованием регуляризации для уменьшения неопределенности и неединственности решения.

В данной работе представлена комплексная методика, направленная на изучение крупномасштабной фильтрационной неоднородности подольско-мячковского водоносного горизонта. Данная методика основана на новом методе – фильтрационная томография и включает в себя разработку и калибровку концептуальной трехмерной фильтрационной модели с использованием регуляризации параметров.

Методика исследования

В данном исследовании использовались данные кустовых наливов и расходомерии скважин, проведенные на кусте скважин № 3 (Рис. 1). Для детального изучения крупномасштабной фильтрационной неоднородности была разработана и откалибрована трехмерная фильтрационная модель этого участка с использованием программы GMS 10.4 для моделирования и оптимизатора PEST для решения обратной задачи. В модели были выделены 3 проницаемые горизонтальные зоны по вертикали с разделяющими непроницаемыми толщами между ними. Калибровка модели производилась через пилотные точки отдельно по трем горизонтальным зонам. В модели были заданы последовательно 4 стресс-периода для воспроизведения работы четырех кустовых наливов.

По графикам повышения уровня подземных вод в наблюдательных скважинах выделяется временной участок квазистационарного режима фильтрации, который был аппроксимирован прямой линией на основе уравнения Джейкоба и использован для верификации модели (Рис. 2). Данные расходомерии по всем скважинам были использованы для задания регуляризации параметров модели в виде точечных соотношений проводимости по вертикали между проницаемыми зонами в модели на месте скважин. Параметр водоотдачи не калибровался и был зафиксирован, для чего были пересчитаны свободные члены уравнений прямых, которые использовались для верификации модели.

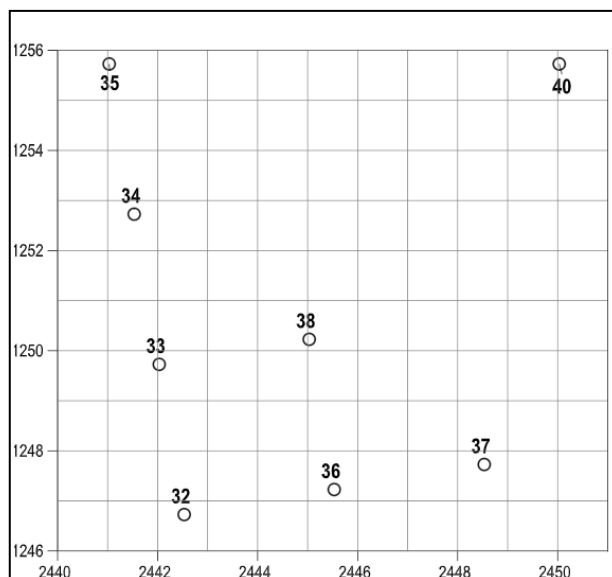


Рис. 1 Схема расположения скважин куста №3.

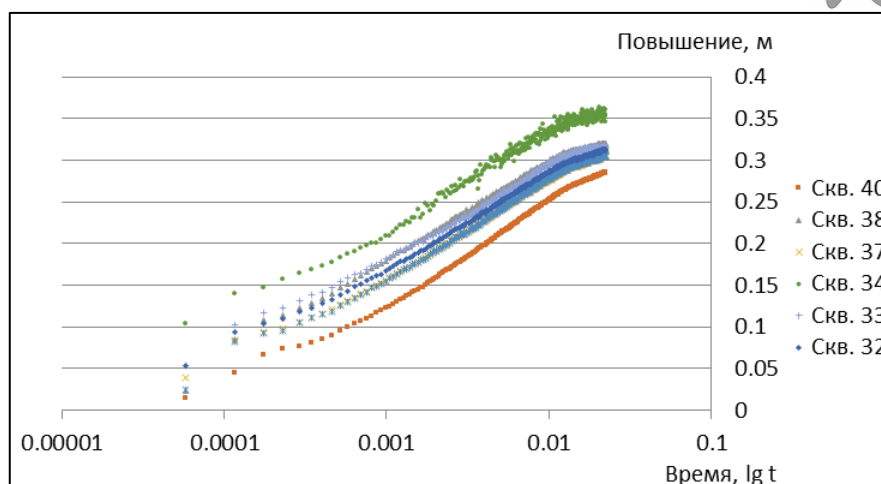


Рис. 2 График повышения уровня подземных вод в наблюдательных скважинах 3 куста при наливе в 35 скважину.

Результаты и их обсуждения

В результате решения обратной задачи были получены поля проводимости по 3-ем проницаемым зонам на трехмерной фильтрационной модели исследуемого водоносного горизонта с использованием опытных данных четырех кустовых наливов и расходомерии скважин, которая задавалась в виде регуляризации параметров (Рис. 3). Данные поля проводимости удовлетворительно воспроизводят кустовые наливывы (Рис. 4) и отображают значительную неоднородность 3-х горизонтальных проницаемых зон.

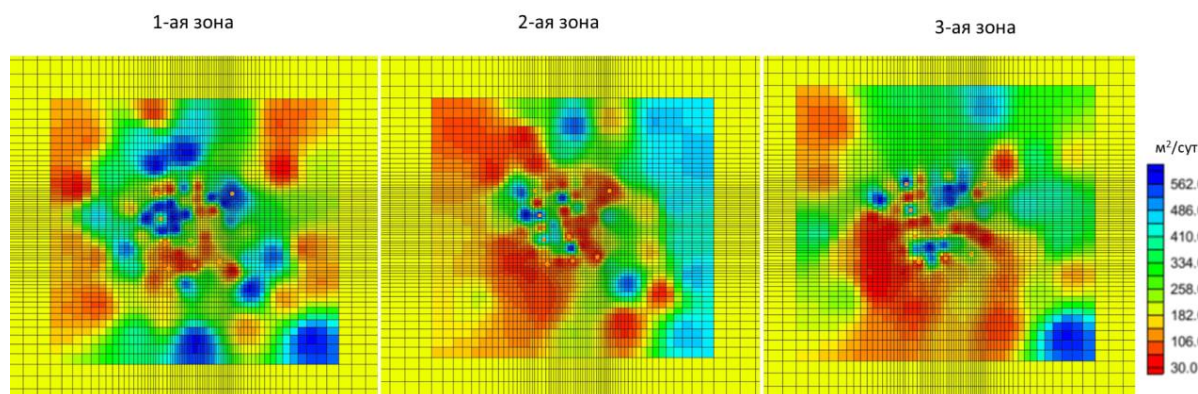


Рис. 3 Полученные в результате решения обратной задачи поля проводимости трехмерной модели исследуемого водоносного горизонта.

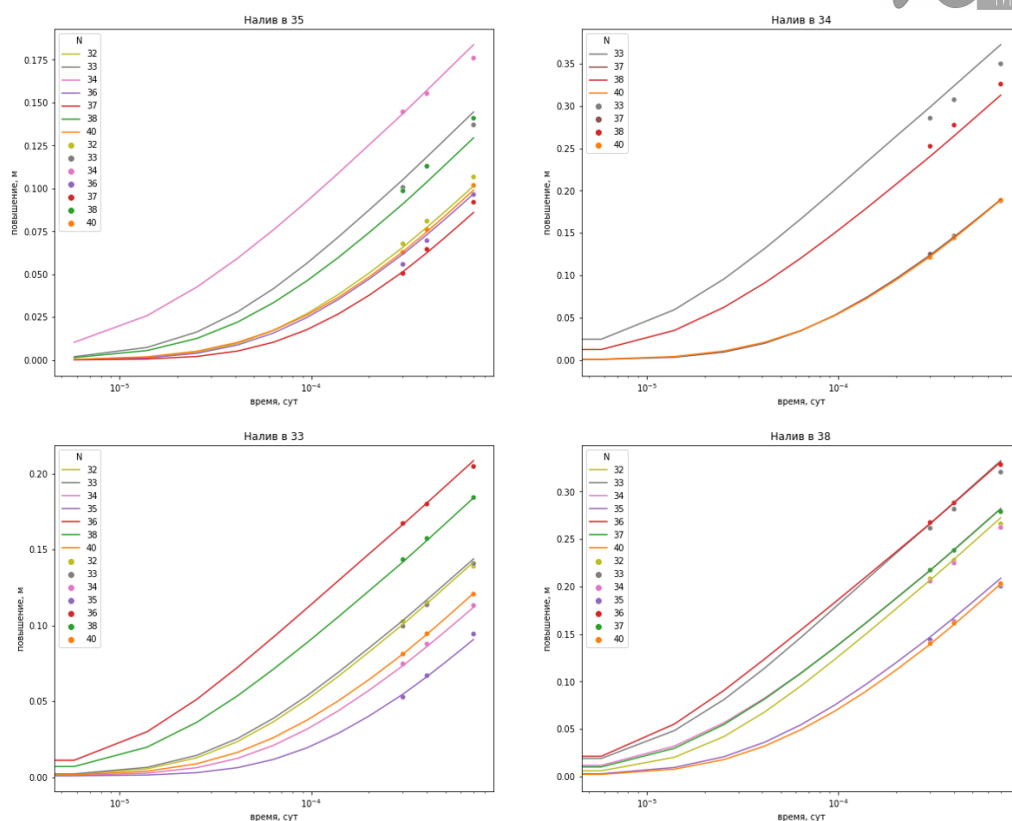


Рис. 4 Верификационные графики для 4-х наливов (точки – фактические замеры, линии – модельные кривые повышения уровня подземных вод).

Список литературы

1. Лехов А.В., Картунов Е.В., Лехов В.А., Самарцев В.Н., Шарапута М.К. Детализация гидрогеологических характеристик водоносного горизонта в карстующихся известняках (Звенигородский полигон МГУ имени М.В. Ломоносова) // Инженерная геология. 2019. Том XIV, № 1, С. 72–87.
2. Mohammadi, Z., Illman, W.A. Detection of karst conduit patterns via hydraulic tomography: a synthetic inverse modeling study // J. Hydrol. 2019. 572, pp. 131–147.
3. Yeh, T.-C.-J., Liu, S. Hydraulic tomography: development of a new aquifer test method // Water Resour. Res. 2000. № 36 (8), pp. 2095–2105.

УДК 622.83, 556.343

ГИДРОГЕОМЕХАНИКА КАК ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СТРУКТУРЕ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ

С.Н. Тагильцев*¹

¹Уральский Государственный Горный Университет, Екатеринбург, Россия, E-mail: tagiltsev@k66.ru

Аннотация

Важнейшим свойством массивов скальных горных пород является наличие открытых взаимосвязанных трещин. Трещиноватость определяет проницаемость скальных пород, обуславливает фильтрационную структуру породных массивов. Трещины в скальных горных породах образуются под действием внешних и внутренних сил. Проницаемость скальных массивов формируется в результате современных геомеханических (силовых) процессов. Напряженное состояние земной коры приводит к формированию в скальных массивах деформационных (тектонических) структур, определяющих их гидрогеологические свойства. Основным предметом гидрогеомеханики скальных массивов являются геомеханические процессы, определяющие формирование емкостных и фильтрационных свойств массивов горных пород.

Трещинная структура приповерхностной части скальных массивов определяется возникновением, в условиях напряженного состояния, зоны хрупкой деформации, и формированием водоносного комплекса приповерхностной (региональной) трещиноватости. Геомеханические закономерности развития трещин по глубине предопределяют фильтрационную стратификацию водоносного комплекса, т.е. чередование проницаемых и относительно водоупорных слоев. Тектонические нарушения (разломы), активные в поле современных напряжений, формируют в скальных массивах закономерную систему водоносных зон. Степень проницаемости, мощность и структура разломов определяется иерархической подчиненностью тектонических нарушений в системах геодинамической этажности и геомеханической зональности. Потенциальную активность, и, соответственно, гидрогеологическую роль разломов можно оценить, анализируя их положение в поле современных напряжений.

Ключевые слова: гидрогеомеханика, скальные массивы, трещины, проницаемость, напряженное состояние, фильтрационная стратификация, активные разломы

HYDROGEOMECHANICS AS A THEORETICAL BASIS OF IDEAS ABOUT THE FILTRATION STRUCTURE OF ROCK MASSES

S.N. Tagiltsev*¹

¹Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation, E-mail: tagiltsev@k66.ru

Abstract

The most important property of rock massifs is the presence of open interconnected cracks. Fracturing determines the permeability of rocks, determines the filtration structure of rock massifs. Cracks in rocky rocks are formed under the influence of external and internal forces. The permeability of rock massifs is formed as a result of modern geomechanical (power) processes. The stress state of the Earth's crust leads to the formation of deformation (tectonic) structures in rock massifs that determine their hydrogeological properties. The main subject of hydrogeomechanics of rock massifs are geomechanical processes that determine the formation of capacitive and filtration properties of rock massifs.

The fractured structure of the near-surface part of rock massifs is determined by the occurrence, under stress conditions, of a zone of brittle deformation, and the formation of an aquifer complex of near-surface (regional) fracturing. Geomechanical patterns of crack development in depth determine the filtration stratification of the aquifer complex, i.e. the alternation of permeable and relatively water-resistant layers. Tectonic disturbances (faults), active in the field of modern stresses, form a regular system of aquifers in rock massifs. The degree of permeability, thickness and structure of faults is determined by the hierarchical subordination of tectonic disturbances in the systems of geodynamic number of floors and geomechanical zonality. The potential activity and, accordingly, the hydrogeological role of faults can be assessed by analyzing their position in the field of modern stresses.

Key Words: hydrogeomechanics, rock massifs, cracks, permeability, stress state, flow stratification, active faults

Введение

Основы гидрогеомеханики применительно к пористым дисперсным грунтам были разработаны В.А. Мироненко и В.М. Шестаковым путем совместного и взаимно увязанного рассмотрения основных проблем механики грунтов и фильтрации подземных вод в рамках одной научной дисциплины. Опираясь на представления авторов термина, следует считать, что гидрогеомеханика объединяет теоретические основы геомеханики и геофильтрации, и рассматривает гидрогеологические и инженерно-геологические процессы с механических позиций на основе схематизации геологических условий [1; 2].

Основные направления гидрогеомеханики пористых грунтов связаны с изучением механических свойств массивов в зависимости от степени их водонасыщения. Отличительной особенностью пористых дисперсных грунтов является то обстоятельство, что фильтрационные и емкостные свойства присущи им изначально, и определяются их генезисом. Инженерно-геологические свойства массивов скальных горных пород относительно слабо, по сравнению с пористыми грунтами, зависят от степени их водонасыщения. Скальные горные породы характеризуются высокой прочностью, а законы деформирования близки к законам деформирования упругих твердых тел. Важнейшим фактором, определяющим свойства твердых горных пород, является наличие трещин. Трещиноватость определяет проницаемость горных пород, обуславливает механическую и фильтрационную анизотропию скальных массивов. В древних горно-складчатых районах первичные коллекторские свойства скальных пород в ходе длительного геологического развития были полностью утрачены, и возникли вновь в приповерхностной части земной коры в виде зон трещиноватости [3]. Трещины в скальных горных породах образуются под действием внешних или внутренних сил. Следовательно, проницаемость этих пород формируется в результате геомеханических процессов.

Методы исследований

Разнообразные исследования, выполненные в последние десятилетия в различных регионах земного шара, убедительно показали, что земная кора находится в напряженно-деформированном состоянии. Тектонические силы фиксируются на относительно небольших глубинах от поверхности земли. Вектор действия главных максимальных напряжений имеет субгоризонтальную ориентировку. Значения главных напряжений, действующих в горизонтальной плоскости, в несколько раз превышают вертикальные напряжения от веса горных пород. Следует полагать, что основным фактором образования трещин в скальных горных породах являются тектонические силы.

Основная идея, лежащая в основе гидрогеомеханики скальных массивов, состоит в том, что напряженное состояние земной коры приводит к формированию в скальных массивах деформационных (тектонических) структур, определяющих их гидрогеологические свойства. Основным предметом гидрогеомеханики скальных массивов являются геомеханические процессы, определяющие формирование емкостных и фильтрационных свойств массивов горных пород [4].

Массивы горных пород чаще всего находятся в предельно напряженном состоянии, т.е. максимальные значения напряжений ограничиваются прочностными характеристиками породных массивов. Состояние предельного равновесия поддерживается разгрузкой напряжений при развитии в массивах процессов хрупкой и хрупко-пластичной деформации. В результате деформации образуются тектонические структуры разрушения и предразрушения.

Структуры разрушения представлены тектоническими нарушениями (разломами). Структурами предразрушения являются массовые трещины, которые генетически связаны с этапом хрупкой деформации. Отличительной особенностью гидрогеомеханики является детальное рассмотрение процессов деформации на стадиях, предшествующих разрушению. На этих стадиях возникают массовые трещины предразрушения, которые образуют сеть взаимосвязанных водопроводящих каналов и формируют зону приповерхностной трещиноватости.

Цель гидрогеомеханики скальных массивов как научного направления заключается в последовательном решении ряда теоретических и прикладных задач. В первую группу задач входит экспериментально-теоретическое обоснование математических моделей геомеханических процессов, происходящих в скальных горных породах (в материале) и в породных массивах (в верхней части земной коры). На основе математических моделей геомеханических процессов (следующая группа задач), разрабатываются методы анализа и прогноза характеристик тектонических структур скальных массивов [4]. Основной гидрогеологической задачей является выявление закономерностей фильтрационной структуры скальных массивов.

Результаты и их обсуждения

Фильтрационная структура скальных массивов определяется развитием зон открытых взаимосвязанных трещин и состоит из двух компонентов. Вблизи поверхности земли практически повсеместно фиксируется зона региональной приповерхностной трещиноватости. На фоне относительно равномерной региональной трещиноватости выделяются локальные водоносные зоны, связанные с тектоническими нарушениями. Сочетание региональной зоны приповерхностной трещиноватости и локальных водоносных зон привело к формированию представлений о корово-блоковой структуре скальных массивов [3].

Массовые трещины предразрушения развиваются в приповерхностной зоне хрупкой деформации. Мощность этой зоны в скальных массивах составляет, в среднем, 300-400 м [5; 6]. В регионах, где основу геологического разреза составляют терригенные образования, глубина развития зоны хрупкой деформации может достигать 1000 м [7]. Сеть взаимосвязанных открытых трещин предразрушения определяет существование вблизи земной поверхности водоносного комплекса приповерхностной трещиноватости. Геомеханические закономерности развития процессов хрупкой деформации определяют формирование фильтрационной стратификации скальных массивов [4; 5; 6; 7]. Фильтрационная стратификация проявляется в чередовании проницаемых и относительно водоупорных слоев. При детальном гидрогеологическом исследовании нередко фиксируется закономерное изменение напоров подземных вод по вертикали.

В самой верхней части скальных массивов, средней мощностью около 50 м, развивается запредельная деформация, нарушается сплошность массива и теряются механические связи между породными блоками. В этой части скальных массивов происходит полная разгрузка тектонических напряжений и устанавливается литостатическое (геостатическое) напряженное состояние. Преобладание вертикальных напряжений способствует проникновению поверхностных вод и развитию в этой части разреза процессов физико-химического выветривания. Активное проявление в этой зоне процессов выветривания является одной из причин широкого применения термина «экзогенная трещиноватость». Учитывая тектонический генезис зоны приповерхностной трещиноватости, следует считать этот термин не совсем корректным. Кроме того, представления об экзогенном генезисе зоны региональной трещиноватости приводят к ограничениям, по глубине, поисковых и разведочных работ.

Гидрогеологические свойства скальных массивов в значительной степени определяются наличием и свойствами тектонических нарушений [8; 9]. Обводненные разломы представляют собой самостоятельные гидрогеологические структуры, которые нередко относительно слабо связаны со свойствами породного массива. Основное гидрогеологическое значение имеют тектонические нарушения, которые активны (подвижны) в настоящее геологическое время. Потенциальную активность разломов можно оценить, анализируя его положение в поле современных напряжений [8]. В свою очередь, ориентировка осей главных напряжений может быть определена на основании результатов изучения положения в пространстве тектонических нарушений, особенно водоносных, и систем трещин [4].

Основным процессом, определяющим «приоткрывание» тектонических трещин и повышенную проницаемость разломов, является сдвиг или активизация бортов тектонических нарушений относительно друг друга. Поэтому основное гидрогеологическое значение имеют разломы сдвигового генезиса (сдвиги). В зоне разлома, который формируется с преобладанием процесса хрупкой деформации, возникают участки сжатия и растяжения [9]. В зонах сжатия проницаемость снижается, а в зонах растяжения, в связи с раскрытием трещин, фильтрационные свойства породного массива возрастают. Преобладание хрупкой деформации ведет к возникновению открытых, и соответственно, проницаемых трещин. Преобладание пластичной деформации может привести к образованию водоупорной зоны.

Необходимо различать естественное состояние, и, соответственно, естественные тектонические структуры скальных массивов, и техногенные тектонические структуры, возникающие как реакция геологической среды на различные виды техногенных воздействий (строительство, горные работы). Геологическая среда, находясь в состоянии предельного равновесия, очень чутко реагирует на техногенные воздействия. Активная реакция геологической среды приводит к формированию техногенных структур, значительно отличающихся по своим фильтрационным характеристикам от естественных образований.

Заключение

Основные выводы по результатам теоретических и полевых исследований сводятся к следующему:

- Трещинная структура приповерхностной части скальных массивов определяется формированием, в условиях напряженного состояния, зоны хрупкой деформации, мощность и строение которой связаны с геомеханическими параметрами геологической среды аналитическими зависимостями.
- Сеть массовых трещин предразрушения зоны хрупкой деформации земной коры формирует водоносный комплекс приповерхностной трещиноватости, а геомеханические закономерности развития трещин по глубине определяют фильтрационную стратификацию водоносного комплекса.
- Тектонические нарушения, активные в поле современных напряжений, формируют в скальных массивах закономерную систему водоносных зон. Степень проницаемости, мощность и структура разломов определяется соотношением хрупкой и пластичной деформации в зоне тектонического шва.
- Техногенные процессы, вызывающие существенные изменения рельефа земной поверхности сопровождается активизацией процессов деформирования в верхней части земной коры, которые изменяют естественную геомеханическую и фильтрационную структуру скальных массивов.

Список литературы

1. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики / М.: Недра, 1974. 296 с.
2. Шестаков В.М. Гидрогеомеханика. Уч. пособ. / М.: Из-во МГУ, 1998. 72 с.
3. Антыпко Б.Е. Гидрогеологические емкости горно-складчатых областей. / М.: Недра, 1986. 185 с.
4. Тагильцев С.Н. Основы гидрогеомеханики скальных массивов. Уч. пособ. / Екатеринбург: Из-во УГГГА, 2003. 88 с.
5. Тагильцев С.Н., Лукьянов А.Е. Гидрогеологические признаки тектонической стратификации скального массива. // Инженерная геология. 2009. № 1. С.60–64.
6. Тагильцев С.Н., Лукьянов А.Е. Гидрогеологическое расслоение скального массива в условиях современного напряженного состояния. // Литосфера. 2010. № 2. С. 122–129.
7. Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Лукьянов А.Е., Сурганов С.В. Тектоническая стратификация палеозойских терригенных отложений. // Подземная гидросфера: Материалы XXIII совещания по подземным водам востока России. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2021. С. 111–116.
8. Тагильцев С.Н. Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры // Горный журнал. Изв. ВУЗов. – 2018. № 7. С. 52–66.

9. Тагильцев С.Н., Кибанова Т.Н., Тагильцев В.С., Сурганов С.В. Геомеханический анализ гидрогеологических свойств тектонических нарушений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5-1. С. 145–157.

УДК 556.34

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ ПРИ НАРУШЕНИИ ЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА ФИЛЬТРАЦИИ

С.Н. Тагильцев*¹, С.В. Сурганов¹, В.С. Тагильцев¹

¹Уральский Государственный Горный Университет, Россия, Екатеринбург. E-mail: tagiltsev@k66.ru

Аннотация

При решении ряда гидрогеологических задач возникает необходимость проведения фильтрационных расчетов с учетом нарушения верхней границы применимости линейного закона фильтрации. Для решения вопросов, связанных с проведением и интерпретации фильтрационных опробований при нарушении линейного закона фильтрации, были выполнены теоретические и экспериментальные исследования. Переходный режим течения, который возникает при нарушении ламинарного режима в гладких и шероховатых щелях (аналогах трещин) подчиняется линейному закону сопротивления, но характеризуется значительным снижением фильтрационных показателей. В качестве критерия, определяющего возникновение нелинейности в щелях и трещинах, удобно использовать величину критического расхода на единицу ширины потока (единичный расход). В качестве параметра, определяющего возникновение и развитие нелинейности в скважинах, следует использовать величину отношения расхода к радиусу скважины, отражающую единичный расход плоско-радиального потока.

Уравнения Дюпюи и Джейкоба описывают развитие нелинейности в плоско- потоке, но необходимо учитывать размеры прискважинной зоны, в которой возникает переходный режим фильтрации и происходит резкое снижение фильтрационных показателей. Вероятность возникновения нелинейной фильтрации меняется в зависимости от структуры трещинного пространства. С увеличением количества трещин и повышением степени однородности среды вероятность возникновения нелинейности снижается.

Ключевые слова: линейный закон фильтрации, верхняя граница применимости, ламинарный режим течения, переходный режим, критический единичный расход, зона нелинейности, эффекты нелинейности при откачках

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE METHOD OF INTERPRETATION OF FILTRATION TESTS IN VIOLATION OF THE LINEAR FILTRATION LAW

S.N. Tagiltsev*¹, S.V. Surganov¹, V.S. Tagiltsev¹

Abstract

When solving a number of hydrogeological problems, it becomes necessary to carry out filtration calculations taking into account the violation of the upper limit of the applicability of the linear filtration law. Theoretical and experimental studies were carried out to solve issues related to the conduct and interpretation of filtration tests in violation of the linear filtration law. The transient flow regime that occurs when the laminar regime is violated in smooth and rough cracks (analogs of cracks) obeys the linear law of resistance, but is characterized by a significant decrease in filtration parameters. As a criterion determining the occurrence of nonlinearity in cracks and cracks, it is convenient to use the value of the critical flow rate per unit of flow width (unit flow rate). As a parameter determining the occurrence and development of nonlinearity in wells, it is necessary to use the value of the ratio of the flow rate to the radius of the well, reflecting the unit flow rate of the plane-radial flow.

The Dupuy and Jacob equations describe the development of nonlinearity in a plane-radial flow, but it is necessary to take into account the size of the downhole zone in which a transient filtration mode occurs and a sharp decrease in filtration parameters occurs. The probability of nonlinear filtration varies depending on the structure of the crack space. With an increase in the number of cracks and an increase in the degree of uniformity of the medium, the probability of non-linearity decreases.

Key Words: linear filtration law, upper limit of applicability, laminar flow mode, transient mode, critical unit flow rate, nonlinearity zone, effects of nonlinearity during pumping

Введение

При решении ряда гидрогеологических задач возникает необходимость проведения фильтрационных расчетов с учетом нарушения верхней границы применимости линейного закона фильтрации. Решение этих вопросов наиболее актуально при проведении гидрогеологических исследований на месторождениях твёрдых и жидких полезных ископаемых, а также на участках захоронения вредных отходов. Большие перепады напоров вблизи горных выработок, высокие скорости течения подземных вод в трещинах создают благоприятные условия для возникновения нелинейной фильтрации. Для разработки методики проведения и интерпретации опытно-фильтрационных работ (ОФР) при нелинейности в трещиноватых горных породах, необходимо дополнить теоретические основы фильтрационных расчетов.

Методы исследований

При нарушении верхней границы применимости линейного закона фильтрации обычно используются законы сопротивления, предложенные при решении различных гидравлических задач. Нередко используются двухчленные, квадратичные и степенные зависимости. Обзор исследований по обозначенному направлению фильтрационных расчётов представлен в

многочисленных публикациях и учебниках [1-4]. Важную роль при изучении нелинейности занимают экспериментальные работы. В большинстве этих работ отсутствуют теоретические обобщения, которые можно рассматривать как модель процесса, пригодную для анализа результатов опытно-фильтрационных работ. Чаще всего исследователи пытались найти универсальные зависимости [1-3], которые с учетом структуры среды и раскрытия трещин описывали все этапы развития нелинейности. Учесть в расчетных зависимостях конкретные раскрытия трещин и структуру трещинной среды при проведения опытно-фильтрационных работ практически очень трудно.

Необходимо обосновать закон сопротивления для конкретного режима течения, который граничит с ламинарным, и, следовательно, развивается при нарушении линейного закона фильтрации. В качестве критерия возникновения нелинейности следует применять параметр, в котором отсутствуют, выраженные в явном виде, размеры трещин и скорости течения в них. В качестве модели трещины обычно рассматривается гладкая щель с параллельными стенками. Для обоснования модели процесса выполнен анализ закономерностей нарушения ламинарного режима течения по литературным данным [5]. Переход к турбулентному течению, по мере возрастания скорости, включает несколько этапов. Ламинарный режим течения сменяется переходным режимом. Первоначально в щели формируется профиль скорости с точкой перегиба, и это явление можно условно представить, как процесс сжатия потока в трубах и щелях. Данное течение можно описать уравнением для ламинарного режима [6], только с меньшей величиной раскрытия щели, которое пропорционально величине сжатия.

Результаты и их обсуждения

Для обоснования закона сопротивления при переходном режиме течения в щелях использовались результаты экспериментов, выполненных автором [5; 6], и заимствованные из литературных источников. Анализ данных убедительно показал, что сжатие потока в щели, которое определяет нарушение ламинарного режима течения, происходит практически скачкообразно. Далее переходный режим течения, в определенном диапазоне расходов, подчиняется линейному закону сопротивления [6]. При смене ламинарного режима течения переходным режимом, скачком уменьшается коэффициент сопротивления (коэффициент фильтрации), но линейный закон сопротивления сохраняется.

В качестве критерия нарушения ламинарного режима течения в щелях обычно используется число Рейнольдса (Re). Этот параметр содержит величину раскрытия щели, что неприемлемо в практических расчётах. Для модели трещины, в качестве критической величины для линейного потока, следует применять значение расхода на единицу ширины потока в щели (единичный расход) [5]. В условиях радиального потока значение критического расхода отражает выражение $Q_{кр}/r_c$. ($Q_{кр}$ – расход плоскорадиального потока; r_c – радиус скважины).

Размеры зоны нелинейности (r_n), которая образуется вблизи скважины, при расходе больше критического ($Q_{кр}$), определяются выражением:

$$Q_n/Q_{кр} = r_n/r_c. \quad (1)$$

Общие потери напора в скважине (S_c) складываются из потерь напора в зоне переходного режима ($\Delta S_{нл}$) и потерь напора в зоне сохранения ламинарного режима течения ($S_{кр}$):

$$S_c = S_{кр} + \Delta S_{нл}. \quad (2)$$

Потери напора для каждой зоны депрессионной воронки описываются при стационарном режиме формулой Дюпюи, с учётом изменения закона сопротивления в зоне нелинейности. В зоне переходного режима (в зоне нелинейности) применяется коэффициент водопроницаемости для этой зоны (T_n), который в несколько раз меньше значения параметра водопроницаемости (T) при сохранении ламинарного режима течения.

Для исследования закономерностей нарушения линейного закона течения в плоско-радиальном потоке и проверки зависимостей (1,2) проведены эксперименты на лабораторных установках [5]. Эти эксперименты полностью подтвердили правильность математической модели процесса. При изменении расхода и, соответственно, размеров зоны нелинейности, значения параметра T_n в зоне переходного режима сохранялись постоянными. Выявлена зависимость величины T_n от проницаемости щели и размеров экспериментальных установок.

Среднее значение числа Рейнольдса для щелей было определено равным 220. Температуры воды в пределах от 1 до 13 градусов не оказывает существенного влияния на точность расчетов. Величина $Q_{кр}/r_c$ для отдельной щели именуется критерием нелинейности. Средняя величина критерия нелинейности для отдельной щели составляет $375 \text{ м}^2/\text{сутки}$.

Природная трещинная среда существенно отличается от своей элементарной модели (гладкой щели). Проверка влияния особенностей строения реальной среды выполнена, в основном, экспериментальным способом. В лабораторных условиях имитировалась шероховатость трещин, кольматация прискважинной зоны, система невзаимодействующих трещин разного раскрытия и другие условия. Во всех случаях предложенные зависимости (1, 2) описывали процесс развития переходного режима течения с высокой степенью достоверности. Параметры R_e и $Q_{кр}/r_c$ при выполнении опытов в шероховатых щелях имеют те же значения, что и в гладких. Выявлены также некоторые отличия, характерные для реальных условий. Диапазон расходов, в котором сохраняется переходный режим, в сетях трещин значительно выше, чем в отдельных трещинах. Поэтому вероятность развития турбулентного режима течения при проведении опытно-фильтрационных работ невелика.

В системе трещин разного раскрытия нелинейность возникает, прежде всего, в самой крупной (главной) трещине. Величина критического расхода определяется водопроницаемостью всей системы трещин. В сложной системе трещин критерий нелинейности отличается от значения критерия в одиночных щелях (трещинах). Структура трещинной среды оказывает значительное влияние на величину критического расхода скважины. Чем больше количество трещин и выше степень однородности трещинного пространства, тем больше величина критического расхода и меньше вероятность возникновения нелинейности.

Проверка экспериментально-теоретической модели процесса проводилась по данным наливов и нагнетаний, выполненные с $5 \div 10$ ступенями дебита и напорами, превышающими статический уровень на величину до $200 \div 300$ м. Опытно-фильтрационные работы (ОФР) выполнялись на участках заложения шахтных стволов на Северо-Уральском бокситовом руднике. Все ступенчатые ОФР, при проведении которых выявилось нарушение линейного закона фильтрации, обработаны по методике, изложенной выше. Независимо от величины водопроницаемости водоносных зон, диапазона напоров и других факторов, результаты обработки полностью подтверждают правильность теоретических предпосылок и аналитических зависимостей. Не выявлено каких-либо аномалий, которые могли бы указывать на существенное проявление других процессов, кроме процесса развития нелинейности. Нелинейность во всех случаях ограничивалась переходным режимом течения. Размеры зоны нелинейности невелики, и обычно не превышают величины 1-2 радиусов опытной скважины. Это исключает проявление нелинейности даже в самых близких наблюдательных скважинах. Несмотря на небольшие размеры зоны нелинейности, дополнительные потери напора имеют весьма существенные величины.

Влияние нарушения линейного закона на результаты ОФР при нестационарной фильтрации изучалось различных объектах. Выполнен анализ данных по откачкам с постоянным дебитом. Анализ полученных зависимостей позволяет считать, что график временного прослеживания понижения по центральной (опытной) скважине, при развитии нелинейности, аппроксимируется прямой линией, но очень часто имеет неустойчивый, иногда «скачкообразный» характер, и отличается рядом характерных особенностей. Признаками нарушения линейного закона фильтрации при нестационарном режиме откачки являются: аномально длительное проявление эффекта влияния ёмкости ствола центральной скважины на этапе возмущения (собственно откачки); несовпадение, особенно в начальный период, формы графиков временного прослеживания понижения уровня (откачка) и восстановления уровня после откачки; «скачки» уровня на временном графике возмущения (откачки); аномально высокое значение уклона графика на участке влияния (псевдо влияния) ёмкости ствола скважины (C_y) по отношению к уклону графика на расчётном участке (C_p) при восстановлении ($C_y/C_p > 10$); аномально высокое значение соотношения значения водопроницаемости (T) и

величины удельного дебита (q), примерно $T/q > 3$; аномально низкое значение действующего гидродинамического радиуса скважины (r_c), обычно $r_c \leq 10^{-5}$.

Даже небольшие колебания дебита очень существенно отражаются на форме временных графиков прослеживания понижения уровня. Это связано со степенной, близкой к квадратичной, связи понижения уровня и дебита, которая формально реализуется при развитии процесса нелинейности в прискважинной зоне. Поэтому оценка параметров нелинейности по данным откачек с постоянным дебитом носит ориентировочный характер. Вместе с тем, достоверная интерпретация результатов откачек позволяет количественно оценивать степень нарушения линейного закона фильтрации и целенаправленно планировать более детальные исследования.

Заключение

1. Переходный режим течения, который возникает при нарушении ламинарного режима в гладких и шероховатых щелях (аналогах трещин) подчиняется линейному закону сопротивления, но характеризуется значительным снижением фильтрационных показателей.

2. В качестве параметра, определяющего возникновение и развитие нелинейности, следует использовать величину отношения расхода к радиусу скважины, отражающую единичный расход плоско-радиального потока. Уравнения Дюпюи и Джейкоба описывают развитие нелинейности в плоско-радиальном потоке, но необходимо учитывать размеры прискважинной зоны, в которой возникает переходный режим фильтрации и происходит резкое снижение фильтрационных показателей.

3. Вероятность возникновения нелинейной фильтрации меняется в зависимости от структуры трещинного пространства. С увеличением количества трещин и повышением степени однородности среды вероятность возникновения нелинейности снижается. Регулирование степени развития нелинейности достигается выбором диаметра скважины и соответствующего дебита.

Список литературы

1. Гавич И.К. Гидрогеодинамика / М.: Недра, 1988. 349 с.
2. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика / М.: КДУ, 2009. 334 с.
3. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Каневская Р.Д., Максимов В.М. Подземная гидромеханика / М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2006. 488 с.
4. Кадет В.В., Чигиров П.С. Перколяционный анализ границ применимости линейного закона фильтрации // Труды университета нефти и газа им. И.М. Губкина. № 3 (264). 2011. С. 28-37.
5. Тагильцев С.Н. Постановка и результаты экспериментальных исследований закономерностей нарушения линейного закона фильтрации в трещинных средах // Гидрогеология и инженерная геология. Межвуз. Сб. – Новочеркасск: НПИ, 1982. – С. 47-63.

6. Тагильцев С.Н. Экспериментально-теоретическая модель процесса нарушения линейного закона фильтрации и ее практическое значение // Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов: Материалы 1 Всесоюз. Конф. Т. 1. - М.: Наука, 1982. - С. 118-123.

УДК 532.546

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ГИДРОГЕОМЕХАНИКА – ИСТОКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ**М.Г. Храмченков*^{1,2}, Р.М. Усманов¹**¹Казанский федеральный университет, Казань, Россия, E-mail: mkhramch@gmail.com; almightyhero@mail.ru²Казанское отделение МСЦ РАН – филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Казань, Россия**Аннотация**

В работе рассмотрена возможность обобщения классических моделей гидрогеомеханики на случаи, в которых важную роль играют физико-химические процессы. Разработано теоретическое обоснование, следствием которого явилось возможность вычислить реологические характеристики глин по экспериментальным значениям электропроводности и наоборот. Получено экспериментальное подтверждение взаимосвязи электропроводности и вязкости глин по Кельвину-Фойгту.

Ключевые слова: реология, электропроводимость, глинистые покрывки, деформации**PHYSICAL AND CHEMICAL HYDROGEOMECHANICS - ORIGINS AND PERSPECTIVES****M.G. Khrumchenkov*^{1,2}, R.M. Usmanov¹**¹Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation, E-mail: mkhramch@gmail.com; almightyhero@mail.ru²Kazan branch of the MSC RAS - branch of the Federal State Institution FNTs NIISI RAS, Kazan, Russian Federation**Abstract**

The work considers the possibility of generalizing the classical models of hydrogeomechanics to cases in which physical and chemical processes play an important role. A theoretical justification has been developed, which resulted in the possibility of calculating the rheological characteristics of clays from experimental values of electrical conductivity and vice versa. Experimental confirmation of the relationship between the electrical conductivity and viscosity of clays according to Kelvin-Voigt has been obtained.

Key Words: rheological properties, electro-conductivity, clayey bed, deformations**Введение**

Специфические свойства глин (низкая проницаемость и теплопроводность, пластичность во влажном состоянии) обусловлены наличием в их составе особых частиц - глинистых минералов. Глинистые минералы представляют собой гидроалюмосиликаты кальция, натрия,

калия, и они часто представляют собой тонкие листовые частицы (около 50-100 нм в диаметре и 1 нм в высоту). Частицы глинистых минералов имеют вид тонких изометрических или удлиненных пластин, чешуек, игл и труб.

Наличие в составе пород глинистых минералов делает их слабопроницаемыми, поэтому такие породы обычно играют роль флюидоупоров и препятствуют вертикальной миграции подземных флюидов, в том числе нефти. При разработке нефтяных месторождений прогноз свойств глинистых покрышек нефтяных пластов играет важную роль, особенно в случае использования методов, связанных с существенным воздействием на реологические свойства глинистых пород (прежде всего, это гидроразрыв, тепловые и некоторые физико-химические методы).

Гидратация глинистых частиц и связанное с этим изменение их фильтрационных свойств приводит к увеличению объема горных пород (набуханию). Способность к набуханию связана с гидрофильным характером глинистых минералов, слагающих связные грунты и горные породы, обладающие большой удельной поверхностью. Молекулы воды уменьшают силы сцепления между глинистыми частицами, раздвигают их и этим вызывают уменьшение свободного объема пор, а в последующем – увеличение объема грунта или горной породы. Набухание тесно связано со связанностью грунта или горной породы. В процессе набухания не только увеличивается объем грунта или горной породы, но и уменьшается связанность благодаря значительному ослаблению сцепления между отдельными частицами. Набухание грунтов или горных пород может привести к частичной, а в некоторых случаях и полной потере связности. Процесс набухания носит, главным образом, осмотический характер. Причиной, вызывающей набухание, является разница в концентрации солей во внутри-агрегатном растворе и в воде, окружающей набухающие агрегаты. Если концентрация внешнего по отношению к набухающим агрегатам раствора меньше концентрации раствора, находящегося во внутри-агрегатных порах, происходит набухание породы (оно тем больше, чем больше разница концентрации этих растворов). Если же концентрация внешнего раствора больше концентрации порового раствора, то набухание может не происходить; в этом случае может наблюдаться сжатие породы, подобное тому, какое наблюдается при ее высыхании [1; 2]. Изменение количества связанной глинистыми частицами воды изменяет и реологические свойства глин и глинистых пород в целом.

При разработке нефтяных месторождений, особенно месторождений с так называемыми трудноизвлекаемыми запасами, часто используются методы, существенно влияющие на физические и химические условия пласта [3; 4]. Это в некоторых случаях приводит к изменению фильтрационных и реологических характеристик глинистых пород и возможной перестройке фильтрационных потоков в пласте. Поэтому необходимы исследования, позволяющие наиболее

полно описывать природу сложного комплекса физико-химических и физико-механических (включая реологические) свойств глин.

Методы исследований

Для проведения экспериментов был отобран ряд образцов с Бикляновского месторождения (Республика Татарстан).

Для характеристики состава глин нами проведён рентгеноструктурный анализ. Также нами были определены физические и физико-химические свойства глин, и далее проведены определения электропроводности и компрессионные испытания образцов глинистых пород. При испытании образец имел нарушенное сложение, плотность искусственно доводилась до значений 1,68-1,7 г/см³, влажность изменялась с шагом 5 % в пределах от 10 % до 30 %. Остальные параметры, влияющие на свойства грунтов (температура, химический состав и пр.) оставались без изменений. Измерение удельной электропроводности (сопротивления) и компрессионные испытания проводились согласно ГОСТ 12248-2010. По результатам испытаний были построены графики зависимости проводимости от влажности и кривая деформации. Полученные значения деформации были использованы для расчета вязкости с учетом реологии Кельвина-Фойгта. По данным одного из параметров с помощью формул (2) и (3), приведенных ниже, рассчитывались значения другого параметра (например, вязкости в модели Кельвина-Фойгта по экспериментальным значениям электропроводности). Наличие на рисунке нескольких расчетных кривых отражает тот факт, что в качестве исходных данных выбирались разные значения параметров).

Результаты и их обсуждения

Нами была разработана теория, предсказывающая согласованное изменение реологических свойств и электропроводности глин. Было показано, что реология глин описывается соотношениями, аналогичными соотношениям реологии Кельвина-Фойгта, причем коэффициент вязкости в полученном уравнении зависит от ряда параметров, в том числе от электропроводности. Это позволило провести ряд экспериментов по согласованному изменению этих двух свойств и на основании измерения одного свойства предсказывать другое.

Соотношения, описывающие зависимость деформаций глинистых пород от приложенных нагрузок и физико-структурных характеристик глинистых пород, получены методом, изложенным в [5], и имеет вид:

$$\begin{aligned} -\sigma^f - (\gamma_{ij}\gamma_{ij})^2 \cdot \kappa^{-1} \dot{\theta} &= \lambda \theta - \nu \sqrt{J_2'}, \\ (T_{ij} + \varphi_0 \cdot \gamma_{ij}) - (\gamma_{ij}\gamma_{ij})^2 \cdot \kappa^{-1} e'_{ij} &= (2\mu - \nu \theta / \sqrt{J_2'}) \varepsilon'_{ij}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ε'_{ij} , T_{ij} - компоненты девиаторов тензора деформаций и напряжений соответственно, μ, ν - упругие постоянные (коэффициенты Лямэ), J_2' - второй инвариант тензора деформаций, γ_{ij} - компоненты тензора структурных постоянных глины, κ - электропроводность глины, φ_0 - электрический потенциал двойного электрического слоя в межплоскостном пространстве глин, γ_{ij} - параметр, отвечающий за особенности структуры глины (топологии упаковки глинистых частиц), σ^f - эффективные напряжения, точка над буквой означает дифференцирование по времени [5]. В соответствии со вторым уравнением системы (1) для случая чистого сдвига имеем $\theta = 0$. Примем для простоты $\varphi_0 = 0$, что отвечает случаю толстых межслоевых пленок. Получающееся уравнение отвечает реологическому телу Кельвина-Фойгта [6], при этом эффективная вязкость η для такой реологии будет описываться соотношением:

$$(\gamma_{ij}\gamma_{ij})^2 \cdot \kappa^{-1} = \eta. \quad (2)$$

Обратим внимание, что соотношение (2) диктует обратную зависимость эффективной вязкости и электропроводности. Воспользовавшись полученным результатом и проведя серию измерений вязкости по методике определения этого параметра для тела Кельвина-Фойгта [6] и электропроводности, мы пересчитали по экспериментальным значениям электропроводности эффективную вязкость по соотношению (2) и сравнили ее с измеренными экспериментально значениями. Для каолинистых глин и гидрослюд получили идеальное согласие с соотношением (2). Для монтмориллонита экспериментальная зависимость электропроводности от вязкости, измеренной для реологического тела Кельвина-Фойгта, переходит в зависимость вида:

$$(\gamma_{ij}\gamma_{ij})^2 \cdot \kappa^{-\alpha} = \eta, \alpha = \text{const} \quad (3)$$

Параметр α принимает значения в диапазоне 1,11-1,20. Небольшие отклонения от выражения (2) объясняются, по нашему мнению, тем, что параметр φ_0 нельзя принимать равным нулю в силу относительно высокого значения межслоевого потенциала в монтмориллонитовых глинах.

Заключение

Было разработано теоретическое обоснование, следствием которого явилась возможность вычислить реологические характеристики глинистых пород по экспериментальным значениям электропроводности, и наоборот. Это расширяет возможности

прогноза свойств глинистых пород при проектировании технологии воздействия на нефтяной пласт.

Проведенные экспериментальные исследования полностью подтвердили предположение о реологическом поведении глин для сдвиговых напряжений согласно обобщенной нами модели реологии Кельвина-Фойгта.

Работа выполнена за счет средств субсидий, выделенных НИИСИ (проект № 0580-2021-0016)

Список литературы

1. Khrumchenkov M.G., Khrumchenkov E.M., Petrukha V.V. The valuation of swelling rate of clayey rock // Neftyanoe Khozyaystvo // Oil Industry. 2014. № 10, С. 54–56.
2. Khrumchenkov M.G., Khrumchenkov E.M., Petrukha V.V. The peculiarities of clayey rock swelling in electrolyte solutions // Neftyanoe Khozyaystvo // Oil Industry. 2015. № 9. С. 62–63.
3. Economides M., Nolte K (Eds.). Reservoir Stimulation. Wiley; 2000.
4. Fjaer E., Holt R.M., Hoursrud P., Raaen A.M., Risnes R. Petroleum Related Rock Mechanics. 2nd ed. Elsevier, Amsterdam and Oxford, 2008.
5. Khrumchenkov M.G. Rheological double-porosity model for clayey rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2005. Vol. 42. pp. 1006-1014.
6. Reiner M. Rheology. Springer-Verlag, Berlin-Gottingen-Heidelberg, 1958.

УДК 556.3

ГЕОГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ПИТАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

И.А. Чиганов*¹, С.О. Гринеvский¹, С.П. Поздняков¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: ilya-chiganov@mail.ru

Аннотация

Оценка влияния климатических изменений выполнялась на примере юго-западной части полуострова Крым. Проведено районирование территории по комплексу ландшафтных и климатических факторов, влияющих на формирование питания подземных вод, с выделением элементарных участков. Для каждого участка построены модели трансформации осадков на поверхности и построена карта инфильтрационного питания. На ней выделена представительная область, в которой оценено влияние ожидаемого к концу века изменения климата на питание подземных вод. В качестве климатического сценария выбран экстремальный сценарий потепления RCP 8.5. Для этого выполнен даунскейлинг прогнозов по 19 моделям общей циркуляции (МОЦ), используя климатический генератор LARS WG 6.0, а затем для каждого прогноза проведено моделирование формирования питания по той же методике, что и для современных условий. Для ансамбля прогнозов проанализирован индекс увлажнения и прогнозная величина инфильтрационного питания, по результатам выбраны: средняя, наименее и наиболее влажная МОЦ. Результаты модельного анализа показывают, что при развитии климатических изменений, согласно выбранному климатическому сценарию, произойдет уменьшение среднемноголетнего питания подземных вод к концу 21 века. Однако, абсолютные величины этого уменьшения существенного зависят от того, какая из МОЦ использовалась для прогноза.

Ключевые слова: изменение климата, инфильтрационное питание, даунскейлинг, моделирование инфильтрационного водообмена, модели общей циркуляции атмосферы и океана

HYDROGEOLOGICAL MODELING TO ASSESS THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON GROUNDWATER

I.A. Chiganov*¹, S.O. Grinevskiy¹, S.P. Pozdniakov¹

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: ilya-chiganov@mail.ru

Abstract

Assessment of the influence of climatic changes was carried out on the example of the southwestern part of the Crimean Peninsula. The territory was zoned by a complex of landscape and climatic factors affecting the formation of groundwater recharge, with the allocation of elementary areas. Models of precipitation transformation on the surface were developed for each area and map of groundwater recharge was constructed. For this map, a representative area was selected and the impact of the expected climate change by the end of the century on recharge estimated for it. The extreme warming scenario RCP 8.5 is chosen as the expected climate change. For this purpose, downscaling of projections from 19 general circulation models (GCMs) was performed using the LARS WG 6.0 climate generator, and then for each of the projections, simulation of recharge formation was performed using the same methodology as for current climate conditions. For the ensemble of forecasts, the wetting index and the predicted value of recharge were analyzed; based on the results of this analysis, the average, least and most humid GCMs were selected. Results of the simulation show, that at development of climatic changes, according to the chosen climatic scenario, there will be a decrease in average annual groundwater supply by the end of 21 century. However, absolute values of this decrease essentially depend on which of GCMs was used for the forecast.

Key Words: climate change, groundwater recharge, downscaling, infiltration water exchange modeling, atmospheric and oceanic general circulation models

Введение

Питание за счет инфильтрации атмосферных осадков играет важную роль в формировании естественных ресурсов подземных вод зоны активного водообмена. Инфильтрационное питание формируется за счет сложных процессов трансформации влаги атмосферных осадков на поверхности земли, в почве и зоне аэрации [1]. Климатические вариации внутригодового количества выпадающих осадков и температур приземного воздуха приводят к трансформации осадков на поверхности земли, впитывания влаги в почву и в конечном итоге к изменению инфильтрационного водообмена и связанных с ним естественных ресурсов подземных вод.

Целью работы является прогнозная оценка влияния климатических изменений на инфильтрационное питание подземных вод на территории юго-западного Крыма.

Методы исследований

Оценка влияния климатических изменений на подземные воды юго-западного Крыма проводится с помощью построения и сравнения карт инфильтрационного питания для существующих и прогнозных климатических условий, которые могут сформироваться к концу 21 века при экстремальном сценарии потепления.

На первом этапе производится построение карт инфильтрационного питания при естественных климатических условиях путем поэтапного решения следующих задач [1].

1. Районирование территории по комплексу ландшафтных и гидрогеологических факторов с выделением участков территории (типовых ландшафтов), отличающихся по условиям формирования инфильтрации.

2. Построение расчетных моделей трансформации осадков на поверхности и инфильтрационного водообмена для выделенных типовых условий при глубоком залегании уровня грунтовых вод.

3. Моделирование формирования водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации для различных ландшафтных условий территории и количественная оценка его среднесуточных составляющих - суммарной эвапотранспирации, поверхностного (склонового) стока и инфильтрации с использованием программных кодов SURFBAL [1] и HYDRUS 1D [3].

4. Верификация расчетных моделей и калибровка их параметров на основе сопоставления результатов моделирования с фактическими данными.

5. Построение итоговой карты среднесуточного инфильтрационного питания подземных вод.

На следующем этапе проводился ансамблевый прогноз инфильтрационного питания с использованием прогнозных результатов 19 моделей общей циркуляции (МОЦ) атмосферы и океана из семейства CMIP5 [4]. Для прогноза выбран сценарий RCP 8.5, максимальной концентрации CO₂. Этот сценарий высокой радиационной нагрузки, при котором стабилизация концентраций произойдет только к 2250 г.; при этом концентрация CO₂ будет порядка 2000ppm, что примерно в 7 раз выше ее доиндустриального уровня [5]. То есть при этом сценарии глобальный эффект потепления климата будет наибольшим, и, соответственно, следует ожидать заметные трансформации инфильтрационного водообмена поверхностных и подземных вод.

Прогнозное моделирование питания проводилось для самого большого по площади типа ландшафтных условий территории. Для оценки изменения питания по ансамблю МОЦ выполнен даунскейлинг результатов климатических прогнозов для каждой из 19 моделей на исследуемую территорию с привязкой к конкретным метеостанциям, данные которых использованы для моделирования на первом этапе. Для этого использовался стохастический генератор погоды. Этот генератор позволяет создавать стационарные стохастические ряды осадков, температур и солнечной радиации с использованием «обучения» по наблюдениям на конкретной метеостанции т.е. генерировать базовый климат местного масштаба и вносить в него изменения, основанные на прогнозных сценариях каждой из выбранных МОЦ. В результате моделирования климатической изменчивости при помощи LARS-WG 6.0 получено 20 модельных рядов климата (19 прогнозных и один -baseline для неизменного климата) (Табл. 1).

Далее сгенерированные климатические ряды используются для ансамблевого прогноза трансформации атмосферных осадков на поверхности, с помощью программы SURFBAL. Программа SURFBAL рассчитывает потенциальную эвапотранспирацию PET, поверхностный сток и впитывание влаги в почву, формируя таким образом верхнее граничное условия для процессов влагопереноса в зоне аэрации. Сформированные граничные условия далее используются в программе HYDRUS 1D, для расчета водного баланса в зоне аэрации и определения инфильтрационного питания подземных вод при разных климатических моделях.

С помощью анализов результатов ансамблевого прогноза по расчетному индексу увлажнения (в программе SURFBAL) и инфильтрационного питания (в программе HYDRUS 1D) определены средняя, наиболее влажная и сухая МОЦ для дальнейших построений трех соответствующих карт инфильтрационного питания.

Результаты и их обсуждения

Для юго-западной части полуострова Крым было произведено районирование территории по комплексу ландшафтных и гидрогеологических факторов, выделено 225 типов районов. Для представительной области с однородными условиями формирования питания произведен ансамблевый прогноз индекса увлажнения и инфильтрационного питания (Табл. 1). Из этой таблицы следует, что из 19 рассмотренных моделей 18 показали уменьшение индекса увлажнения и питания подземных вод на рассматриваемой территории в случае реализации сценария RCP 8.5. И только одна модель дает увеличение индекса увлажнения за счет существенного роста осадков. Эта модель была исключена из дальнейшего анализа. Из оставшихся 18 моделей выделены экстремальные: в таблице 1 синим цветом показана наиболее «влажная» модель, индекс увлажнения при данной модели изменился всего на 0,03 по сравнению с baseline. Зеленым цветом выделена «средняя» модель, ее индекс увлажнения уменьшился на 0,13, что равняется среднему изменению по всем моделям. Желтым цветом выделена «сухая» модель ее индекс увлажнения уменьшился на 0,22.

Большинство рассчитанных моделей в ансамблевом прогнозе показали уменьшение индекса увлажнения, с которым связано изменение инфильтрационного питания. Корреляция изменений инфильтрационного питания и индекса увлажнения показана на рис. 1.

Для дальнейшего построения карты инфильтрационного питания была выбрана «сухая» модель – IPSL-CM5A-MR, «влажная» модель – MRI-CGCM3 и «средняя» модель – INMCM4.

Табл. 1 Результат расчета индекса увлажнения и инфильтрационного питания при ансамблевом прогнозе для метеостанции Симферополь.

Модель	Осадки		Температура		Потенциальная эвапотранспирация		Индекс увлажнения	Инфильтрацион- ное питание	Δw	ΔI
	P, мм/год	ΔP , мм/год	T, град	ΔT , град	PET	PET/PETbase	I=P/PET	w, мм/год		
ACCESS1-3	462.92	-56.49	16.71	5.29	1014.08	1.21	0.46	3.99	-14.06	-0.17
BCC-CSM1-1	472.71	-46.70	15.26	3.84	930.40	1.11	0.51	11.72	-6.33	-0.11
CanESM2	544.26	24.85	16.38	4.97	965.85	1.16	0.56	11.55	-6.50	-0.06
CMCC-CM	416.82	-102.59	16.43	5.01	981.16	1.17	0.42	2.51	-15.54	-0.20
CNRM-CM5	640.59	121.17	15.22	3.80	930.70	1.11	0.69	38.42	20.37	0.07
CSIRO-MK36	472.45	-46.97	15.11	3.69	971.19	1.16	0.49	6.64	-11.41	-0.14
EC-EARTH	523.65	4.24	15.00	3.58	925.75	1.11	0.57	17.10	-0.95	-0.06
GFDL-CM3	510.59	-8.82	17.73	6.31	1064.96	1.28	0.48	3.77	-14.28	-0.14
GISS-E2-R-CC	460.97	-58.44	14.91	3.49	931.32	1.12	0.49	5.07	-12.98	-0.13
HadGEM2-ES	473.52	-45.89	16.45	5.03	1036.13	1.24	0.46	8.01	-10.04	-0.16
INMCM4	453.59	-65.83	14.40	2.98	913.26	1.09	0.50	10.83	-7.22	-0.13
IPSL-CM5A-MR	401.51	-117.90	17.01	5.59	998.05	1.20	0.40	3.24	-14.81	-0.22
MIROC-ESM	437.69	-81.73	17.72	6.30	1029.70	1.23	0.43	4.54	-13.51	-0.20
MIROC5	520.26	0.85	16.09	4.67	994.89	1.19	0.52	17.21	-0.84	-0.10
MPI-ESM-MR	474.22	-45.20	14.93	3.51	923.42	1.11	0.51	13.29	-4.76	-0.11
MRI-CGCM3	552.22	32.81	15.15	3.73	933.07	1.12	0.59	17.95	-0.10	-0.03
NCAR-CCSM4	478.08	-41.34	15.13	3.71	954.84	1.14	0.50	9.40	-8.65	-0.12
NCAR-CESM1-CAM5	468.16	-51.25	16.34	4.92	1019.79	1.22	0.46	6.76	-11.29	-0.16
NorESM1-M	491.89	-27.53	15.36	3.94	965.26	1.16	0.51	11.39	-6.66	-0.11
Baseline	519.41	0.00	11.42	0.00	835.06	1.00	0.62	18.05	0.00	0.00
Среднее по прогнозам	488.78		15.64		965.94	1.16	0.51		-8.89	-0.13

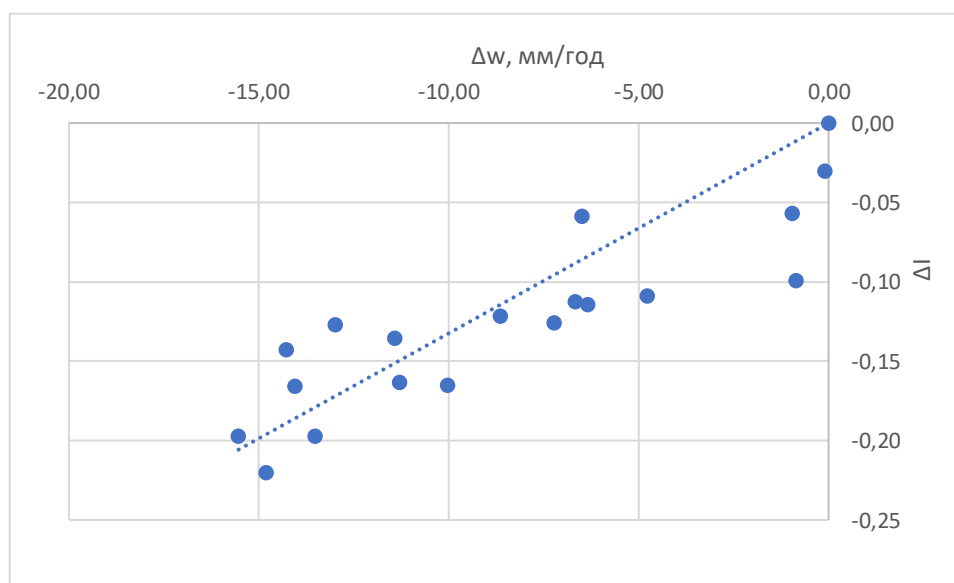


Рис. 2 График корреляции изменения инфильтрационного питания от индекса увлажнения в зависимости от климатической модели.

Заключение

Для исследуемых условий прогнозные климатические изменения при реализации экстремального сценария потепления к концу века приведут к направленному изменению

инфильтрационного водообмена поверхностных и подземных вод, выраженному в уменьшении среднесуточной величины инфильтрационного питания.

Выполненный ансамблевый прогноз показывает, что уменьшение инфильтрационного питания даже при одном и том же климатическом сценарии зависит от того, какая МОЦ использовалась при даунскейлинге климатических рядов. Поэтому для прогнозного гидрогеодинамического моделирования подземного стока целесообразно использовать варианты карт инфильтрационного питания, соответствующие наиболее «влажному», «среднему» и «сухому» климатическим сценариям.

Проведенное моделирование инфильтрационного водообмена показало, что величина изменения среднесуточного инфильтрационного питания хорошо коррелируется с изменением индекса увлажнения. При этом для самой «влажной» МОЦ инфильтрационное питание уменьшится на 0,10 мм, а при самой «сухой» модели – уменьшится примерно на 15 мм в год.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2021-0001 (№ государственной регистрации 121040700170-9) Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы

1. Гриневский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 543–557.
2. Semenov M.A. and Barrow E.M.. LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies// Harpenden, Hertfordshire, AL5 2JQ, UK, 2002. 28p.
3. Šimůnek J., Šejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M. Th. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Ver. 4.08. // Prepr. Depart. of Environ. Sci. University of California Riverside. California, Riverside. 2009. 296 p.
4. Taylor, K., Stouffer, R. & Meehl, G. An overview of CMIP5 and the experiment design. Bull. Am. Meteorol. Soc. 93, 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>, 2015.
5. Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR and others () The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463: 2010.747–756

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОГЕОДИНАМИКА: ПРОГРАММНЫЕ ПАКЕТЫ

УДК 556.3.01:519.6

ЛОГОС ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ОБЗОР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

А.Н. Бахаев¹, А.Ю. Борляева¹, И.В. Горев^{*1}, С.А. Козлова¹, О.Р. Кошмар¹,
Г.О. Кузина¹, Е.Н. Лысова¹, П.А. Машенькин¹, В.А. Пронин¹, М.Л. Сидоров¹,
Л.И. Скрыпник¹, Т.С. Трушкина¹, О.А. Чулкова¹

¹ ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, Россия, E-mail: staff@vniief.ru

Аннотация

Представлено описание цифрового продукта Логос Гидрогеология, предназначенного для решения широкого круга гидрогеологических и геоэкологических задач. Приведены целевые области применения и потенциальные потребители. Рассмотрены функциональные особенности, отмечены отличия от конкурентов. Перечислены моделируемые физические процессы. Дана краткая характеристика основных составляющих продукта. Приведены примеры решения тестовых задач и реальных производственных расчётов.

Ключевые слова: цифровой продукт Логос Гидрогеология, геофильтрационное и геомиграционное моделирование.

LOGOS HYDROGEOLOGY FUNCTIONALLY OVERVIEW

A.N. Bahaev¹, A.Yu. Borlyayeva¹, I.V. Gorev^{*1}, S.A. Kozlova¹, O.R. Koshmar¹,
G.O. Kuzina¹, E.N. Lysova¹, P.A. Mashenkin¹, V.A. Pronin¹, M.L. Sidorov¹,
L.A. Skrypnik¹, T.S. Trushkina¹, O.A. Tchulkova¹

¹ RFNC-VNIIEF, Sarov, Russian Federation, E-mail: staff@vniief.ru

Abstract

The description Logos Hydrogeology Computer-Aided Engineering. Logos Hydrogeology solves a wide range of hydrogeological and geoecological problems. The target areas of application and potential consumers. The functional features, the simulated physical processes and differences from competitors are presented. The description of the main components. Examples of solving test problems and real cases calculations.

Key Words: Logos Hydrogeology Computer-Aided Engineering, Modeling of flow and transport

Введение

Численное моделирование геофильтрации и геомиграции давно и прочно вошло в практику гидрогеологических исследований. Общеизвестно, что математическое моделирование процессов миграции химического и радиоактивного загрязнения в подземных водах требует специальных программных средств, позволяющих учитывать широкий спектр физико-химических процессов и ориентированных на пользователя – гидрогеолога. Одним из таких инструментов является программный комплекс Логос Гидрогеология, входящий в созданную Госкорпорацией «Росатом» линейку цифровых продуктов ЛОГОС.

Следует заметить, что около 20 лет наша программа развивалась под названием НИМФА. Сначала как методическая разработка для нужд РФЯЦ-ВНИИЭФ. Затем как производственная программа, ориентированная на решение задач с помощью полномасштабного комплексного моделирования на современных высокопараллельных супер-ЭВМ (десятки тысяч процессоров), наш программный комплекс сложился в рамках выполнения проекта «Развитие суперкомпьютеров и грид-технологий», реализованного в 2010 – 2012 годах в рамках Комиссии при Президенте РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России. Разработка велась в содружестве со специалистами ведущих Вузов страны: Московского, Петербургского, Казанского университетов, а также совместно с гидрогеологами-практиками различных предприятий. Особенно плотным было сотрудничество РФЯЦ-ВНИИЭФ с ФГБУ «Гидроспецгеология», которое внесло большой вклад в становление программы НИМФА, как удобного и мощного инструмента для решения практических задач в области гидрогеологии.

В 2021 г. были проведены работы по включению программы НИМФА в состав комплекса программ ЛОГОС под названием Логос Гидрогеология. Правда, необходимые бюрократические процедуры ещё не закончены, поэтому в настоящий момент в продаже данный продукт находится ещё под брендом НИМФА.

Функциональные характеристики продукта Логос Гидрогеология

Соответственно своему предназначению для моделирования фильтрации и миграции предполагаются следующие основные области применения нашего продукта:

оценка воздействия техногенных объектов (АЭС, хранилища ОЯТ, промзоны, свалки ТБО, и т.п.) на подземные воды и грунты в нормальном и аварийном режимах;

оценка эффективности защитных мер по предотвращению загрязнения поверхностных и подземных вод (миграционные завесы, сорбирующие экраны и т.п.);

прогнозирование ореолов загрязнений и концентраций веществ-загрязнителей в подземном и поверхностном пространстве;

создание постояннодействующих моделей для ведения мониторинга сред на техногенно-нагруженных территориях;
оценка запасов подземных вод, оценка влияния сезонных явлений, гидросооружений, дренажных систем и т.п. на территории;
прогнозирование качества питьевой воды из водозаборных скважин.

В настоящее время в Логос Гидрогеология реализованы следующие основные физико-математические модели:

однофазная и двухфазная фильтрация;
насыщенно-ненасыщенная и напорно-безнапорная фильтрация;
анизотропная среда;
конвективный перенос потоком многокомпонентной примеси;
молекулярная диффузия, гидродинамическая дисперсия, адсорбция;
плотностная и тепловая конвекция;
многоступенчатый радиоактивный распад;
поверхностный сток и течение по открытым каналам.

Цифровой продукт имеет модели следующих гидрогеологических объектов:

реки, водоемы, дрены;
балансовые зоны;
наблюдательные скважины;
водозаборные скважины;
инфильтрация, эвапотранспирация;
фильтрационные барьеры.

К отличительным особенностям Логос Гидрогеология можно отнести следующие характеристики:

Продукт представляет собой интегрированный пакет для 3D моделирования геофильтрации и геомиграции;

Позволяет создавать цифровые двойники нового поколения техногенно-нагруженных территорий, в том числе и региональные;

Ориентирован на использование параллельных вычислений;

Работает на ПК, рабочих станциях и суперкомпьютерах в скалярном и параллельном режимах (Win/AstroLinux);

Использование концептуальной модели;

Используется неструктурированная сетка, способная адаптироваться к гидрогеологическим объектам;

Разрабатывается на базе программ НИМФА-4 и НИМФА-5, аттестованных в НТЦ ЯРБ.

Архитектура программы организована традиционно, по схеме «препроцессор-симулятор-постпроцессор».

Преппроцессор Логос Гидрогеология – инструмент конечного пользователя для подготовки / редактирования концептуальных моделей без использования сетки.

Подготовка модели для расчёта также достаточно традиционна, с помощью ввода информации в диалогах и использования готовых файлов. Она представляет из себя последовательность следующих действий:

Подготовить геологическую модель (имеется специальный модуль создания геологических моделей объектов на основе данных по скважинам);

Провести гидрогеологическую схематизацию;

Задать свойства пород и «загрязнителей»;

Определить послойную модель;

Задать параметры калибровки (имеется модуль автоматической калибровки геофильтрационных и геомиграционных моделей в параллельном режиме);

Задать настройки расчета, будущей сетки, выдач;

Запустить валидатор сформированной модели.

Таким образом, препроцессор позволяет выполнять всю технологическую цепочку создания цифровых моделей в единой программной среде. Расчётная сетка при задании начальных данных не строится, что даёт существенную экономию памяти и времени и позволяет готовить данные для расчёта практически на любом настольном компьютере или ноутбуке.

Симулятор, который может находиться как на локальной, так и на удаленной машине, является расчётным средством Логос Гидрогеология. В нём происходит формирование сеточной модели из концептуальной и производятся вычисления.

Генератор расчётных сеток собственной разработки может работать как в скалярном, так и в параллельном режимах. На него получен патент.

Расчётная сетка строится по слоям (слои могут быть разрывными). Ячейки представляют собой призмы общего вида, тетраэдры, гексаэдры, многогранники. Сетка может быть неструктурированной, анизотропной по вертикальной оси координат. Ниже, в качестве примера, приведён фрагмент сеточной модели (Рис. 1).

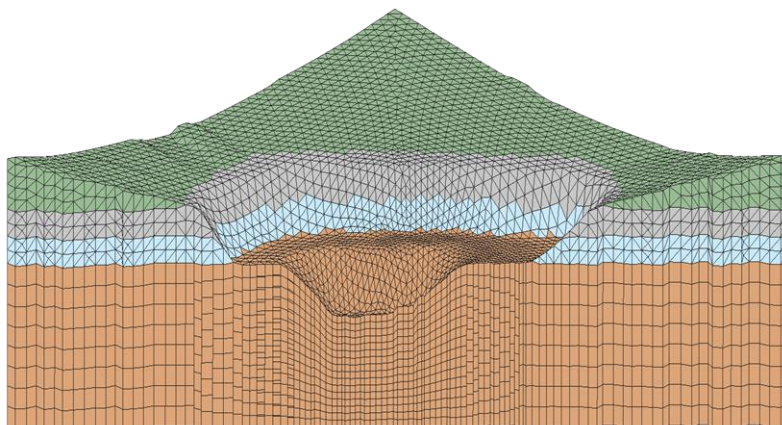


Рис. 1 Фрагмент сеточной модели в районе карьера.

Методы решения уравнений в симуляторе – неявные, конечно-объёмные. При аппроксимации потоков через грани расчётных ячеек используется метод отложенной коррекции. При распараллеливании используется как стандарт MPI так и Open MP.

По мере появления результатов расчёта, не дожидаясь его полного завершения пользователь продукта имеет возможность просматривать и анализировать результаты с помощью средств **постпроцессора** собственной разработки. Данные могут быть представлены в одномерном, двумерном, трёхмерном видах, такие, например, как:

Балансовые диаграммы;

Модельные величины на наблюдательных скважинах;

Поля напоров;

Линии траекторий движения загрязнителей (пример на рис. 2);

Ореолы загрязнений.

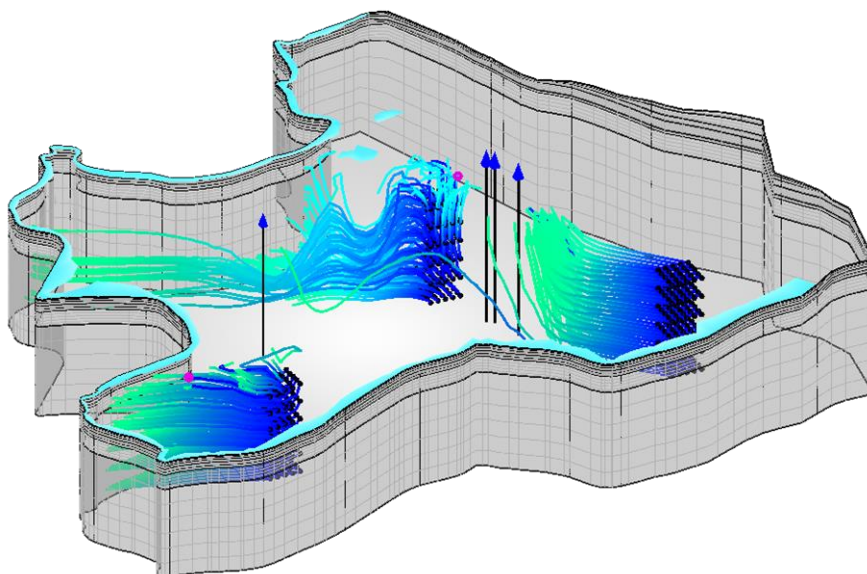


Рис. 2 Траектории движения частиц.

Логос Гидрогеология имеет систему автокалибровки геофильтрационных и геомиграционных моделей. Также имеется развитая система интерактивных справок и руководства пользователя. Для обучения работе с продуктом созданы учебные руководства по характерным задачам, учебные презентационные и видео материалы.

Заключение

Продукт Логос Гидрогеология многократно успешно проходил верификацию и валидацию как в рамках выполнения различных проектов, так и в процессе аттестации 3-х версий программы в органах Ростехнадзора.

В настоящий момент наш продукт поставлен на 19 предприятий и учебных заведений. С его помощью построены десятки моделей, проведены сотни производственных расчётов. В качестве примеров в докладе приведены некоторые интересные производственные задачи пяти предприятий.

В настоящее время большое внимание команда разработчиков Логос Гидрогеология уделяет гидрогеологическим задачам горнодобывающих предприятий. В активном контакте с коллегами сформулированы дополнительные требования к функционалу и ведётся проработка путей создания специализированных версий продукта в интересах конкретных организаций.

Это не означает снижения интереса к другим задачам. Мы рады помочь любому пользователю. Обращаем внимание, что сейчас имеется возможность оформить бесплатную ознакомительную лицензию на цифровой продукт Логос Гидрогеология.

УДК 519.6

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА GERA

И.В. Капырин^{1,2}, А.В. Пленкин¹, Г.В. Копытов¹

¹ИБРАЭ РАН, 115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, д.52, kapyrin@ibrae.ac.ru

²ИВМ РАН, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д.8

Аннотация

Рассматриваются возможности программного комплекса GeRa по моделированию геофильтрационных и геомиграционных процессов. Обсуждаются аспекты построения моделей ближней и дальней зон объектов, взаимодействия GeRa с иными программными средствами (MOUSE, Экорад-Аква, PHREEQC). Анализируется опыт применения комплекса на объектах атомной отрасли.

Ключевые слова: гидрогеологическое моделирование, программный комплекс, неструктурированные сетки, параллелизация, геомиграция радионуклидов

DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF THE GERA SOFTWARE

I.V. Kapyrin^{*1,2}, A.V. Plenkin¹, G.V. Kopytov¹

¹IBRAE, Moscow, Russian Federation, E-mail: kapyrin@ibrae.ac.ru

¹INM RAS, Moscow, Russian Federation

Abstract

The capabilities of the GeRa groundwater flow and transport modelling software package are considered. Near and far field models creation features are discussed as well as coupling GeRa with other software (MOUSE, ECORAD-AQUA, PHREEQC). The experience of application of GeRa within the nuclear industry is analyzed.

Key Words: hydrogeological modelling, software package, unstructured grid, parallel computations, radionuclides transport

Современное состояние разработки

Разработка программного комплекса GeRa (ГЕомиграция РАдионуклидов) ведется ИБРАЭ РАН и ИВМ РАН с 2012 года, в настоящее время идет развитие третьей его версии (GeRa/V3). Две первых версии аттестованы Ростехнадзором для использования при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. GeRa ориентирована на обеспечение гидрогеологов удобным рабочим инструментом для решения задач:

- защиты подземных вод от загрязнений различной природы (радиоактивных, химических, биологических);
- оценки запасов подземных вод;
- обоснования и сопровождения систем мониторинга и реабилитации загрязненных территорий;
- расчета дренажей и прогноза подтопления.

В GeRa реализовано моделирование фильтрационных процессов в различных постановках: напорно-безнапорной, насыщенно-ненасыщенной, двухфазной. При моделировании переноса учитываются как базовые процессы адвекции, диффузии, дисперсии и сорбции, так и проблемно-специфические: радиоактивный распад по цепочкам, химические взаимодействия в системе вода-порода (с использованием специализированного модуля PHREEQC [6]). В случае расчета течений растворов переменной плотности, при решении задач плотностной и тепловой конвекции, задачи фильтрации и переноса решаются совместно. Для учета деградации инженерных барьеров безопасности в ближней зоне объектов возможен учет переменных параметров сред. В последнее время GeRa была дополнена моделью поверхностного стока и специализированными моделями фильтрации-переноса в трещиноватых средах на основе DFM-подхода [4]. Для быстрой оценки времени миграции примесей, расчета поясов зон санитарной охраны и определения источников загрязнения реализован расчет линий тока. Заметим, что использованный в GeRa метод расчета линий тока обеспечивает сходимость и применим на произвольных сетках с многогранными ячейками [5].

В соответствии с современными тенденциями развития гидрогеологических кодов, GeRa ориентирована на использование неструктурированных сеток и дает возможность проводить вычисления в параллельном режиме на многопроцессорных ЭВМ. Это позволяет сократить время расчета и увеличить точность за счет локального измельчения сетки, а также расширить возможности наращивания числа ячеек в сетках.

Решаемые задачи

На сегодняшний день накоплен значительный опыт применения GeRa для решения задач оценки безопасности объектов атомной отрасли, оказывающих влияние на подземные воды. В первую очередь, это проектируемые и существующие пункты захоронения радиоактивных отходов (РАО), выводимые из эксплуатации объекты использования атомной энергии. Характерным примером такой разработки является модель «ГЕОПОЛИС» полигона закачки жидких РАО «Северный» [3] (Рис.1). «ГЕОПОЛИС» долгое время служил движущей силой развития GeRa, так как требовал реализации нетривиальных моделей: фильтрации в безнапорном режиме, переноса в среде с двойной пористостью, плотностной конвекции, – и развития средств геологического моделирования для учета Правобережного тектонического

нарушения, выклиниваний слоев. С помощью GeRa также осуществлялось моделирование приповерхностных пунктов захоронения РАО на площадках ФГУП «ПО» МАЯК», АО «УЭХК», АО «СХК», в г. Сосновый Бор, а также шламохранилищ и газоходов на территории АО «АЭХК», площадок ФГУП «Радон», выполнялась оценка безопасности бассейнов выдержки отработавшего ядерного топлива. Отметим, что GeRa может использоваться для создания моделей как дальней (масштаба километры-десятки километров), так и ближней зон объектов (масштаба от метров до сотен метров), а также возможно сопряжение этих моделей с помощью модуля балансовых расчетов. С помощью программного комплекса MOUSE, также разрабатываемого ИБРАЭ РАН, для моделей объектов, разработанных в GeRa, могут быть проведены процедуры анализа чувствительности, калибровки и оценки достоверности результатов расчета. Максимально полный обзор решаемых задач представлен в работе [2].

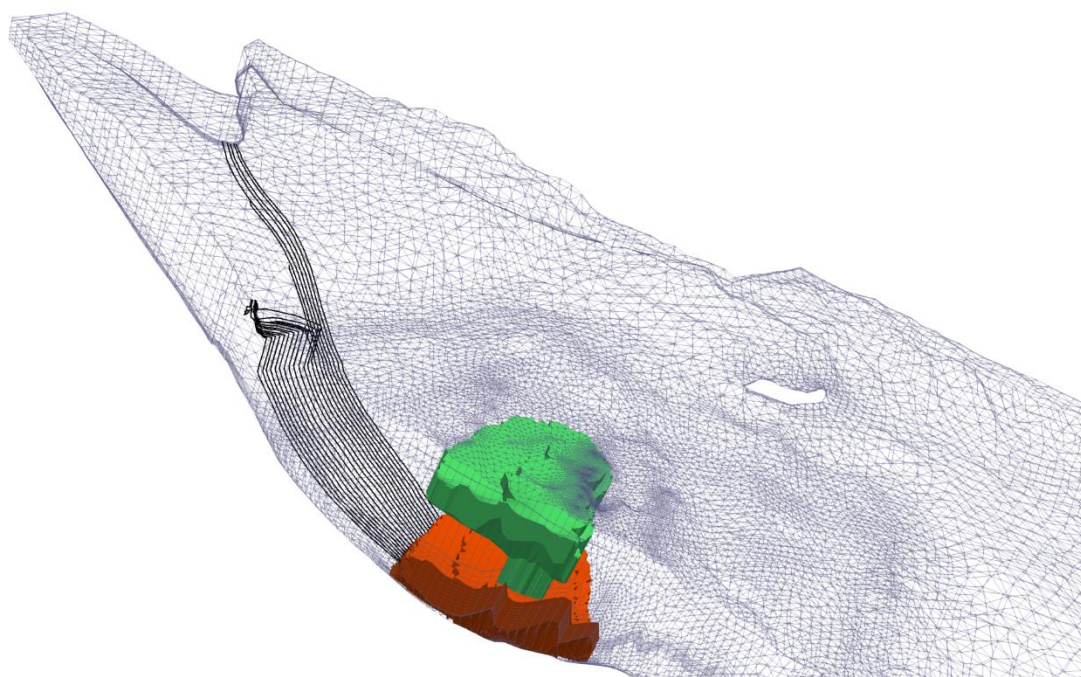


Рис. 1 Фрагмент модели полигона закачки жидких РАО. Показаны расчетные ореолы распространения отходов в пластах и линии тока.

Перспективы

Одним из самых сложных и актуальных объектов гидрогеологического моделирования в России на сегодняшний день является проектируемый пункт глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) в Красноярском крае [1]. Он характеризуется расположением в кристаллическом массиве гнейсов, фильтрационные свойства которых приурочены к трещинам и разрывным нарушениям. Тем самым, одним из основных направлений развития становится разработка, верификация и валидация моделей фильтрации и переноса в трещиноватых средах. Учет всех

значимых для безопасности ПГЗРО процессов предполагает также возможности моделирования переноса в двухфазном потоке. Моделирование ближней зоны ПГЗРО требует учета процессов, характерных, в первую очередь, для инженерных барьеров безопасности из бетона и бентонита. Это так называемые ТНМС-процессы (тепло-гидро-механические и химические). Предстоит разработка, в первую очередь, соответствующих моделей переноса с химическими взаимодействиями, и моделей, учитывающих изменение напряженно-деформированного состояния среды. В части численных методов перспективы связаны с разработкой эффективных нелинейных и линейных решателей (в том числе, для моделей сопряженных процессов), а также высокоточных параллелизуемых методов дискретизации для неструктурированных сеток.

Список литературы

1. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы, 2017, № 1 (1), с. 33-42.
2. Капырин И.В. Состояние и перспективы развития методов геомиграционного моделирования для анализа вопросов долгосрочного обеспечения радиационной безопасности. // Вопросы радиационной безопасности, 2022, №4 (108), с. 3-16.
3. Сускин В.В., Капырин И.В., Расторгуев А.В. Программное средство «ГЕОПОЛИС»: геофильтрационное моделирование пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов полигона «Северный» // Горный журнал, 2021, №5, с.91-97.
4. Grigorev F.V., Kapyrin I.V., Plenkin A.V. Discrete Fracture Matrix Model Applied to the Computation of Water Flow Through the Underground Facility: 4 // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2020. – Vol. 41, no. 4. – P. 526–32. – 4.
5. Kapyrin I.V. Particle tracking for face-based flux data on general polyhedral grids with applications to groundwater flow modeling. RJNAMM, vol.38, No.3, pp.115-126, 2023.
6. Parkhurst D. L., Wissmeier L. PhreeqcRM: A reaction module for transport simulators based on the geochemical model PHREEQC //Advances in Water Resources. – 2015. – Vol. 83. – Pp. 176-189.

УДК 550.34.013.4: 550.34.013.2

МОДУЛЬ THAWFROST ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕПЛО-МАССО-ПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ МЕРЗЛОТЫ

И.А. Расторгуев^{*1,2}, И.В. Литвинова², Н.А. Иост², А.В. Ильин²

¹НИИЦ «Курчатовский Институт», Москва, пл. Курчатова, д.1, stiar@mail.ru

²АК «Алроса», Новосибирск, Советская, д.5, LitvinovaIV@alrosa.ru

Аннотация

В работе рассматривается применение разработанного одним из авторов модуля FreezeThaw75 для расчёта тепломассопереноса с учетом фазовых переходов вода-лед и лед-вода. Приводится сопоставление расчётов с аналитическим решением и другими программными кодами

Ключевые слова: тепломассоперенос, модуль FreezeThaw75, фазовые переходы, мерзлота

APPLICATION OF FREEZETHAW75 CODE FOR HEAT AND MASS TRANSPORT SIMULATIONS IN PERMAFROST CONDITIONS

I.A. Rastorguev^{*1,2}, I.V. Litvinova², N.A. Iost², A.V. Ilin²

¹ Kurchatov Institute, Moscow, Kurchatov Square, 1, stiar@mai.ru

²AK "Alrosa", Novosibirsk, Sovetskaya, 5, LitvinovaIV@alrosa.ru

Abstract

The paper regards the application of the FreezeThaw75 code developed by one of the authors for heat and mass transport simulations with water-ice and ice-water phase transitions. Comparison of calculations with the analytical solution and other program codes is given.

Key Words: Heat and mass transfer, FreezeThaw75 code, phase transitions, permafrost

Введение

В настоящий момент ведется разработка программных продуктов, позволяющих выполнять расчёты задач геофильтрации в условиях мерзлоты. Обзор этих разработок дан в статье [1]. В стандартной версии программной среды DHI Feflow нет возможности производить расчёты многомерного тепло-массо-переноса и промерзания с учетом фазовых переходов. Однако возможности Feflow могут быть расширены с помощью встроенных программных средств, позволяющих программировать дополнительные модули, необходимые пользователю. Одним из авторов был разработан такой модуль FreezeThaw75, позволяющий учитывать фазовые переходы при использовании DHI Feflow.

Влияние промерзания на проницаемость

Для задач, где есть поток, важен учёт влияния промерзания на проницаемость. Основная идея механизма влияния промерзания на проницаемость грунтов заключается в том, что при достижении температур ниже нуля градусов происходит уменьшение коэффициентов фильтрации. Так, в работе [1] предлагается постепенное изменение проницаемости при переходе температуры через ноль. Степень перехода в этих статьях предлагается равной уменьшению коэффициентов фильтрации на несколько порядков. В предлагаемой далее модели переход от талого состояния грунта к мерзлому осуществляется, в случае если все узлы элементарной ячейки модели имеют температуру менее температуры замерзания.

Сложность задачи заключалась в том, что в программе FEFLOW отсутствовала возможность учета промерзания и изменения теплофизических свойств грунтов в результате этого. Однако такая возможность была реализована в отдельном программном коде на C++ с использованием API функций библиотеки IFM FEFLOW, подключена в модель в среде FEFLOW в виде динамически подключаемого модуля FreezeThaw75 и позволила учесть переход от талого состояния к мерзлому при переменной влагонасыщенности.

Основные уравнения

Разработанный модуль позволяет проводить расчёты на основе модели состоящей из в следующих уравнений постановке:

- 1 – уравнение адвективного теплопереноса с нелинейными коэффициентами теплопроводности и теплоемкости;
- 2 – уравнение фильтрации с нелинейными, зависящими от температуры и водонасыщенности, коэффициентами фильтрации;
- 3 – уравнение описывающие насыщенность водой пористой среды при переходе через точку замерзания;
- 4 – уравнение описывающие зависимость коэффициента фильтрации при переходе через точку замерзания;
- 5 – поправка к уравнению фильтрации (3) в виде источниковой/стоковой компоненты учитывающая плавление льда/замерзание воды;
- 6 – уравнения состояния для коэффициентов теплопроводности и теплоемкости из-за наличия льдистой фазы и фазовых переходов.

Для проверки достоверности результатов, выполненных с помощью разработанного программного средства, были выполнены тестовые расчеты, результаты которых приведены ниже.

Промерзание в отсутствии фильтрационного потока

Учитываются фазовые переходы в насыщенной пористой среде при отсутствии гидродинамического потока. Для таких условий имеется аналитическое решение Лунаardini.

На рис. 1 приведена постановка этой задачи. Изначально в горизонтальной модельной области задана температура 4 градуса. На левой границе задана постоянная температура минус 6 градусов Цельсия, приводящая к постепенному промерзанию. В аналитической модели оцениваться термодинамическое влияние левой границы и распространение промерзания во времени. На рисунке 2 приведено сопоставление расчётов на основе модуля FreezeThaw75 с аналитическим решением на момент времени 1 сутки.

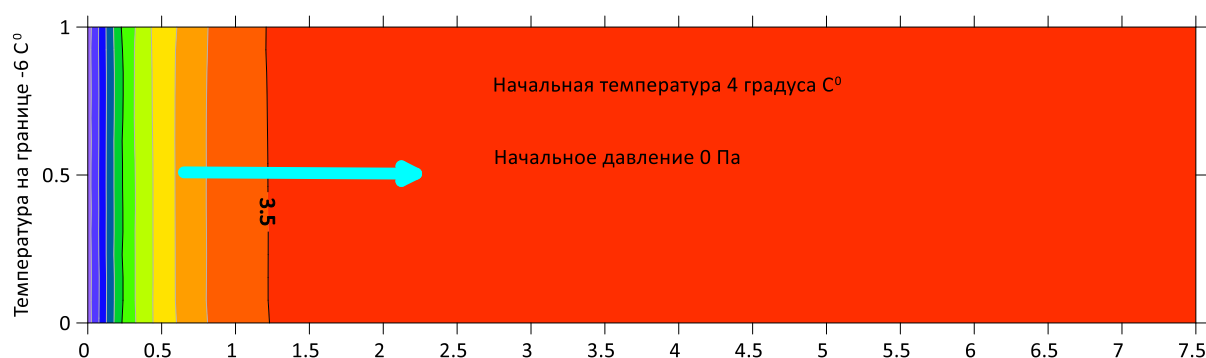


Рис. 1 Постановка задачи Лунаardini [1].

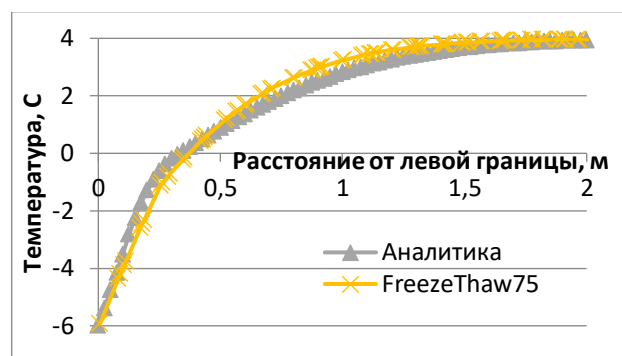


Рис. 2 Сопоставление аналитического расчёта и расчёта с помощью модуля FreezeThaw75.

Промерзание с учетом фильтрационного потока

Такая модельная задача была предложена при разработке программы SUTRA [1]. Двумерная напорная фильтрация решается в прямоугольной области размером 10 м по вертикали и 50 м по горизонтали при наличии тонкой стенки с постоянной температурой ниже точки замерзания (нулевой). Течение жидкости вызвано перепадом давления между левой и правой границей, на которых заданы ГУ1 с постоянным напором и перепадом 0.05 м между ними. Постоянная температура на левой границе принимается равной 5°C. Внутренняя стенка

поддерживается при температуре -5°C . Начальная температура 5°C везде. Дискретизация - равномерная прямоугольная с шагом 0.5 м. Продолжительность моделирования устанавливается равной 800 суткам, в течение которых достигается в равновесное состояние. Результаты сопоставления расчетов температур и насыщенныхностей, выполненных с помощью разработанного модуля и программой SUTRA показаны на рисунке 3. Расхождения можно объяснить особенностями сеточной аппроксимации каждой из программ.

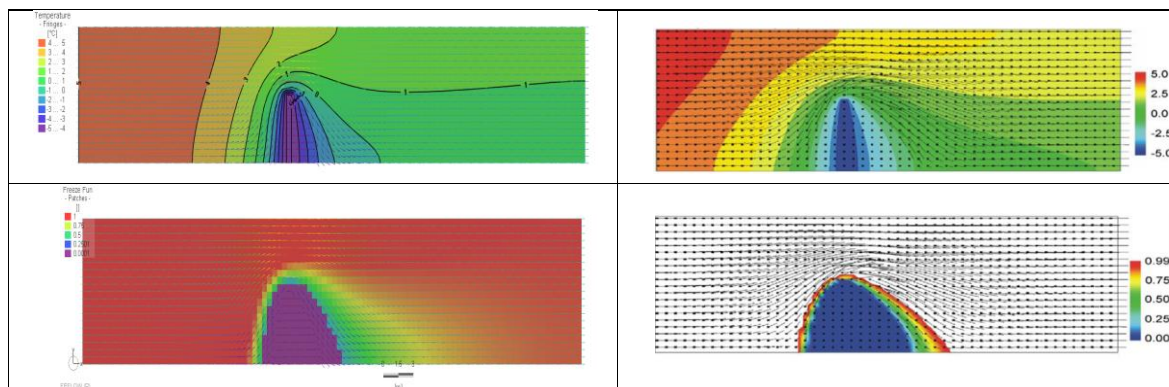


Рис. 3 Сопоставление расчётов на модуле FreezeThaw75 (слева) и Sutra (справа). Верхние картинки – сопоставление по температурам. Нижние – сопоставление по насыщенностям.

Тепломассоперенос, фазовые переходы и фильтрационный поток

Для верификации модуля с учетом тепло-массо-переноса и фазовых переходов было произведено сопоставление с расчетами, полученными на основе кода FlexPDE [1]. Рассмотрена двумерная профильная задача, учтены вечная мерзлота, зона сезонно-талого слоя, талики, теплообмен и перенос растворенных веществ - загрязнения от муниципальных сточных вод. Повышенные концентрации растворенных веществ снижают температуру замерзания поровой воды и приводят к переносу растворенных веществ, вызванному оттаиванием. Оттаивание, как под действием тепла, так и под действием растворенных веществ может уменьшить содержание льда в вечной мерзлоте и влияет на миграцию растворенных веществ.

Рассматриваемая область модели предполагает начальное распределение уровней, согласно рельефу (верхняя граница модели, рис. 4). Рельеф участка имеет пологий уклон к реке на юго-восток. Основание и вертикальные стороны модели представляют собой непроницаемые границы с точки зрения фильтрации. В основании модели (т. е. ниже подошвы вечной мерзлоты) была назначена однородная температура 2°C , вертикальные границы непроницаемы для теплопереноса. На верхней границе задано увеличение температуры на дневной поверхности на $0,05$ градуса ежегодно в течении 100 лет. Начальное распределение таликов, уровней и зоны вечной мерзлоты было задано исходя из данных мониторинга. Над таликом на поверхности в левой части задан источник в виде концентрации 100 мг/л .

На рис. 5 приводится сопоставление расчётов тепломассопереноса с помощью модуля FreezeThaw75 и расчёта в программной среде FlexPDE выполненных при одинаковых условиях по фильтрации, тепло и массо переносу. В качестве мигрирующего компонента рассматривается сценарий миграции хлоридов с максимальной концентрацией 100 мг/л. Если вода имеет повышенную минерализацию, то происходит депрессия температуры замерзания, которая может быть оценена следующим образом. Зависимость температуры замерзания T_f (градусы Цельсия) от минерализации C (мг/л) предлагается рассмотреть по следующей зависимости:

$$T_f = \begin{cases} C \geq 50 \text{ мг / л}, -0.08 \cdot C + 4 \\ C < 50 \text{ мг / л}, 0 \end{cases} \quad (7)$$

Результаты сопоставлений показаны на рис. 5. Различие в расчётах объясняется тем, что FlexPDE использует динамическое адаптивное измельчение сетки. Размеры ячеек и дискретность по вертикали во время моделирования может варьироваться на несколько порядков.

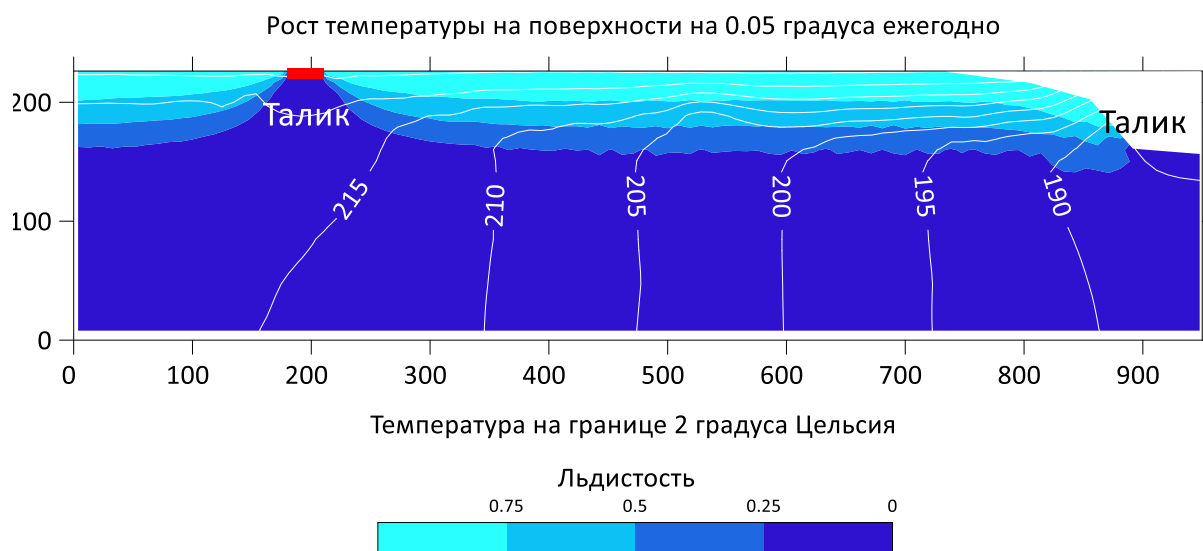


Рис. 4 Начальные и граничные условия для задачи тепломассопереноса. Сине-голубой заливкой показана начальная льDISTость, изолиниями – начальные напоры, красным – начальная концентрация промстоков 100 мг/л.

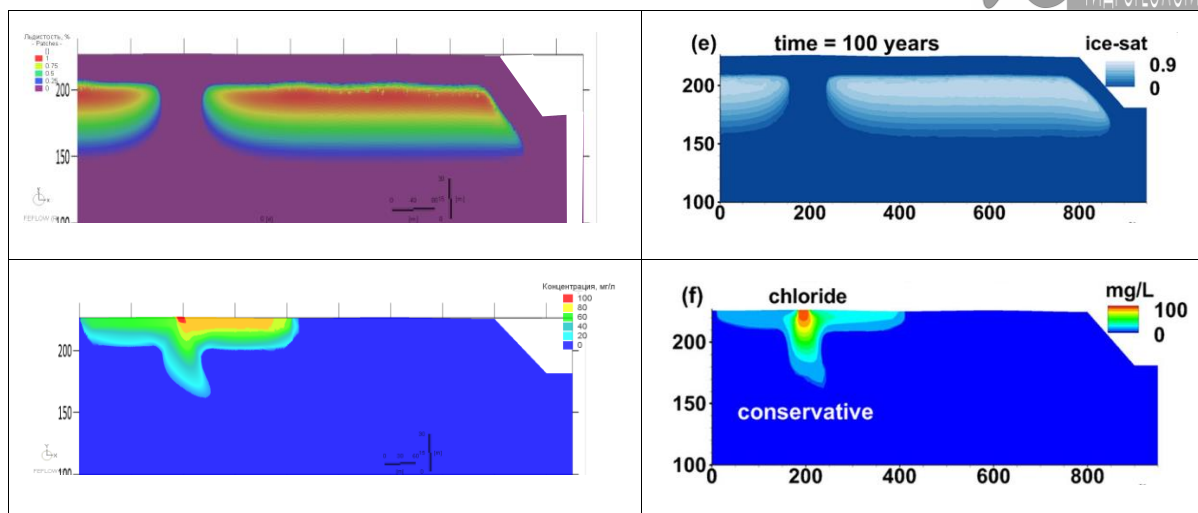


Рис. 5 Сопоставление расчётов тепло-массо-переноса в FreezeThaw75 (слева) и FlexPDE. Сверху льдыстость, внизу концентрация хлоридов

Заключение

Разработанный модуль FreezeThaw75 позволяет решать задачи тепломассопереноса и фазовых переходов (лед-вода и вода-лед). Для проверки достоверности результатов было выполнено сопоставление с:

- аналитическим решением задачи теплопроводности с учетом фазовых переходов в отсутствии фильтрационного потока;
- численным решением задачи с обтеканием замороженной стены в грунте, полученным с помощью программы SUTRA;
- численным решением задачи тепломассопереноса с фазовыми переходами и фильтрационным потоком, полученным с помощью кода FlexPDE.

Список литературы

1. C. Grenier, H. Anbergen, V. Bense, Q. Chanzy, E. Coon, N. Collier, F. Costard, M. Ferry, A. Frampton, J. Frederick, J. Gonçalves, J. Holmén, A. Jost, S. Kokh, B. Kurylyk, J. McKenzie, J. Molson, E. Mouche, L. Orgogozo, R. Pannetier, A. Rivière, N. Roux, W. Rühaak, J. Scheidegger, J. Selroos, R. Therrien, P. Vidstrand, C. Voss. Groundwater flow and heat transport for systems undergoing freeze-thaw: Intercomparison of numerical simulators for 2D test cases. Advances in Water Resources. Volume 114. 2018. Pages 196-218.

УДК 556.3.01:519.6

АНАЛИЗ ДАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МОСКВЫ

В.С. Рекун*¹, Р.Ю. Жидков¹

¹ГБУ «Мосгоргеотрест», Москва, Россия, E-mail: vrekun@mgt.ru, rzhidkov@mgt.ru

Аннотация

Рассмотрены современные методы работы с данными об окружающей среде с использованием языка программирования Python. Приведены результаты сравнения различных методов интерполяции на примере создания геологической модели Москвы. Рассмотрен вариант использования библиотеки FloPy как альтернативы проприетарным оболочкам программного кода Modflow.

Ключевые слова: подземные воды, геофильтрация, моделирование, машинное обучение, анализ данных

DATA ANALYSIS USING MACHINE LEARNING METHODS FOR CONSTRUCTING A REGIONAL GEOPILTRATING MODEL OF MOSCOW

V.S. Rekun*¹, R.Y. Zhidkov ¹

¹ «GBU «Mosgorgeotrest» Moscow, Russian Federation, E-mail: vrekun@mgt.ru, rzhidkov@mgt.ru

Abstract

Modern methods of working with environmental data using the Python programming language are considered. The results of comparison of various interpolation methods are presented on the example of creating a geological model of Moscow. The option of using the FloPy library as an alternative to proprietary shells of the Modflow program code is considered.

Key Words: groundwater flow, modeling, machine learning, data analysis

Введение

Обычно при создании гидрогеологических моделей информацию об изученности территории приходится собирать по крупицам, в таком случае любые сведения становятся полезными. Но как быть, если в распоряжении оказывается очень большой объем разнородных и неравномерно распределенных (как в пространстве, так и во времени) данных? Тогда

необходимо производить анализ и обобщение исходных данных, так как от их качества будет зависеть результат моделирования.

Обобщение и схематизация – важная часть создания гидрогеологической модели. Геофильтрационные расчеты – сложный и комплексный процесс, включающий в себя несколько основных этапов:

1. Геофильтрационная схематизация.
2. Дискретизация расчётной области.
3. Калибровка и анализ чувствительности.
4. Решение прогнозной (или прямой) задачи.

Далее представлена методика и примеры работы с данными на каждом из этапов данного цикла.

Результаты и их обсуждения

Геофильтрационная схематизация — это переход от описания гидрогеологических условий посредством некоторого упрощения с целью их количественного задания в модель. На этом этапе производится гидрогеологическая стратификация. Согласно принятой в г. Москве схематизации, вертикальная дискретизация состоит из 11 модельных слоев, поверхности которых подгружаются из стратиграфо-генетической модели. Данная модель строится в программном комплексе Safe Software FME с использованием различных библиотек таких языков программирования, как R и C++.

Качество интерполяции различными методами оценивалось величиной среднеквадратичной абсолютной ошибки RMSE [2]. Исходная выборка разделялась на обучающую и контрольную в соотношении 2 к 1.

Численные эксперименты показали, что по комплексу факторов оптимально использование комбинированного алгоритма (Рис. 1), в основе которого лежит применение кригинга с укрупненным размером элементарной ячейки моделирования и последующей локальной коррекцией результирующей растровой поверхности.

Пространственная геометризация стратиграфо-генетических комплексов осуществляется на основе авторских эвристических алгоритмов, моделирующих особенности осадконакопления территории.

При моделировании учитываются не только отметки грунтов в скважинах, но и дополнительные граничные условия (например, контуры геоморфологических элементов), а также история антропогенной трансформации территории (для толщи техногенных грунтов) [1].

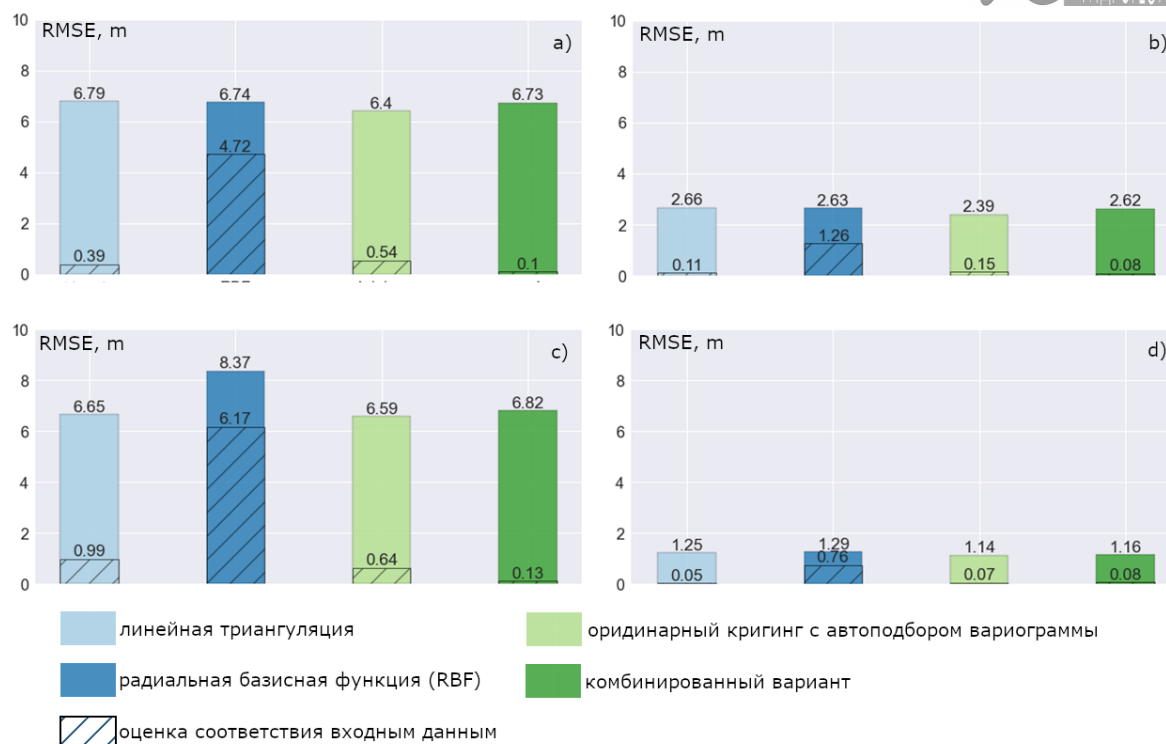


Рис. 1 Сопоставление результатов работы алгоритмов интерполяции и геостатистического анализа на различных наборах данных: а – отметки кровли поверхности дочетвертичных отложений на участке развития карстово-суффозионных процессов, б – мощность регионального юрского водоупора, в – подошва оползневого тела на Воробьевых горах, г – отметки подошвы пойменных отложений р. Неглинки.

Затем производилась горизонтальная дискретизация расчетной области. Для этого территория модели разбивалась на блоки со стороной 100 м, с измельчением ячеек до 10 м согласно внутренним граничным условиям. В разрезе, в качестве начального условия, верхней границей области моделирования задавалась поверхность земли (цифровая модель рельефа), на которую в области формирования потока подземных вод задавалось инфильтрационное питание согласно разделению городской территории, на зоны застройки и лесопарков.

Важным этапом моделирования является калибровка (решение обратной задачи). Однако прежде чем приступить к решению обратной задачи нужно подготовить выборку из имеющихся замеров уровней. В исходных данных содержится большое количество устаревших и не совсем качественных измерений. Вручную фильтровать такие данные – крайне трудоемкий процесс, так как в базе данных содержится более 160 тыс. замеров.

Поэтому для автоматизации отбора скважин применялся алгоритм машинного обучения случайный лес (Random Forest), реализованный в модуле Scikit-learn на языке программирования Python. Случайный лес – ансамблевый метод машинного обучения,

основанный на построении множества деревьев решений, используемый для решения задач регрессии и классификации данных.

Для обучения модели использовался небольшой участок, данные на котором фильтровались вручную. При этом в ходе анализа территория разбивалась на квадраты, внутри которых считались стандартные отклонения УГВ. В результате данной процедуры была выявлена интересная особенность – наибольшие величины стандартных отклонений тяготеют к линиям метрополитена (Рис. 2). После разделения на этой территории скважин по степени уверенности в точности замера, полученная выборка делилась на 2 части – обучающую и проверочную.

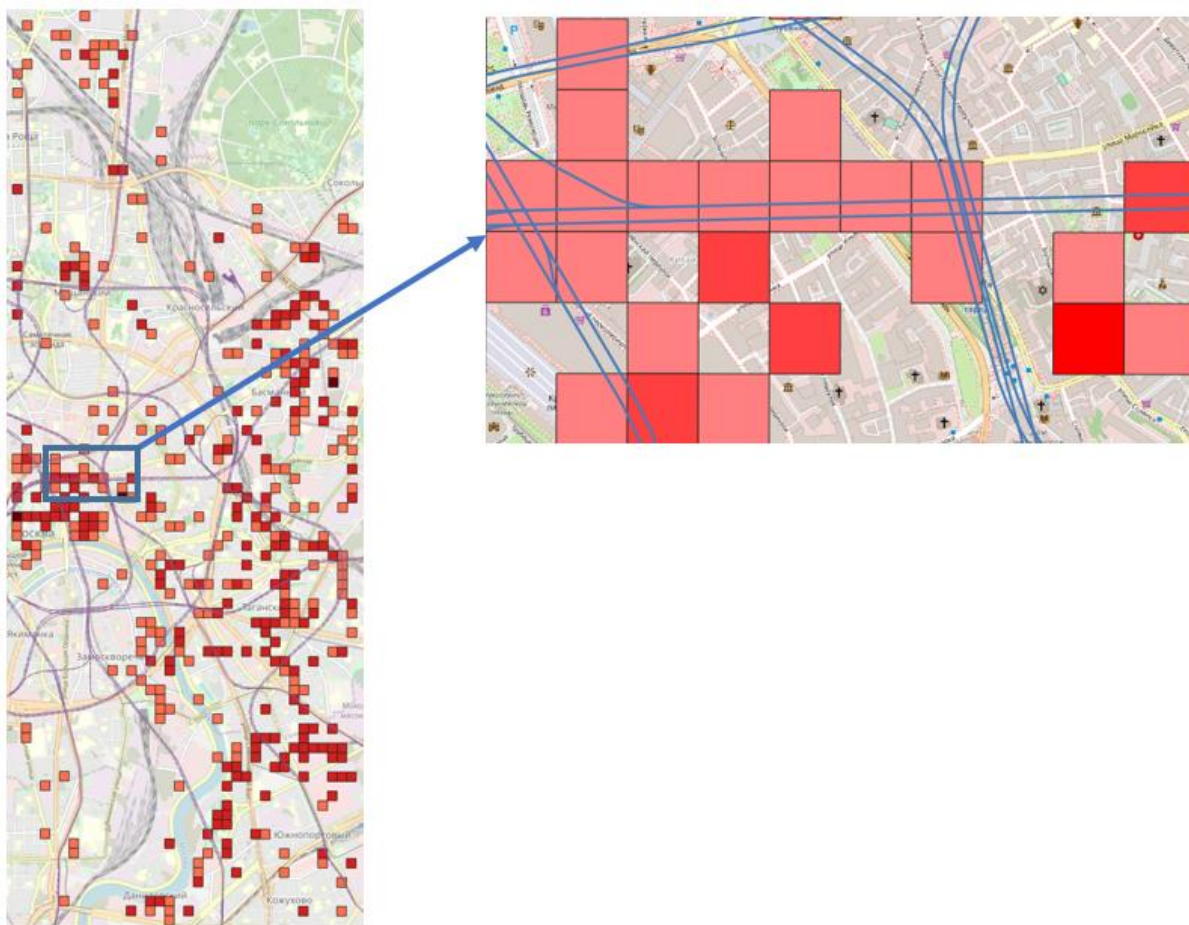


Рис. 2 Матрица стандартных отклонений уровней грунтовых вод.

Табл. 1 Исходные данные для обучения модели.

Абс. отметка	Глубина до воды	Расстояние до метро	Наличие геол. окна	Разница с атласом	Горизонт	Год бурения	Напор	Стандартное отклонение
124.55	12.6	100.52	1	0.83	3	1974	4.09	3.19
124.57	9.0	51.69	0	3.76	3	1965	-0.255	0.36
119.56	2.5	74.13	0	2.07	3	2013	-0.55	0.54
119.71	2.3	86.65	0	2.42	3	2013	3.15	2.87
123.70	8.1	403.64	0	1.82	3	2007	0.62	1

Табл. 2 Результат обучения.

Размер тестовой выборки 50%		Значение	Precision	Recall	F1	Accuracy	Precision	Recall	F1	Accuracy
с х и у	rfc	F	0.89	0.94	0.91	0.88	0.83	0.90	0.86	0.84
		T	0.86	0.76	0.81		0.85	0.76	0.80	
	mlp	F	0.86	0.92	0.88	0.84	0.76	0.87	0.81	0.76
		T	0.8	0.69	0.74		0.78	0.63	0.70	
без х и у	rfc	F	0.86	0.93	0.89	0.85	0.78	0.85	0.81	0.77
		T	0.83	0.7	0.76		0.77	0.67	0.72	
	mlp	F	0.83	0.9	0.87	0.82	0.73	0.81	0.77	0.72
		T	0.77	0.64	0.7		0.71	0.60	0.65	

Результаты работы алгоритма приведены в таблице 2. Таким образом, модель с точностью около 80% правильно классифицирует замеры контрольной выборки.

На рис. 3 приведен уровень значимости каждого признака при классификации.

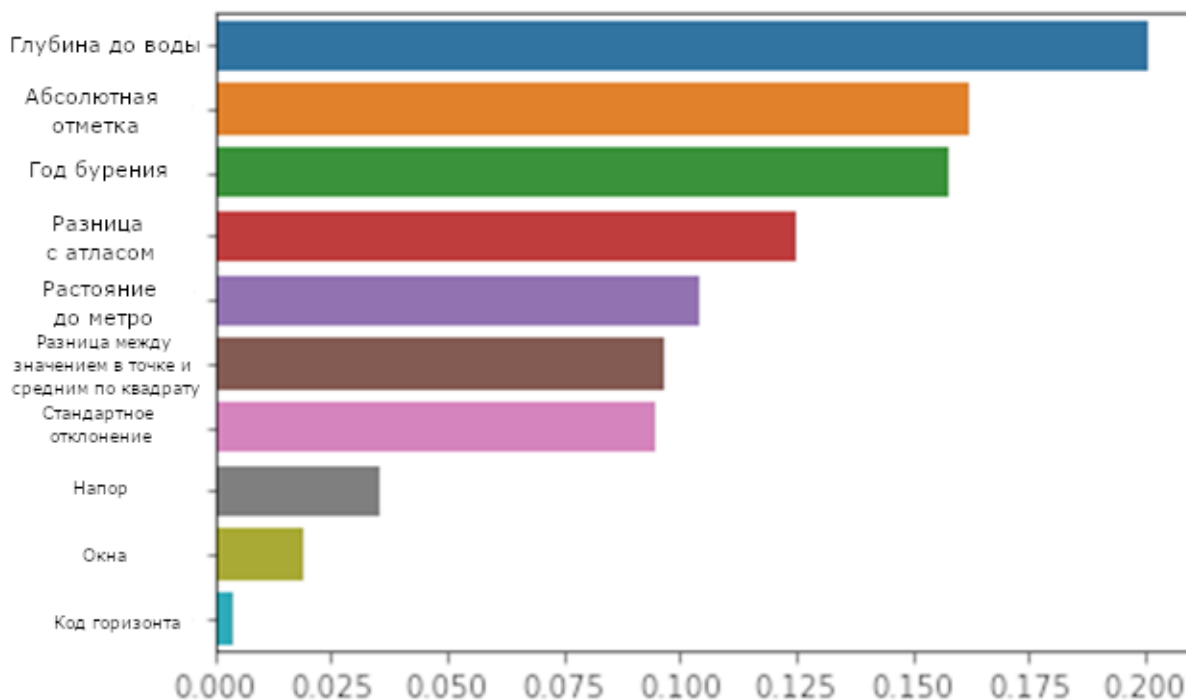


Рис. 3 Уровень значимости признаков на точность работы алгоритма.

После обучения данный алгоритм можно применить на всю территорию модели и получить уровни, которые будут использоваться при калибрации. Основным критерием качества решения обратной задачи служит степень совпадения модельных и натурных уровней в скважинах. Достигается это путем анализа чувствительности параметров и их корректировки в указанных диапазонах при помощи модуля PEST.

Построение модели планируется осуществлять при помощи библиотеки FloPy [3] языка программирования Python, что позволит уйти от использования оболочек для программного кода Modflow и реализовать автоматизированное обновление при поступлении новых данных, как это сделано при построении стратиграфо-генетической модели.

Заключение

В ходе работы было проведено сравнение различных методов интерполяции и их комбинации на примере построения трехмерной геологической модели подземного пространства г. Москвы. Полученные результаты показали, что наиболее эффективным, с точки зрения минимизации среднеквадратичной абсолютной ошибки RMSE является использование комбинированного варианта интерполяторов.

На основе метода машинного обучения случайный лес построена и обучена модель, которая показала отличные результаты, на 80% повторив классификацию, выполняемую вручную.

А также предложен вариант использования библиотеки FloPy в качестве более быстрой и бесплатной альтернативы проприетарных оболочек для программного кода Modflow.

Список литературы

1. Жидков Р.Ю., Абакумова Н.В., Рекун В.С. Применение комплексного ретроспективного анализа при определении конфигурации массивов техногенных грунтов на примере г. Москвы – Инженерная геология, 2023, №1
2. Chai T., Draxler R. R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific Model Development, No. 7(3), pp. 1247-1250
3. <https://github.com/modflowpy/flopy>

УДК 556.3

О ВОЗМОЖНОСТЯХ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ МИГРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSDIMAT

В.Г. Румынин^{*1,2}, Л.Н. Синдаловский^{1,2}, А.М. Никуленков^{1,2}

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН, Санкт-Петербург, Россия,
E-mail: rumynin@hgepro.ru

²Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Дается описание математического базиса геомиграционного модуля программного комплекса ANSDIMAT, представленного как известными аналитическими моделями, так и оригинальными решениями, дополненными иллюстративными примерами.

Ключевые слова: ANSDIMAT, загрязнение подземных вод, водозаборы

ON THE POSSIBILITIES OF ANALYTICAL SOLUTIONS OF THE SUBSURFACE SOLUTE TRANSPORT PROBLEMS IN THE FRAMEWORK OF THE ANSDIMAT SOFTWARE

V.G. Rumynin^{*1,2}, L.N. Sindalovskiy^{1,2}, A.N. Nikulenkoy^{1,2}

¹Institute of Environmental Geology, SPb Branch, Saint Petersburg, Russian Federation,
*E-mail: rumynin@hgepro.ru

²Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

The mathematical basis of the subsurface solute transport module of the ANSDIMAT software is described. It includes both the well-known analytical models and original analytical solutions, supplemented by illustrative examples.

Key Words: ANSDIMAT, groundwater contamination, wellfields

Введение

Достаточно высокий уровень разработанности аналитического аппарата теории миграции подземных вод (в русскоязычной терминологии, получившей распространение во многом благодаря работам В.М. Шестакова [6]), позволяет использовать широкий спектр существующих аналитических решений как для исследования отдельных механизмов миграции и масштабных эффектов, так и для решения практических задач, особенно при экспертных

оценках в условиях дефицита исходной информации о свойствах водоносных горизонтов. Апробированная в рамках программного комплекса (ПК) ANSDIMAT [5] технология поиска решений задач геофильтрации с использованием методов суперпозиции, интегральных сверток, обращения операционных решений, а также решений методом аналитических элементов и др., позволяет сделать более доступными для гидрогеологов и решения геомиграционных задач. Математический базис представлен как достаточно известными аналитическими моделями, так и оригинальными решениями соответствующих краевых задач, полученными при разработке геомиграционного модуля данного программного комплекса.

Методы исследований

Исходная математическая модель. В самом общем виде миграция вещества в фильтрационном потоке при выполнении предпосылки сплошности среды описывается уравнением конвективной дисперсии:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \lambda n C + W_s + W_d + \mathbf{v} \cdot \nabla C - \nabla \cdot (\mathbf{D}_e \cdot \nabla C) = 0, \quad (1)$$

где функции источников W_s и W_d ассоциируются, соответственно, с внутрипластовыми физико-химическими взаимодействиями (например, сорбцией) и диффузионными обменными процессами в средах с двойной емкостью (например, в трещиновато-пористых породах); здесь C – объемная концентрация вещества в растворе, n – пористость (трещиноватость), λ – константа распада (деструкции), $\mathbf{v}$ – скорость фильтрации Дарси, $\mathbf{D}_e$ – коэффициент эффективной дисперсии; в общем случае коэффициент $\mathbf{D}_e$ линейно связан со скоростью $\mathbf{v}$ и определяется компонентами продольной и поперечной дисперсивности, δ_L и δ_T .

Схематизация структуры фильтрационного потока. В ПК ANSDIMAT миграция вещества рассматривается в условиях идеализированных структур фильтрационных потоков: 1D линейный плоскопараллельный; 1D линейный осесимметричный; 2D с искривленными (либо в плановой x - y , либо в профильной x - z плоскостях) линиями тока; 3D в цилиндрических координатах. Решение профильных задач предусматривает задание напорного или безнапорного (со свободной поверхностью) типа фильтрационного потока.

Граничные и начальные условия. Представленные в ПК 1D решения описывают миграцию вещества в неограниченной, полуограниченной и ограниченной областях при заданиях на входной и выходной границах потоков условий I, II и III рода [9]. Решения 2D и 3D задач пространственной дисперсии учитывают геометрическую форму источника вещества. Начальные условия могут быть неоднородными.

Для всех типов миграционного потока (1D, 2D и 3D) в качестве базовых входных концентрационных сигналов рассматриваются ступенчатая (Хевисайда) или импульсная (дельта, -Дирака) функции, а также «пакетная» функция. Соответствующие решения могут быть адаптированы для описания и других форм входных концентрационных функций, в частности, может учитываться деструкция (распад) вещества.

Физико-химические преобразования. Сорбция при решении 1D миграционных задач в линейном или радиальном потоке, рассматривается как в равновесной, так и в неравновесной постановке, причем распад вещества учитывается как жидкой фазе, так и в адсорбированном состоянии. Частные решения приведены для случая нелинейной сорбции нестабильного компонента. Учитывается транспорт вещества в адсорбированном состоянии на коллоидах, представленных различными минеральными фазами.

Учет макродисперсионного рассеяния в статистически неоднородных средах. Для учета масштабных эффектов при построении 1D моделей миграции могут использоваться решения уравнений, полученные при переменных коэффициентах «дисперсивности», зависящих либо от пространственной, $\delta_L = f(x)$, либо от временной, $\delta_L = f(t)$, координат. Предлагаются линейная, линейно-асимптотическая, экспоненциальная и асимптотическая модели для каждой из функции δ_L . Такой подход позволяет связать коэффициенты аналитических функций δ_L с параметрами автокорреляционной функции, характеризующей коррелируемое поле распределения проницаемости массива пород (коэффициента фильтрации k), $Y = \ln k$: дисперсию, σ_Y^2 , и корреляционный масштаб l_Y .

Учет массообмена в средах с двойной пористостью (трещиновато-пористые породы). Функция-источник W_d в уравнении (1), определяющая массовый поток из трещин в блоки, имеет два основных асимптотических представления, отвечающие расчетным моделям [3; 4]: неограниченной емкости (для малых моментов времени); сосредоточенной емкости (для продолжительных периодов времени).

В первом случае пористые блоки рассматриваются как неограниченная среда и массообмен между трещинами и блоками описывается градиентным законом Фика. Во втором, – массовый поток определяется изменением средней концентрации в блоке. Во всех вариантах учитываются: (а) линейная сорбция на поверхности трещин и в пористом пространстве блоков, (б) распад вещества в подвижном растворе и в породе.

Результаты и их обсуждение

Прогнозирование формирования объемных (2D и 3D) ореолов рассеяния. Основные решения уравнения (1) подразделяются в зависимости от геометрической формы источника

вещества, характера входного концентрационного сигнала, а также геометрии области фильтрации (потoki в неограниченных и ограниченных естественными геологическими границами областях). Кроме того, конечные аналитические решения могут различаться в зависимости от использованных математических методов решения краевых задач. К базовым решениям относятся решения, полученные для точечных источников, – импульсного и постоянно действующего. Рассматриваются частные решения, описывающие квазистационарные объемные ореолы рассеяния, формирующиеся за счет поперечной дисперсии и распада вещества. Источник вещества может располагаться как на поверхности водоносного горизонта, так и на заданной глубине.

При наличии площадной инфильтрации процесс 3D конвективной дисперсии описывается приближенным решением [7]. Этим условиям отвечает пример на рис. 1. Размер источника в плане 5×5 м, концентрация $C_0 = 1000$ мг/л, удельная инфильтрация $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ м/сут, скорость Дарси регионального потока $v = 3 \cdot 10^{-3}$ м/сут, пористость $n = 0,1$, константы дисперсивности $\delta_L = 0.5$ м, $\delta_{Ty} = \delta_{Tz} = 0.1$ м, $\lambda = \lambda_{\Gamma} = 1 \cdot 10^{-3}$ 1/сут.

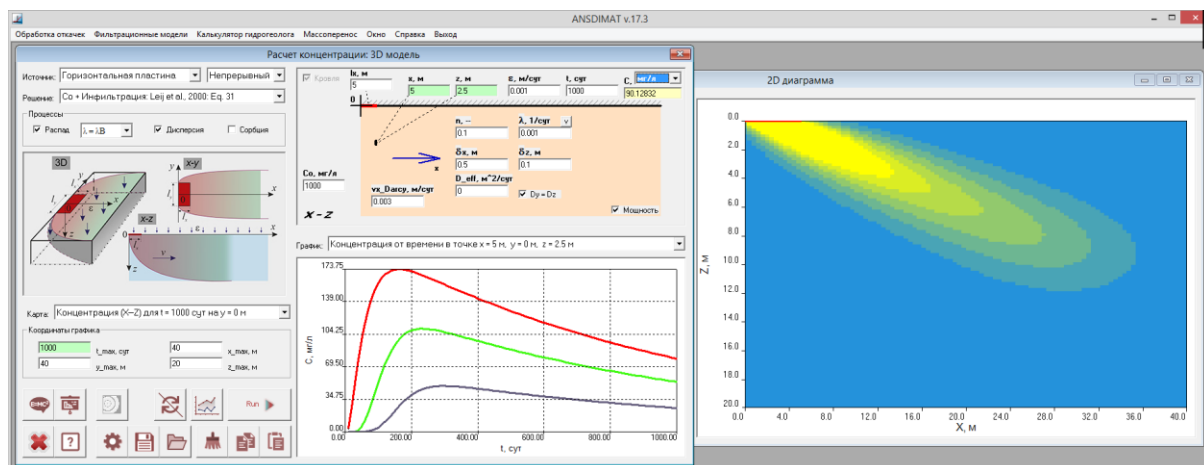


Рис. 1 Графики $C(t)$ в точках наблюдения $z = 0.5$ (красная кривая), 1.5 (зеленая кривая), 2.5 м (синяя кривая) ($x=5$, $y=0$). Профиль концентрации $C(x, y=0, z)$ на $t_{расч} = 1000$ сут.

Формирование немонотонной выходной концентрационной функции связано с распадом вещества в источнике загрязнения.

Конвективный перенос загрязнения в профильно-неоднородном горизонте. В основе модельных построений лежат оригинальные решения 2D профильных задач фильтрации и конвективного переноса в напорном или безнапорном потоке подземных вод, формируемом площадной инфильтрацией. На входной границе ($x = 0$) может быть задан дополнительный фильтрационный поток (q_0). В общем случае рассматривается профильно-неоднородный горизонт с произвольно задаваемым распределением проницаемости по глубине $k = k(z)$.

Предусмотрено задание распределения $k(z)$ с помощью аналитических функций (линейное или экспоненциальное затухание проницаемости с глубиной). Источник загрязнения в общем случае может находиться ниже отметки свободной поверхности.

Пример на рис. 2 отвечает условиям задачи, связанной с оценкой последствий высвобождения радиоактивных вод из источника, расположенного в массиве кристаллических трещиноватых пород ($n = 0.3\%$) [8]. Размер источника в плане 700×300 м, плотность загрязнения $P = 5.7 \cdot 10^7$ Бк/м² (импульс), константа распада $\lambda = \lambda_{\Gamma} = 10^{-5}$ 1/год, сорбцией радионуклидов пренебрегается. Напор на контуре разгрузки безнапорного потока 320 м. Инфильтрационное питание $\varepsilon = 1.3 \cdot 10^{-4}$ м/сут. Предполагается экспоненциальное затухание проницаемости с глубиной: $k(z) = k_0 \exp[-A(h - z)]$ ($k_0 = 0.07$ м/сут – коэффициент фильтрации вблизи уровня воды h , $A = 0.015$ 1/м – коэффициент «затухания») – рис. 3а.

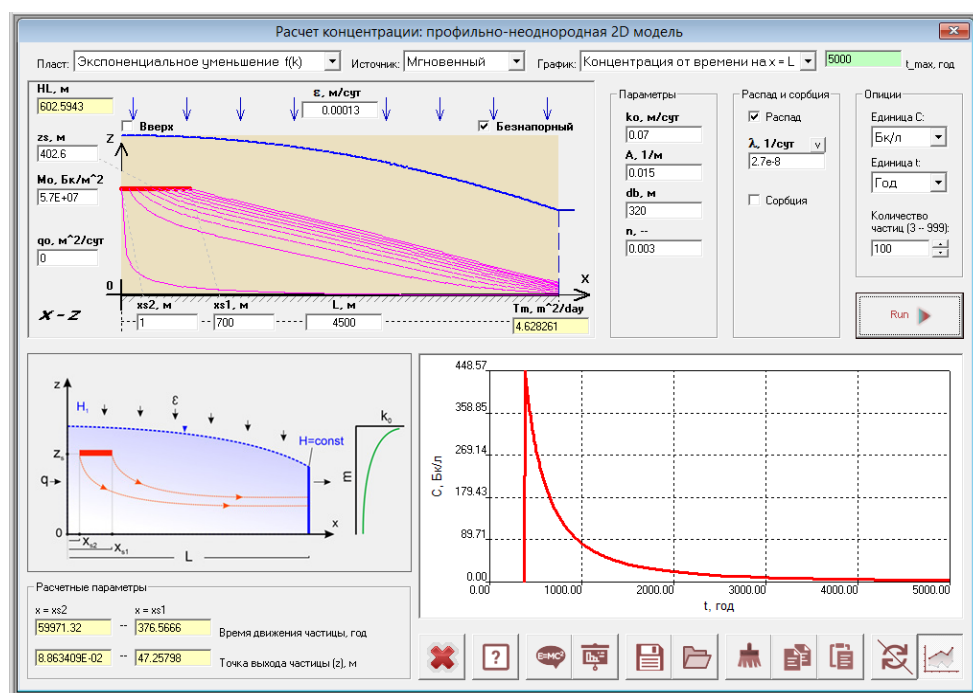


Рис. 2 Интерфейс ПК для задания исходных данных с результатом расчета для варианта $z_0 = 400$ м.

Расчеты выполнены для трех вариантов размещения источника загрязнения $z = 200, 300, 400$ м (Рис. 3б). Как видно, положение источника загрязнения кардинальным образом влияет на время прихода первых порций загрязнения, а также на максимальные (пиковые) значения концентрации: расположение источника на высоких отметках и в более проницаемых зонах разреза приводит к более, чем десятикратному росту пиковых концентраций, что связано с падением степени разбавления загрязнения чистыми водами.

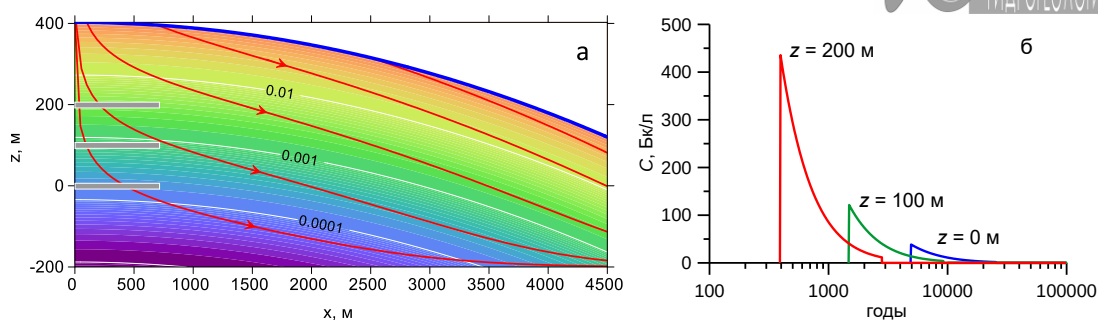


Рис. 3 (а) Профиль проницаемости $k(z)$ в м/сут, линии тока (красным), положение источника (серым); синяя линия – свободная поверхность воды. (б) Графики $C(t)$ для различных отметок расположения источника.

Прогноз качества воды на водозаборах. Рассматриваются решения, описывающие изменение минерализации воды в скважинах, происходящее: (а) при нарушении (за счет водоотбора) природной гидрохимической зональности в эксплуатационном и смежных водоносных горизонтах, (б) при подтягивании к скважинам загрязненных речных вод.

Пример на рис. 4 отвечает прогнозной ситуации подтягивания соленых подошвенных вод к контуру дренирования, представленного несовершенной водозаборной скважиной (дебит $600 \text{ м}^3/\text{сут}$, длина фильтра 10 м, глубина залегания контакта пресных и соленых вод 50 м). Коэффициент фильтрации пород $k_x = 1$, $k_z = 0,1 \text{ м/сут}$, $n = 0,1$. Использовано приближенное аналитическое решение, учитывающее контраст в плотности вод [4].

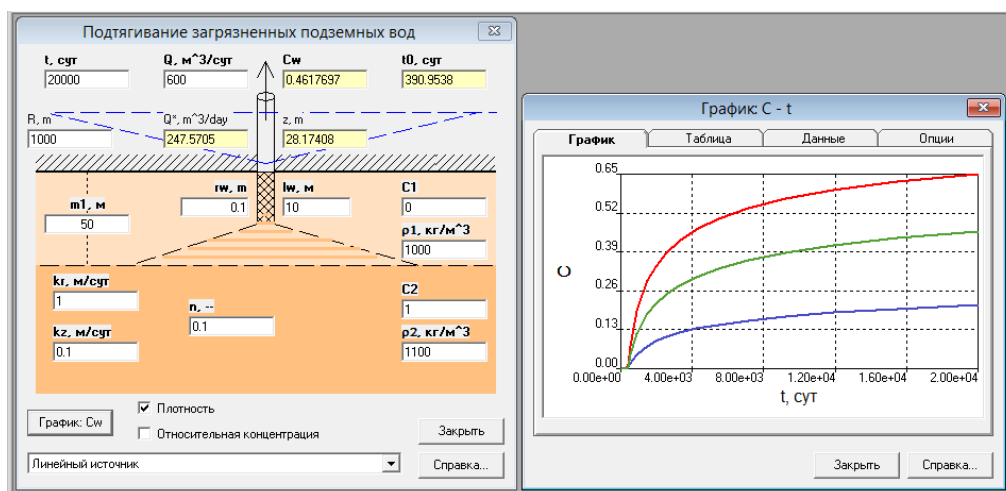


Рис. 4 К оценке влияния плотности подошвенных соленых вод, ρ_s , на изменение минерализации воды в несовершенной водозаборной скважине (красная кривая $\rho_s = 1,020 \text{ г/см}^3$, зеленая – 1,1, синяя – 1,25).

Хорошо видно, что время подтягивания соленой воды к фильтру скважины слабо зависит от различий в плотности, однако последующее нарастание минерализации воды в скважине в значительной степени контролируется плотностным градиентом.

Пример на рис. 5 иллюстрирует структуру фильтрационного потока при работе водозаборной скважины, находящейся на расстоянии L_w от уреза поверхностной воды (гидродинамическая граница I рода). Расчет относительной концентрации выполняется для двух типовых ситуаций: (а) региональный фильтрационный поток ($q = vm$) разгружается в реку (рис. 6а и 7а), (б) река служит источником питания водоносного горизонта (рис. 6б и 7б).

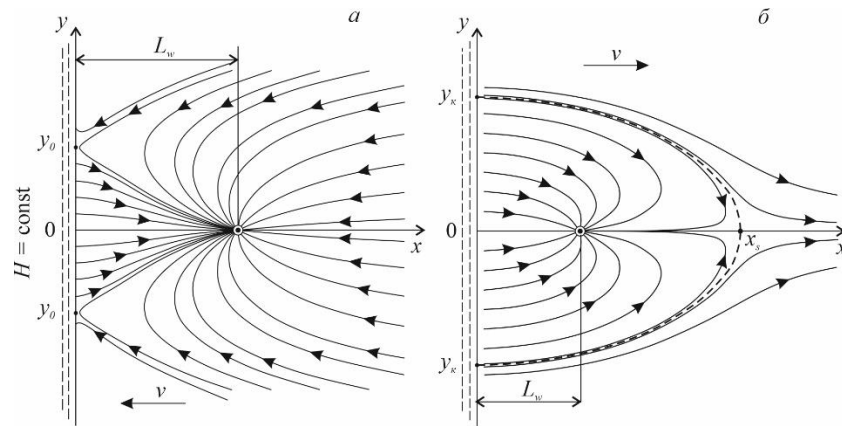


Рис. 5 Структура фильтрационного потока при различном направлении движения регионального потока. а – река дренирует водоносный горизонт, б – река – питающая граница.

Решения задачи предполагает нахождение выражения для функции тока [1; 2]. Последующее интегрирование кинематических уравнений вдоль линий тока, по которым частицы жидкости движутся от контура реки к водозаборной скважине, позволяет определить вид функциональной зависимости $\bar{C} = \bar{C}(t)$.

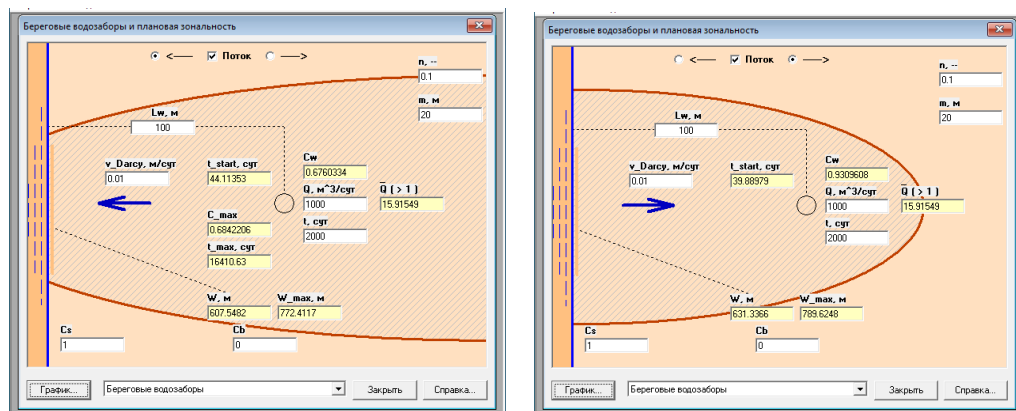


Рис. 6 Интерфейс ПК при задании исходных данных (береговой водозабор): $L_w = 100$ м, скорость Дарси $v = 0,01$ м/сут, дебит скважины $Q = 1000$ м³/сут, мощность горизонта $m = 20$ м, пористость $n = 0,1$. Левая панель – региональный фильтрационный поток направлен в сторону реки, правая панель – поток – от реки.

Как видно (рис. 7), влияние загрязненных речных вод на качество воды в водозаборной скважине определяется направлением потока и безразмерным комплексом $\bar{Q} = Q / \pi L_w q$.

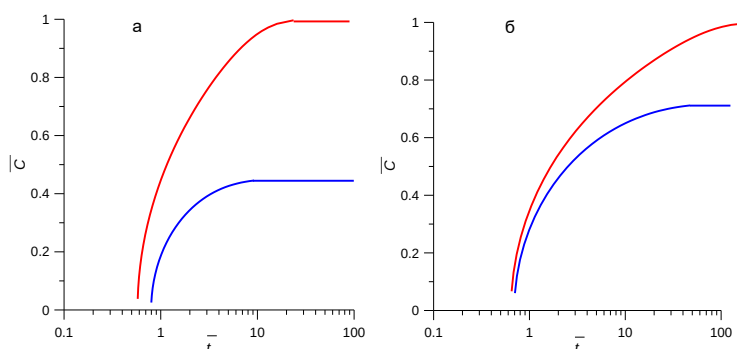


Рис. 7 Графики $\bar{C}(\bar{t})$ при различных значениях безразмерного комплекса $\bar{Q}$:
 $a - \bar{Q} = 5$; $b - \bar{Q} = 20$; красный цвет кривых – фильтрация из реки, синий – в реку; $\bar{t} = Qt / \pi m n L_w^2$.

Заключение

Представленные выше примеры иллюстрируют возможности приложения аналитических решений для исследования довольно сложных гидрогеологических задач без привлечения громоздких сеточных моделей, применение которых зачастую необоснованно в виду дефицита исходной информации. Это потребовало развития уже имеющихся подходов в теории миграции подземных вод.

Список литературы

1. Гольдберг В. М. Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах / М.: Изд-во Недра, 1976. 153 с.
2. Минкин Е.Л. Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод / Л.: Изд-во Недра, 1967. 124 с.
3. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Том. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов / М.: Изд-во МГУ, 1998. 611 с.
4. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии / СПб.: Изд-во Наука, 2011. 1158 с.
5. Синдаловский Л.Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT / СПб.: Изд-во Наука, 2021. 891 с.
6. Шестаков В. М. Динамика подземных вод / М.: Изд-во МГУ, 1973. 328 с.
7. Leij F.J., Priesack E., G. Schaap M.G. Solute transport modeled with Green's functions // Journal of Contaminant Hydrology. 2000. N. 1-2 (41). pp. 155–173.
8. Rumynin V.G., Sindalovskiy L.N., Nikulenkova A.M. Analytical solutions for flow and advective solute transport in unconfined watershed aquifers with depth-dependent hydraulic conductivity. Journal of Hydrology. 2021. 603. 127116.
9. Van Genuchten M.Th., Alves W.J. Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute Transport Equation // U.S. Department of Agriculture. Technical Bulletin. 1982. N. 1661. 151 p.

ГИДРОГЕОХИМИЯ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

УДК 556.31

ГИДРОГЕОХИМИЯ ГЛУБИННЫХ ВОД МАГНИТОГОРСКОЙ МЕГАЗОНЫ ЮЖНОГО УРАЛА

Р.Ф. Абдрахманов¹

¹Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия,

E-mail: hydro@ufaras.ru

Аннотация

В статье проанализированы данные о гидрогеохимии глубинных вод Магнитогорской мегазоны Южного Урала. Приводится состав подземных вод, приуроченных к Уральскому мегасинклинию и Мулдаккульскому месторождению минеральных вод и изменение их химического состава в соответствии с глубиной.

Ключевые слова: глубинные воды, гидрогеохимия, Южный Урал, Мулдаккульское месторождение минеральных вод

HYDROGEOCHEMISTRY OF DEEP WATERS OF THE MAGNITOGORSK MEGAZONE OF THE SOUTHERN URALS

R.F. Abdrakhmanov¹

¹Institute of Geology Ufa Federal Research Centre RAS, Ufa, Russian Federation, E-mail: hydro@ufaras.ru

Abstract

The article analyzes data on the hydrogeochemistry of the deep waters of the Magnitogorsk megazone of the Southern Urals. The composition of groundwater confined to the Ural megasynclorium and the Muldakkul deposit of mineral waters and the change in their chemical composition in accordance with the depth are given.

Key Words: deep waters, hydrogeochemistry, Southern Urals, Muldakkul mineral water deposit

Введение

В современной гидрогеологии и гидрогеохимии одной из малоизученных и дискуссионных является проблема глубинной гидрогеохимической зональности горных стран [Н.И. Толстихин, А.М. Овчинников, Н.А. Маринов, Е.В. Пиннекер, В.А. Кирюхин, А.В. Кудельский, С.Р. Крайнов]. Издавна утвердились представления об орогенных областях в целом и Урале в частности, как о гидрогеологически открытых структурах, являющихся внешними зонами питания и создания напора глубоких подземных вод прилегающих платформ. Подземные воды в горных районах связывались главным образом с зоной региональной экзогенной трещиноватости пород,

подверженных воздействию процессов выветривания. Вследствие глубокой эрозионной расчлененности рельефа горных массивов, высоко приподнятых над прилегающими равнинами, в них под влиянием процессов инфильтрации атмосферных осадков сформировалась мощная зона пресных вод. Ниже зоны активной трещиноватости монолитные кристаллические породы считались водоупорными, за исключением локальных зон разломов, в которых происходит разгрузка напорных вод различного газового состава, обычно с невысокой минерализацией.

Результаты и их обсуждения

По нашим исследованиям [1; 2] о гидрогеохимических условиях более глубоких частей недр Магнитогорского мегасинклинория можно судить по результатам опробования скважин Уральского профиля и Мулдаккульского месторождения минеральных вод.

Информацию о гидрогеохимических условиях глубоких частей недр синклинория несут **скважины Уральского профиля**, разбуренного в его южной части (Рис. 1). Скважиной 2 из известняков нижнего карбона при испытании на приток интервала 3,86–3,93 км был получен высоко метаморфизованный рассол типа ШБ следующего состава:

$$M62,8 \frac{Cl98SO_4 2}{Ca46Na40Mg14}, \quad (1)$$

с $rNa/rCl 0,41$.

Хлоридные кальциево-натриевые воды с минерализацией 18,7 г/дм³ установлены в скв. 4 в нижнекаменноугольных эффузивно-осадочных породах на глубине 2,02–2,12 км. Заслуживает внимания повышенная концентрация в водах брома (51,8 мг/дм³), близкая к таковой в морской воде. Судя по величинам отношений rNa/rCl (0,64) и Cl/Br (196), эти воды (как и воды скв. 2) являются разбавленными седиментогенными рассолами. Исходными для них являются рассолы каменноугольного морского бассейна, захороненные в породах и претерпевшие в них метаморфизацию в прямом направлении (с образованием $CaCl_2$).

Мулдаккульское месторождение минеральных вод расположено в пределах Зауральского пенеппена в районе озера Мулдакуль (Рис. 2). Месторождение минеральных вод в геолого-тектоническом отношении приурочено к Кизильскому синклинорию в приосевой части Магнитогорского мегасинклинория. Синклинорий ограничен с запада Ирландским, а с востока – Ахуновско-Кацбахским антиклинориями. Синклинорий осложнен структурами более мелкого порядка, заложенных в нижнем карбоне во время интенсивных тектонических подвижек. К одной из таких структур – Мулдаккульской синклинали – и приурочено месторождение минеральных вод. Мулдаккульская синклиналь сложена породами палеозойского и мезозойско-кайнозойского возраста. Палеозой представлен каменноугольной системой (кизильская, уртазымская и янгельская свиты). Нижняя часть разреза

каменноугольной системы сложена вулканогенно-осадочными, а верхняя – карбонатными породами кизильской свиты (C_1V_{2-3} , C_1V_3 , C_1V_{3-n}): кремнистые сланцы, алевролиты, песчаники, туфоконгломераты, известняки. Мощность отложений 3500-3750 м (карбонатной толщи 2100-2250 м). В восточном бору синклинали обнажается уртазымская свита (C_2b+m), которая представлена алевролитами, аргиллитами, известковистыми песчаниками, с прослоями гипсов, конгломератами.

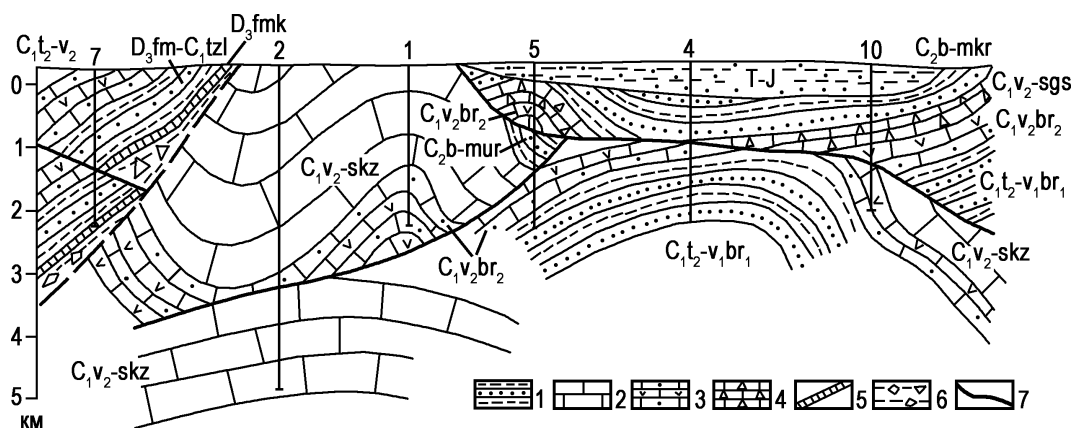


Рис. 1 Геологический разрез Кизильской зоны (Уральская площадь) Магнитогорского мегасинклиналя [3].

Верхний девон: $D_3f\ mk$ – франский ярус, мукасовский горизонт; $D_3fm-C_1t_1\ zl$ – фаменский ярус-нижний карбон, нижнетурнейский подъярус, зилайская свита; Нижний карбон: $C_1t_2-v_1\ br_2$ – верхнетурнейский-нижневизейский подъярусы, нижняя часть березовской свиты; $C_1v_2\ br_2$ – тульский горизонт верхневизейского подъяруса, верхняя часть березовской свиты; $C_1v_2-s\ kz$ – верхневизейский подъярус-серпуховский ярус, кизильская свита; $C_1v_2-s\ gs$ – верхневизейский подъярус-серпуховский ярус, гусихинская свита; Средний карбон: $C_2b-m\ ur$ – башкирский и московский ярусы, уртазымская свита; $C_2b-m\ kr$ – башкирский и московский ярусы, кардайлоская свита; T-J – триасовые и юрские отложения.

Подземные воды приурочены к терригенно-карбонатным трещиноватым и закарстованным кизильским породам, терригенным загипсованным уртазымским отложениям и терригенным янгельским осадкам. В результате восходящей разгрузки по зоне разлома глубинных соленых, возможно рассольных, вод и смешения их с пресными инфильтрационными водами в озёрной котловине Мулдаккуль в янгельском водоносном комплексе сформировалась контрастная куполовидная гидрогеохимическая аномалия. Размещение в ней минеральных вод подчинено нормальной гидрогеохимической зональности, выражающейся в росте с глубиной минерализации вод и одновременном изменении их ионно-солевого состава.

Верхняя зона мощностью 50–80 м представлена SO_4-HCO_3 и $Cl-HCO_3$ водами с минерализацией 0,4–1,0 г/дм³. Они принадлежат к I (содовому) или II (сульфатно-натриевому) геохимическим типам. Содержание в водах $NaHCO_3$ достигает 29%, а Na_2SO_4 15%. Ниже до глубины 100 м расположена зона SO_4-Cl вод типа IIIa (хлормagneйного) с минерализацией 1–3 г/дм³. Под ней до глубины 500 м находится зона хлоридных вод типов IIIб (хлоркальциевого) или IIIa с минерализацией до 37,2 г/дм³. Катионный состав вод в пределах всех зон – двух- и трехкомпонентный: Mg–Na, Mg–Ca, Ca–Na, Ca–Mg–Na. Наибольшей сложностью он отличается в верхней зоне наименее минерализованных вод.

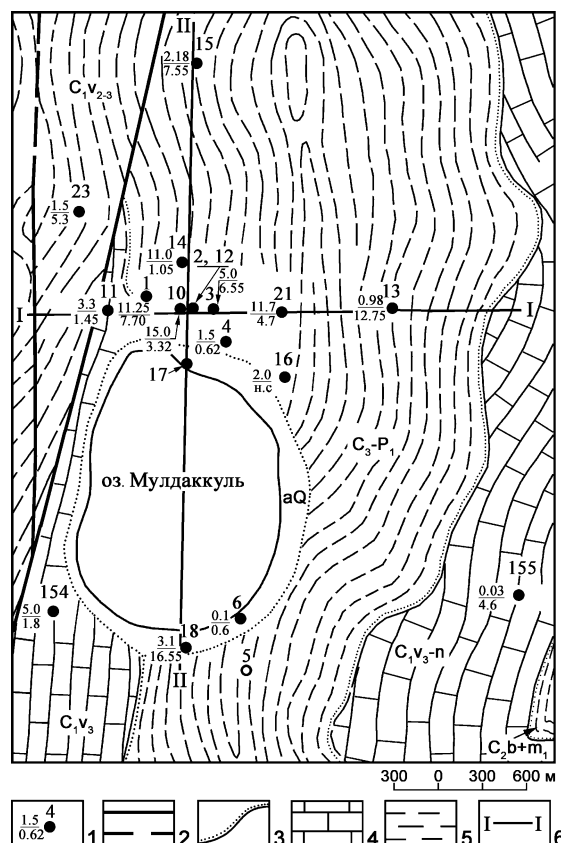


Рис. 2 Геолого-гидрогеологическая карта района оз. Мулдаккуль [2].

1 – скважина, сверху ее номер, слева: в числителе – дебит, л/с; в знаменателе – понижение, м (скважина № 5 – безводная); 2 – линии тектонических контактов: сплошные – достоверные, пунктирные – предполагаемые; 3 – несогласные литологические контакты; 4, 5 – породы: 4 – известняки, 5 – сланцы, аргиллиты, алевролиты, песчаники, конгломераты; 6 – линия гидрогеологического разреза. Возраст пород: Кизильская свита: (C₁v₂₋₃ – кремнистые сланцы, алевролиты, песчаники, туфоконгломераты; C₁v₃ – известняки серые, светло-серые; C₁v_{3-n} – известняки розоватые, брекчированные); уртазымская свита: C₂b+m₁ – аргиллиты, алевролиты, песчаники с прослоями гипсов, конгломераты; янгельская свита: C₃-P₁ – сланцы, алевролиты, песчаники, конгломераты; аQ – аллювий озерных отложений: глины, илы, пески, песчано-гравийные отложения.

С глубиной по мере роста минерализации в водах происходит снижение величины рН (от 7,0 до 6,0) и увеличение концентрации свободной CO₂ (от 13 до 97 мг/дм³). Наиболее минерализованная вода, выведенная скважиной 10 с глубины 350 м, имеет следующий состав:

$$M\ 37,2 \frac{Cl\ 96SO_4\ 4}{Na\ 65Ca\ 31Mg\ 4} pH\ 6,0. \quad (2)$$

Солевой состав минеральных вод также довольно сложный. Обычно в нем преобладают NaCl, MgCl₂ и CaCl₂, общий вклад которых в формирование минерализации составляет 70–90%. Подчинённое положение занимают MgSO₄, CaSO₄ и особенно Ca(HCO₃)₂. В водах Cl–Ca–Na состава с минерализацией > 15–20 г/дм³ содержание специфической соли CaCl₂, определяющей хлоркальциевый геохимический тип вод, достигает 29 % (скв. 2, 10, 14). Но наиболее обогащены CaCl₂ (53–70%) воды с относительно невысокой минерализацией (2,4–4,6 г/дм³), залегающие

на глубине 120–180 м, иногда 60–120 м, в скважинах 13 и 15, наиболее удалённых от озера Мулдаккуль. В воде скважин, расположенных в прибрежной части озера, концентрация CaCl_2 ниже, а в некоторых скважинах (3, 12, 21) глубиной 140–180 м эта соль в водах вообще отсутствует. CaCl_2 , как известно, отражает глубинную обстановку формирования подземных вод с квазистабилизированным гидрогеодинамическим режимом, показателем которой является коэффициент метаморфизации $r\text{Na}/r\text{Cl}$. В исследуемых водах он снижается до 0,7–0,4, т.е. значительно меньше, чем для нормальной морской воды ($r\text{Na}/r\text{Cl}$ 0,87).

Минеральные воды отличаются повышенным содержанием микроэлементов талассогенного и биогенного происхождения (мг/дм^3): $\text{Br} < 33,9$ (наиболее часто встречающееся значение 15–20), $\text{H}_3\text{BO}_3 < 20,0$ (8–14), $\text{I} < 2,0$ (0,8–1,3), $\text{F} < 1,25$ (0,2). Концентрация ОВ колеблется (мг/дм^3): нейтральные вещества (смолы, масла) 5,6–9,2, кислые битумы (нафтенные кислоты, кислые битумы) 4,8–6,6, спирторастворимые вещества (спиртовые смолы, гумусовые вещества) 5,2–8,34. Суммарное содержание ОВ составляет 19,2–23,6 мг/дм^3 . Радиоактивные элементы определены в воде скв. 10 в количестве: $\text{U } 6 \times 10^{-5} \text{ мг/дм}^3$, $\text{Sr } 14,95\text{--}15,1 \text{ мг/дм}^3$, а $^{90}\text{Sr } 1 \times 10^{-12} \text{ Си/дм}^3$.

Большой интерес представляют результаты гелиевых и изотопных исследований минеральных вод. Концентрация гелия в водах зоны Смеловского разлома достигает $3 \times 10^{-2} \text{ мл/дм}^3$. По мере удаления от неё гелиеносность вод резко снижается и не превышает фоновую в неглубокозалегающих инфильтрационных водах атмосферного питания ($5 \times 10^{-5} \text{ мл/дм}^3$). Такое распределение гелия служит дополнительным свидетельством разгрузки глубинных вод по проницаемой зоне тектонического нарушения. Минеральные воды отличаются не только ионно-солевым, микрокомпонентным и газовым составом, но и изотопным составом водорода и кислорода растворителя H_2O , отражающим условия формирования и генезис вод.

Инфильтрационные $\text{Cl}\text{--Na}$ рассолы отличаются пониженными и низкими содержаниями дейтерия ($\delta\text{D } -110 \div -170 \text{ ‰}$) и, таким образом, сильно отличаются от океанической воды. Метеогенный генезис растворителя подчёркивается близостью фигуративных точек рассолов этого состава к линии Крейга атмосферных и поверхностных вод суши. Фигуративные точки седиментогенно-эпигенетических $\text{Cl}\text{--Ca}$ рассолов тяготеют к прямой, расположенной правее линии Крейга. Они «утяжелены» относительно $\text{Cl}\text{--Na}$ рассолов по $\delta\text{D } -90 \div -20 \text{ ‰}$ и «облегчены» по сравнению с водой Мирового океана.

Исследуемые минеральные воды (скв. 10 и 11) занимают промежуточное положение ($\delta\text{D } -101 \div -78 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O } -13 \div -11 \text{ ‰}$) между линией Крейга и седиментогенными рассолами, что подчёркивает их смешанное инфильтрационно-седиментогенное происхождение. Отличается по изотопному составу и вода оз. Мулдаккуль, для которой $\delta\text{D } -52,7 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O } -4,5 \text{ ‰}$. Положение фигуративной точки на рис. 3. указывает, что вода в озере подвержена значительному испарительному концентрированию.

Судя по литолого-фациальному облику терригенных и карбонатных толщ каменноугольного и нижнепермского возраста в районе Мулдаккульского месторождения минеральных вод широкое развитие получили морские и лагунные палеобассейны с водами Cl–Mg–Na состава повышенной солёности (36–150 г/дм³). На это указывает записанность терригенных отложений янгельской свиты (в гипсоносных породах пройдена шахта на северо-восточном берегу оз. Мартышечьего). Лагунно-морские бассейны с солеными и рассольными водами, судя по палеогеографическим данным, существовали также в турнейское и визейское время. Поэтому следует полагать, что высокоминерализованные седиментогенные воды свойственны не только янгельской свите, но и глубоким осадочным комплексам нижнего карбона.

Таким образом, в ходе седиментогенеза талассогенные растворы карбона и нижней перми были захоронены в горных породах и явились первоосновой подземных седиментогенных вод. В дальнейшем на стадии эпигенеза Cl–Mg–Na воды были превращены в растворы Cl–Ca типа под влиянием процессов метаморфизации в системе «вода–порода» (альбитизации, доломитизации, обменной адсорбции):

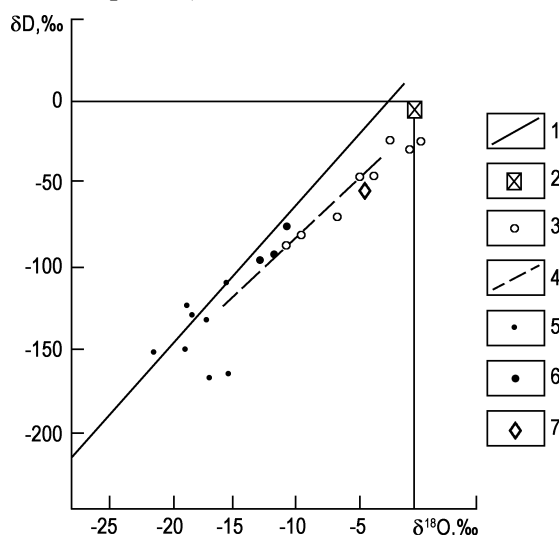


Рис.3 Мулдаккульские минеральные воды на диаграмме изотопного состава некоторых генетических типов природных вод.

1 – линия Крейга метеогенных и поверхностных вод, 2 – стандарт океанической воды (SMOW), 3 – седиментогенные хлоридные кальциевые рассолы, 4 – линия хлоридных кальциевых рассолов, 5 – инфильтрационные хлоридные натриевые рассолы 6 – Мулдаккульские минеральные воды (скв. 10, 11), 7 – вода озера Мулдаккуль.

Работа выполнена по теме FMRS-2022–0013

Список литературы

1. Абдрахманов Р.Ф. Пресные подземные и минеральные лечебные воды Башкортостана / Уфа: Гилем, Башк. энцикл., 2014. 416 с.
2. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала / Уфа: Гилем, 2010. 420 с.

3. Казанцева Т.Т. Геологическое строение Кизильской зоны Магнитогорской мегасинформы в свете новых данных // Геология, география и глобальная энергия. 2009, №3(34). С. 27-32.
4. Шварцев С.Л., Домрочева Е.В., Рассказов Н.М. Геохимия и формирование содовых вод Кузбасса // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318. № 1. С. 128–134.
5. Гидрогеология СССР. Т. XVII. Кемеровская область и Алтайский край. М.: Недра, 1972. 399 с.

УДК 551.24.01 + 556.3.01

ИЗОТОПНЫЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УГЛЕКИСЛЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ЕССЕНТУКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**Е.И. Барановская*¹, Н.А. Харитонов^{1,2}, Е.А. Филимонова¹, Е.С. Максимова¹,
А.А. Маслов¹**

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

E-mail: baranovskaya_kat@mai.ru

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия, E-mail: tchenat@mail.ru

Аннотация

Район Кавказских минеральных вод является уникальным местом, где на сравнительно небольшой территории сосредоточены минеральные воды различного химического состава, имеющие важное бальнеологическое значение. Основным типом минеральных вод в рассматриваемом регионе является вода, богатая CO₂. В ходе исследований был собран обширный и уникальный фактический материал, включающий современные режимные гидрогеохимические и гидрогеодинамические данные, который позволил охарактеризовать химический состав и типы ценных минеральных вод, а также выявить генезис водной, газовой и солевой компоненты минеральных вод Ессентукского месторождения.

Ключевые слова: углекислые минеральные воды, Ессентукское месторождение, формирование, изотопный состав, гидрогеохимические условия

ISOTOPIC AND GEOCHEMICAL FEATURES OF A HIGH pCO₂ MINERAL WATER FROM ESSENTUKI FIELD

**E.I. Baranovskaya*¹, N.A. Kharitonova^{1,2}, E.A. Filimonova¹, E.S. Maximova¹,
A.A. Maslov¹**

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: baranovskaya_kat@mai.ru

²Far East Geological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Science, Vladivostok, Russian Federation,
E-mail: tchenat@mail.ru

Abstract

The area of Caucasian mineral water is a unique place where mineral waters of various chemical compositions are concentrated on a small territory. They have an important balneological significance. The main type of mineral waters in the region under consideration is water rich in CO₂. As a result of the research, extensive and unique factual material was collected, which includes modern regime

hydrogeochemical and hydrogeodynamic data. They made it possible to characterize the chemical composition and types of valuable mineral waters, as well as to identify the genesis of the water, gas and salt components of the mineral waters of the Essentuki mineral water field.

Key Words: CO₂-rich mineral water, Essentuki mineral water field, formation, isotopic composition, hydrogeochemical conditions

Введение

Ессентукское месторождение минеральных вод расположено в центральной части региона КМВ (Кавказские Минеральные воды), достигая площади 200 км². Является известным в России бальнеологическим курортом, где формируются различные по минерализации, температуре, газовому составу минеральные воды, используемые для питья и лечения заболеваний желудочно-кишечного тракта, ингаляций и орошения, а также для ванн. Наибольший интерес представляют углекислые гидрокарбонатно-хлоридно-натриевые (соляно-щелочные) воды.

Гидрогеологический разрез Ессентукского месторождения представлен чередованием моноклинально залегающих относительно водоупорных и водопроницаемых пород мезозойско-кайнозойского осадочного чехла и протерозойско-палеозойского фундамента. В разрезе Ессентукского месторождения выделяют четыре продуктивных водоносных горизонта [1; 6].

Особенностью месторождения является газогидрогеохимическая аномалия, а именно в отложениях (раннего мела), залегающих ниже по разрезу, циркулируют воды более низкой минерализации и другого химического состава, нежели в залегающих выше и ниже по разрезу водоносных горизонтах. На сегодняшний день не существует единой гипотезы формирования этих вод. Сложные геологические и гидрогеологические условия, наличие разломов, зон повышенной трещиноватости, гор-лакколитов объясняют разнообразие минеральных вод Ессентукского месторождения и дискуссионность их формирования.

Для установления условий циркуляции и выявления генезиса были рассмотрены данные по изотопному и химическому составу водной и газовой фаз углекислых минеральных вод Ессентукского месторождения.

Методы исследований

Для проведения изотопно-геохимических исследований использовались данные о химическом и газовом составе, о содержании стабильных изотопов кислорода, водорода, углерода в природных минеральных водах Ессентукского месторождения, отобранные в 2019-2022 гг. из 20 скважин.

Основные катионы и анионы определяли методом жидкостной ионной хроматографии (HPLC-10AVp, SHIMADZU) в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН. Изотопные

исследования стабильных изотопов кислорода и дейтерия в подземных водах выполняли в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН, в лаборатории стабильных изотопов. Результаты анализов приведены относительно международного стандарта VSMOW. Химический состав свободного газа определяли методом газовой хроматографии на газовом хроматографе «Кристалл-2000М» в лаборатории ГИН РАН. Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ в CO_2 и CH_4 анализировали в МГУ имени М.В. Ломоносова на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых.

Результаты и их обсуждения

Все исследуемые подземные воды являются слабощелочными (рН варьирует от 6,3 до 8,5). Температура подземных вод в исследованных скважинах варьирует также в широком диапазоне – от 13 до 48 °С и, в целом, имеет тенденцию к увеличению с глубиной залегания водоносных горизонтов и в направлении от удаления от области питания [1].

Минерализация подземных вод Ессентукского месторождения изменяется в широком диапазоне – от 0,6 до 12,8 г/л и достаточно сильно варьирует в зависимости от горизонта их циркуляции [1]. В вертикальном разрезе прослеживается отчетливая гидрогеохимическая зональность: подземные воды, циркулирующие в промежуточном апт-альбском водоносном горизонте, имеют значительно более низкие значения минерализации, чем подземные воды, локализованные в породах палеогенового (P_{1d-sl}) и верхнемелового (K_2) водоносных горизонтов, расположенных гипсометрически выше по разрезу, а также, чем подземные воды из титон-валанжинского горизонта ($\text{J}_{3tt-K_{1v}}$), залегающего ниже по разрезу.

В анионном составе рассматриваемых минеральных вод всегда преобладает гидрокарбонат-ион; в катионном составе преобладает ион натрия, в то время как содержание сульфат-иона и хлор-иона варьирует и регулируется местом циркуляции подземных вод, т.е. их приуроченностью к водоносному горизонту (Рис.). Максимальные концентрации гидрокарбонат-иона характерны для вод сеноман-маастрихского водоносного горизонта, а минимальные – для апт-нижнеальбского водоносного горизонта. Прямая зависимость минерализации исследуемых вод от содержания гидрокарбонат-иона свидетельствует о том, что минерализация углекислых вод контролируется преимущественно количеством гидрокарбонат-иона, который формируется при растворении в водах углекислого газа, мигрирующего из глубоких горизонтов через открытые разломы и зоны тектонической деформации. На величину минерализации значимо влияет также содержание хлор-иона, что подтверждается прямой зависимостью. Повышенное содержание хлоридов в минеральных водах Ессентукского месторождения связано с солевым комплексом седиментационных поровых вод морского генезиса, который частично сохранился в плохопроницаемых блоках терригенно-карбонатных пород сеноман-маастрихского водоносного горизонта [2; 3; 4].

В катионном составе минеральных вод продуктивных водоносных горизонтов Ессентукского месторождения преобладает ион натрия (57–98%-экв), остальные катионы находятся в резко подчиненной концентрации (Рис.).

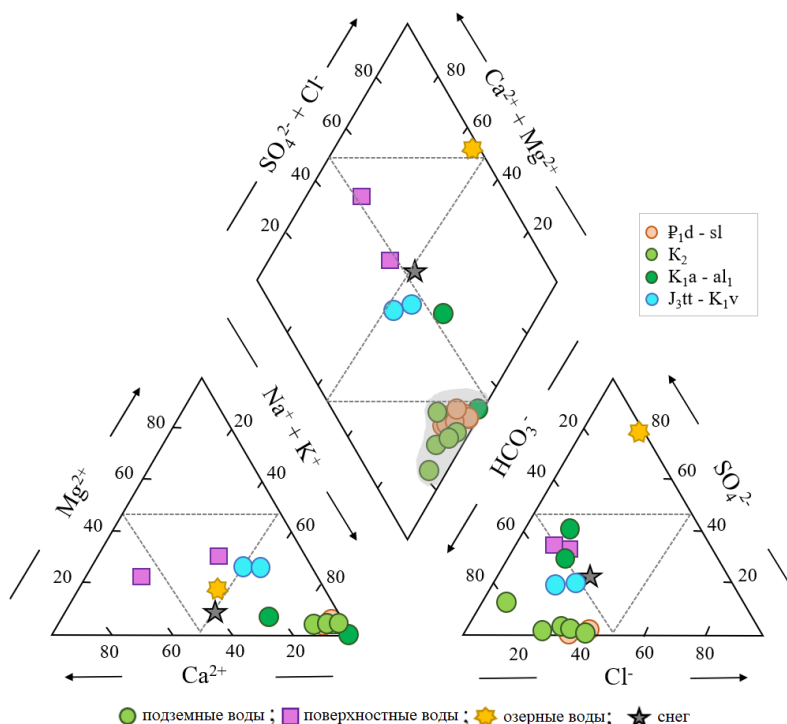


Рис. 1 Диаграмма Пайпера для изучаемых природных вод Ессентукского месторождения.

Содержание общего углерода ($C_{\text{общ}}$) в исследованных пробах минеральных вод Ессентукского месторождения указывает на значительное преобладание неорганического углерода ($>95\%$), который формируется при растворении водовмещающих карбонатных пород. Незначительное количество органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в углекислых подземных водах обусловлено весьма малым количеством органической фракции водовмещающих толщ: наибольшая концентрация $C_{\text{орг}}$ (2,2 %) характерна для глинистых минеральных фаз нижнего мела и известняков, содержащих остатки органического вещества верхнего мела [5].

В газовом составе минеральных вод Ессентукского месторождения преобладает (об.%) углекислый газ (его содержания часто доходят до 98), вторым по распространенности является азот (до 66), далее следует метан (до 29).

Содержание стабильных изотопов кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ и $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$) в минеральных водах Ессентукского месторождения сильно варьирует и находится в диапазоне от $-13,75$ до $-9,69\%$ и от $-101,08$ до $-74,34\%$ соответственно. Анализ содержаний стабильных изотопов кислорода и водорода в водной фазе показывает, что минеральные воды эльбурганского и сеноман-маастрихского водоносных горизонтов близки между собой, а также с атмосферными осадками и поверхностными водами региона по изотопному составу. Большая

часть фигуративных точек минеральных вод этих продуктивных водоносных горизонтов расположена вдоль глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ), что свидетельствует об их инфильтрационном генезисе. Отсутствие значительного «сдвига вправо», свидетельствующего о кислородном изотопном обмене между породой и водой в условиях повышенных температур, говорит об активном гидродинамическом режиме подземных вод в вышеуказанных горизонтах и слабом взаимодействии между водой и породой. Незначительное отклонение от ГЛМВ некоторых фигуративных точек подземных вод из эльбурганского водоносного горизонта, а также пробы воды из пруда, по-видимому, отражает исходное испарительное концентрирование в поверхностных водоемах, при котором происходит накопление тяжелых изотопов водорода и кислорода.

Изотопный состав углерода гидрокарбонат-иона ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) позволил выяснить источник водорастворенного углерода в исследуемых минеральных водах. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ минеральных вод Эссентукского месторождения варьируют в широком диапазоне – от $-14,43$ до $+8,59\text{‰}$, выявляя полигенетический источник карбоната.

Изотопный состав углерода в газовой фазе ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) позволил выявить генезис углеродсодержащих газов в минеральных водах Эссентукского месторождения. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ варьируют в широком диапазоне – от $-23,34$ до $-6,03\text{‰}$. Максимальные значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ ($-1,96 \div -2,46\text{‰}$) характерны для газов наиболее глубокого титон-валанжинского водоносного горизонта. В составе попутных газов этого горизонта практически совсем отсутствует метан. Такие показатели очень близки к значениям $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2\text{карб.}}$ варьирует от -2 до $+2\text{‰}$), образованного при термическом разложении карбонатных комплексов. Для этого горизонта наиболее вероятны два источника CO_2 : значительная доля поступает при метаморфогенном преобразовании карбонатной толщи, однако нельзя исключать и незначительную примесь мантийного газа, поступающего из фундамента через открытые трещины.

Заключение

Результаты изотопно-геохимических исследований показали, что водная фаза минеральных вод Эссентукского месторождения имеет метеорный генезис, а формирование ионно-солевого состава минеральных вод Эссентукского типа происходит в результате взаимодействия их с толщей водовмещающих карбонатно-терригенных пород. Схожий химический состав, а главное идентичные пропорции распределения главных компонентов в минеральных водах палеогенового и верхнемелового горизонтов указывают на единый генезис вод. Следовательно, все рассматриваемые минеральные воды изначально метеорные, а современный химический состав – это результат комплекса гидрогеохимических и гидробиохимических процессов, протекающих в системе «подземная вода–порода–газ–живое вещество». В процессе циркуляции исходно метеорных вод происходит их взаимодействие

с водовмещающими породами и метаморфизация вод, при которой, в их химическом составе начинает увеличиваться содержание солей морского генезиса и преобладает натрий. Что касается газовой фазы, то углекислый газ в минеральных водах Ессентукского месторождения не имеет единого источника, а характеризуется смесью газов различного происхождения – мантийного, биогенного и метаморфогенного.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект № 21-77-00060 «Условия и механизмы формирования, современное состояние и перспективы использования минеральных вод курорта Ессентуки»).

Список литературы

1. Барановская Е.И., Харитоновна Н.А., Филимонова Е.А. и др. Новые данные по химическому и изотопному (H, O, C, S, N) составу минеральных вод Ессентукского месторождения // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 5. С. 120–136.
2. Иванов В.В. Кавказские минеральные воды // Москва: 1-я типография Профиздата. 1972. 157 с.
3. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления (Отв. ред. Поляк Б.Г.) // Тр. ГИН РАН, вып. 599, М.: ГЕОС. 2012. 348 с.
4. Лаврушин В.Ю., Лисенков А.Б., Айдаркожина А.С. Генезис Ессентукского месторождения углекислых вод (Северный Кавказ) // Геохимия. 65 (1). 2020. С. 77–91.
5. Потапов Е.Г. Эволюция взглядов на генезис углекислых минеральных вод Ессентукского месторождения // В сборнике: Памяти А.Н. Воронова. Сборник статей. Под редакцией Е.П. Каюковой. Санкт-Петербург. 2018. С. 87–91.
6. Filimonova E., Lavrushin V., Kharitonova N. et al. Hydrogeology and hydrogeochemistry of mineral sparkling groundwater within Essentuki area (Caucasian mineral water region) // Environ. Earth Sci. 2020. Vol. 79. P. 15.

УДК 556.314, 550.42, 550.43

ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА КУЗБАССА

Е.В. Домрочева*¹

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, E-mail:
DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Аннотация

Изучение гидрогеохимических условий и формирования состава природных вод Томь-Усинского района Кемеровской области в условиях отсутствия добычи угля и нагрузок на водные системы очень важно. Полученные данные позволяют расширить представления об общих закономерностях распределения элементов в системе вода–порода в условиях угольных отложений на территории, не нарушенной интенсивной разработкой полезных ископаемых, например, добычей угля или угольного метана, характерных для Кузбасса. Это позволит в дальнейшем использовать имеющуюся информацию при различных экологических и поисковых исследованиях.

Автором выполнены исследования химического состава природных вод на территории Тутуянской площади Томь-Усинского района Кузбасса. В рамках данного исследования отмечено, что имеющиеся изменения в значениях минерализации и pH присущи естественному их распределению. Источником поступления вод являются атмосферные осадки, поступающие в систему из областей питания, поэтому изученные воды инфильтрационного генезиса, прослеживается гидрогеохимическая зональность. В работе показаны результаты проведенного расчета равновесий подземных вод данной площади с карбонатными и алюмосиликатными минералами вмещающих пород. Установлено, что воды имеют равновесно-неравновесный характер: они неравновесны с первичными (эндогенными) минералами, которые они и растворяют, но в то же время равновесны с глинами и карбонатами, т. е. осаждаются из вод.

Ключевые слова: формирование состава, равновесно-неравновесное состояние, зональность, Кузбасс

FORMATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF NATURAL WATERS IN THE SOUTH OF KUZBASS

E.V. Domrocheva*¹

¹Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, E-mail:
DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Abstract

The study of hydrogeochemical conditions and the formation of the composition of natural waters of the Tom-Usinsky district of the Kemerovo region in the absence of coal mining and loads on water systems is very important. The data obtained make it possible to expand the understanding of the general patterns of the distribution of elements in the water–rock system under conditions of coal deposits in an area not disturbed by intensive mining, for example, coal mining or coal methane, characteristic of Kuzbass. This will make it possible to use the available information in various environmental and exploratory studies in the future.

The author carried out studies of the chemical composition of natural waters on the territory of the Tutuyasskaya square of the Tom-Usinsky district of Kuzbass. Within the framework of this study, it was noted that the existing changes in the values of mineralization and pH are inherent in their natural distribution. The source of water intake is atmospheric precipitation entering the system from the feeding areas, therefore, the studied waters of infiltration genesis, hydrogeochemical zonality is traced. The paper shows the results of the calculation of the equilibria of groundwater of this area with carbonate and aluminosilicate minerals of the host rocks. It is established that the waters have an equilibrium-nonequilibrium character: they are nonequilibrium with primary (endogenous) minerals, which they dissolve, but at the same time they are equilibrium with clays and carbonates, i.e. they are precipitated from the waters.

Key Words: composition formation, equilibrium-nonequilibrium state, zonality, Kuzbass

Введение

В последние годы сотрудниками ТФ ИНГГ СО РАН продолжилось изучение поверхностных и подземных вод на территории Кемеровской области. Ранее авторами достаточно детально уже были изучены формирование и гидрогеохимические условия территорий Нарыкско–Осташкинской и Талдинской площадей Кузбасса [1; 2]. Исследования в данной работе сосредоточены на территории одной из южных площадей – Тутуянской. Все площади с большими оцененными запасами угольного метана [2].

Следует отметить, что при интенсивной разработке полезных ископаемых происходит значительное изменение состояния природной среды. Изменяется ландшафт, что приводит к изменению гидросети. Это очень характерно для Кузбасса, в частности, для площадей соседних с Тутуянской. Сама же площадь до настоящего момента не была подвержена таким изменениям и имеет естественное (природное) состояние. Однако, при разработке месторождений происходит формирование вод по составу нехарактерных для региона. Все это объясняет необходимость изучения геохимии природных вод, особенно до начала освоения территории.

Анализ гидрогеохимических условий природных вод этого района позволил автору также выявить причины изменения их химического состава и понять условия взаимодействия подземных вод в системе вода–порода с помощью программного комплекса HydroGeo, рассчитав активности основных ионов и построив диаграммы равновесия. Подобные работы выполнялись разными авторами, однако они более популярны среди иностранных, выполненных для зарубежных территорий [3; 4].

Методы исследований

За основу работы взяты результаты анализа проб, отобранных в 2015–2016 гг. сотрудниками ТФ ИНГГ СО РАН в ходе совместных работ с ООО «Газпром добыча Кузнецк», а также имеющиеся данные по этой территории. В полевых условиях измерялись: температура, pH, Eh и быстроизменяющиеся компоненты. Аналитические исследования проводились стандартными методами в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета, зарегистрированной в Системе аналитических лабораторий Госстандарта России. При проведении полного химического анализа вод использовались традиционные методы, а также методы спектрального и атомно-абсорбционного анализа.

Расчет активностей проводился с использованием программного комплекса HydroGeo, разработанного М.Б. Букаты [2]. Степень насыщения подземных вод относительно основных породообразующих минералов алюмосиликатных отложений анализировалась посредством нанесения данных по составу вод на диаграммы полей устойчивости алюмосиликатов. Методика их построения подробно рассматривается в работах Р.М. Гаррельса [5], Х.К. Хельгессона [6], Дж.М. Андерсона [7]. Все выявленные соотношения между минералами представлены на двумерной диаграмме в координатах, соответствующих в реакциях переменным.

Результаты и их обсуждения

Проведенное гидрогеохимическое опробование на данной территории показало, что исследуемые поверхностные воды являются умеренно пресными, по величине pH от нейтральных до слабо щелочных. Минерализация этих вод составляет от 37 до 371 мг/л, значения pH от 7,2 до 8,5. Минимальные значения макрокомпонентов установлены в Большом озере на слиянии рек Таборная и Ольжерас, максимальные – в р. Абашева и в р. Большая Кедровка. По химическому составу воды $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ с содержанием HCO_3^- 22–273 мг/л и Ca^{2+} 6–54 мг/л. Поверхностные воды природных озер и опробованных рек имеют небольшие значения общей минерализации, так как основным источником их питания являются осадки, выпадающие из атмосферы. Выпадая на поверхность, они, прежде всего, контактируют с верхним почвенным слоем земной поверхности и только после этого проникают глубже, и взаимодействуют с горными породами. В связи с тем, что такое взаимодействие минимально, мы и наблюдаем,

что почти все они имеют небольшой разброс значений минерализации и pH и относятся к HCO_3 Ca типу вод.

Анализируя распределение минерализации и значений pH, отмечается незначительное увеличение минерализации от водоразделов к реке. Такое распределение макрокомпонентов наблюдается для водосборных бассейнов рек Абашева, Тутуяс и Ольжерас. Вариации возникают в зимнее и летнее время отбора проб. В то же время отмечается небольшое увеличение их содержаний с уменьшением отметок рельефа. Минерализация и концентрации практически всех макрокомпонентов (HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , K^+) увеличиваются с востока на северо-запад. Поэтому на территории Тутуяского и Ольжерасского бассейнов установлены наименьшие концентрации, резко отличающиеся от концентраций, установленных на территории Абашевского бассейна. Таким образом, чем более длительное время происходит взаимодействие этих вод с горными породами и более длинный путь они совершают, тем значительнее увеличение в них содержаний макрокомпонентов и значений pH [8].

По химическому составу подземные воды Тутуяской площади в основном HCO_3 -Ca, Ca-Na и Na-Ca, относящиеся к зоне активного водообмена. Содержание HCO_3^- изменяется от 39 до 360 мг/л, Ca^{2+} от 5 до 56 мг/л, Na^+ в среднем составляет 49 мг/л. Что касается концентрации Cl^- , содержание которого с глубиной увеличивается, то значения его незначительны – от 0,5 до 1,2 мг/л, максимально 2,6 мг/л. В целом же с глубиной минерализация подземных вод закономерно увеличивается от 63 до 508 мг/л. Одновременно с ростом минерализации растет и значение pH. Подземные воды в основном слабощелочные, реже нейтральные и щелочные. На рассматриваемой площади наиболее характерны средние значения pH подземных вод от 8,0 до 8,2. Количество Na в составе вод увеличивается с глубиной и в основном с порядка 200 м воды становятся HCO_3 Ca-Na и Na-Ca состава. В связи с этим незначительно, но все-таки меняется тип подземных вод с HCO_3 Ca на HCO_3 Na-Ca и HCO_3 Ca-Na.

Для понимания механизмов формирования состава подземных вод очень важно выявить характер их равновесия с минералами вмещающих пород, так как состав вод определяется разностью между растворяемыми горными породами и образующимися вторичными минералами [9]. Для расчета активности химических элементов, входящих в состав подземных вод, и построения диаграмм равновесия вод в состав твердой фазы были выбраны минералы, которые наиболее часто встречаются во вмещающих отложениях. Это в основном силикатные и алюмосиликатные (кварц, полевые шпаты, глины и др.), единично карбонатные (кальцит, магнезит, доломит, сидерит), а также сульфатные и хлоридные минералы.

Результаты расчетов удобно представить графически с помощью диаграмм степени насыщения. Если фигуративные точки (квотант) располагаются выше линии насыщения (константы), то воды насыщены относительно карбонатов.

Анализ диаграмм показал, что пресные подземные воды не насыщены к кальциту, кроме этого, часть точек расположилась близко к границе насыщения или по обе стороны от нее. В целом же более минерализованные воды $\text{HCO}_3 \text{ Na}$ состава (содовые воды), развитые преимущественно в зоне замедленного водообмена, насыщены по отношению к кальциту. Из диаграмм видно, что при переходе из одного состояния в другое меняется и химический тип подземных вод. Воды пересыщены практически все относительно кальцита и сидерита, большая часть относительно доломита и близки к насыщению относительно магнезита.

Формирование на протяжении всего времени карбонатных минералов носит закономерный характер, который определяется такими параметрами гидрогеологической среды, как pH, температура и минерализация подземных вод. Все эти параметры закономерно изменяются с глубиной. При этом важно отметить, что одним из ведущих факторов непрерывного вторичного карбонатообразования является неравновесное состояние вод с первичными алюмосиликатными минералами [8].

Заключение

Анализируя полученные результаты гидрогеохимического опробования поверхностных вод, очевидно, что на данной территории складываются благоприятные гидрогеологические условия, которые отражаются в повышении их минерализации от истоков к устью. Подобная картина в распределении носит естественный характер.

Следует отметить, что, кроме этого, одним из основных факторов изменения минерализации, значений pH, а следовательно, и типа вод является техногенный фактор (изменение химического состава вод в процессе отработки угольных месторождений), характерный для Кузбасса. Влияние этого фактора отмечалось авторами не только в литературе, но и при проведении площадного опробования на ранее изученных сотрудниками ТФ ИНГГ СО РАН площадях (Талдинская, Нарыкско–Осташкинская) [1; 2]. В настоящее время на территории Тутуянской площади не располагаются угледобывающие и перерабатывающие предприятия, а лишь находятся по соседству, поэтому и их воздействие на данный момент минимально или отсутствует.

Обобщение ранее известной информации по соседним площадям на территории юга Кузбасса и нового материала, полученного в 2015–2016 гг. по гидрогеологии и гидрогеохимии показывает, что на исследуемой площади также прослеживается прямая вертикальная гидрогеохимическая зональность, в соответствии с которой по интенсивности водообмена выделяются две зоны: активного и замедленного водообмена. Следует отметить, что характеристика подземных вод ниже зоны активного водообмена приводится на основе ранее изученных данных по соседним районам и площадям, так как в настоящий момент

на территории Тутуяской площади нет возможности опробования более глубоких скважин (глубже 200 м) в связи с их отсутствием [2; 9].

Результаты расчетов термодинамического равновесия показали, что воды всего геологического разреза неравновесны с первичными алюмосиликатными минералами. Менее минерализованные подземные воды зоны активного водообмена в большей степени недонасыщены относительно исходных алюмосиликатных минералов благодаря низким значениям общей минерализации и рН. Следовательно, в этих условиях данные минералы активно растворяются и переводят в раствор порообразующие элементы: Са, Mg, Na, Fe, K, Si, Al. Часть элементов, поступивших в раствор, сразу уходит из раствора во вторичные отложения: окислы и гидроокислы Fe, Mn и Al, глины (каолинит и различные монтмориллониты, кроме калиевых), карбонаты (кальцит, доломит, частично сидерит), которые в этих условиях не растворяются, а образуются.

Основной причиной равновесно-неравновесного состояния является то, что взаимодействие воды с первичными алюмосиликатами (с которыми подземные воды не равновесны) формирует вторичные продукты, с которыми в данный момент подземные воды равновесны. Вторая причина равновесно-неравновесного состояния – это обилие в водовмещающих отложениях продуктов разложения органического вещества и постоянное обогащение подземных вод растворенной CO_2 , которая нейтрализует высокие значения щелочности среды, образующейся при реакциях гидролиза.

Исследование выполнено при поддержке Программы фундаментальных научных исследований Российской академии наук (ФНИ РАН) № 0266-2022-0016.

Список литературы

1. Домрочева Е.В., Лепокурова О.Е., Сизиков Д.А. Геохимическая характеристика подземных вод Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2014. Т. 25. № 1. С. 94–101.
2. С.Л. Шварцев, В.Т. Хрюкин, Е.В. Домрочева К.И. Кузеванов, Т.С. Попова, О.Е. Петрова, Е.В. Швачко Гидрогеология Ерунаковского района Кузбасса в связи с проблемой добычи угольного метана // Геология и геофизика. 2006. Вып. 47. № 7. С. 878–889.
3. Букаты М.Б. Рекламно-техническое описание программного комплекса HydroGeo. Номер гос. регистрации алгоритмов и программ во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНТИЦ) № 50200500605. М.: ВНТИЦ, 2005. 7 с.
4. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. / М.: Изд-во ЦентрЛифтНефтеГаз, 2012. 672 с.
5. Гаррельс Р.М. Растворы, минералы, равновесия. М.: Изд-во Мир, 1968. 368 с.
6. Helgeson H.C. Kinetics of mass among silicates and aqueous solutions // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1971. № 5. pp. 421–469.
7. Anderson G.M. Thermodynamics of natural systems. New York: Cambridge University Press, 2017. 428 p.

8. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
9. Шварцев С.Л., Домрочева Е.В., Рассказов Н.М. Геохимия и формирование содовых вод Кузбасса // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318. № 1. С. 128–134.
10. Гидрогеология СССР. Т. XVII. Кемеровская область и Алтайский край. М.: Недра, 1972. 399 с.

УДК 556.314

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ПО ТРИТИЮ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ ВОДА-ПОРОДА НА ПРИМЕРЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РАЙОНА ТОРЕЙСКИХ ОЗЁР

В.В. Дребот*¹, О.Е. Лепокурова^{1,2}, С.В. Борзенко³

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН: tomsk@igng.tsc.ru

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет: lepokurovao@tpu.ru

³Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН: svb_64@mail.ru

Аннотация

Данные по тритию показали, что «возраст» подземных вод увеличивается в направлении от области питания в область разгрузки. Установлено, что в зоне активного водообмена воды являются $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ по составу с условным возрастом не более 40 лет, а в зоне замедленного водообмена – $\text{HCO}_3\text{-Na}$ с возрастом 50 лет и более. Рост времени взаимодействия в системе вода-порода способствует достижению насыщения кальцитом, что приводит к смене $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ типа подземных вод, отобранных на самых высоких отметках, на $\text{HCO}_3\text{-Na}$ у Торейской котловины.

Ключевые слова: тритий, водообмен, содовые воды, формирование состава подземных вод

USING TRITIUM DATA TO STUDY INTERACTION IN THE WATER- ROCK SYSTEM ON THE EXAMPLE OF GROUNDWATER IN THE AREA OF TOREY LAKES

V.V. Drebot*¹, O.E. Lepokurova^{1,2}, S.V. Borzenko³

¹Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS: tomsk@igng.tsc.ru

²National Research Tomsk Polytechnic University: lepokurovao@tpu.ru

³Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology of SB RAS: svb_64@mail.ru

Abstract

The data on tritium showed that the «age» of groundwater increases from the direction of the collecting to the discharge area. It has been established that in the zone of active water exchange, waters are $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ with a conditional age of not more than 40 years, and in the zone of slow water exchange - $\text{HCO}_3\text{-Na}$ with an age of 50 years or more. An increase in the time of water-rock interaction contributes to the achievement of calcite saturation by water, which leads to a change in the $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type of groundwater sampled at the highest elevations to $\text{HCO}_3\text{-Na}$ near the Torey depression.

Key Words: tritium, water exchange, Na-dominant waters, formation of groundwater composition

Введение

При оценке взаимодействия в системе вода-порода ведущим фактором выступает характер водообмена, который во многом определяет формирование того или иного химического типа подземных вод. В частности, наличием замедленного водообмена С.Л. Шварцев объяснял почему в близких климатических и геолого-геоморфологических условиях одни воды достигают насыщения кальцитом и, соответственно, становятся гидрокарбонатными натриевыми (содовыми), а другие – нет [1]. Репрезентативным примером территорий, где в пределах небольшой площади широко распространены как гидрокарбонатные кальциевые или магниевые подземные воды, так и гидрокарбонатные натриевые (содовые) является юго-восток Забайкальского края. При этом в регионе хорошо прослеживается поэтапная сменяемость состава вод от $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ на самых высоких отметках рельефа (область питания) через $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ к $\text{HCO}_3\text{-Na}$ на самых низких отметках (область разгрузки) [2].

В рамках настоящей работы характер водообмена будет исследован на основе данных по содержанию трития (^3H) в подземных водах района Торейских озер юго-восточного Забайкалья, а также будет изучена связь «возраста» воды с её химическим типом. Тритий — это сверхтяжелый изотоп водорода, который используется в гидрогеологии для оценки времени пребывания («возраста») подземных вод в водоносных горизонтах [3; 4]. Это связано с тем, что ^3H не образуется в подземных водах, а поступает в зону аэрации только с атмосферными осадками, т. е. его количество уменьшается во времени строго в соответствии с уравнением радиоактивного распада. В то же время после ядерных испытаний 1952–1963, использование трития для определения абсолютного «возраста» может быть затруднено из-за поступления большого количества «бомбового» трития в атмосферу, что необходимо учитывать при гидрогеологических исследованиях [4].

Природные условия региона и методы исследования

Район исследований расположен на юго-востоке Забайкальского края, южная граница участка совпадает с государственной границей Россия-Монголия (Рис. 1). Территория пробоотбора окружает крупнейшие водные объекты региона – трансграничные озера Зун- и Барун-Торей (два водоема, соединенные протокой) и частично покрывает их водосборную площадь. Район характеризуется недостаточностью увлажнения, обилием солнечного света, островным распространением вечной мерзлоты [5]. Абсолютные отметки рельефа территории понижаются с севера на юг – в сторону наиболее крупных озер Зун и Барун-Торей (самая низкая отметка находится на дне озера Барун-Торей – 591.4 м н.у.м.), гидрохимические характеристики которых подвержены значительным гидрологическим изменениям. Причина таких изменений –

циклические колебания климатических условий, вызывающие периодическое наполнение и высыхание озер раз в 25-30 лет [6].



Рис. 1 Карта-схема района исследований с нанесением точек опробования.

Озера приурочены к межгорным впадинам и распределены как в центральных наиболее пониженных, так и в окраинных частях депрессий на месте сочленения склоновых отложений предгорий с поверхностными отложениями днищ впадин. Впадины заполнены современными осадочными отложениями, чаще всего представленными аллювиальными или озёрными песками, алевритами, галечниками и суглинками. Широкое распространение имеют осадочно-вулканогенные образования мела, представленные трахиандезибазальтами, туфами, алевролитами, песчаниками и т. д. [7].

В основу исследования легли данные по химическому составу и содержаниям трития 7 проб подземных вод – родники, колодцы и скважины глубиной до 70 м, отобранных совместно с учеными из ИПРЭК СО РАН (г. Чита) в 2021 г. и одной реки Ульдза, которая берет начало в Монголии. Макрокомпонентный состав воды определялся методами титриметрии, турбидиметрии, атомно-абсорбционной и пламенной атомно-эмиссионной спектрометрией и др. в аттестованной лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН (г. Чита). Все пробы отбирались в стерильные пластиковые или стеклянные тары, предварительно трижды промытые исследуемой водой. Быстроменяющиеся показатели (температура, pH, Eh) измеряли в полевых условиях с использованием универсального мультиметра AMTAST AMT03 (USA).

Содержания трития (³H) определялись в лаборатории Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (г. Владивосток) методом жидкосцинтилляционной спектрометрии на низкофоновом жидкосцинтилляционном счетчике QUANTULUS 1220 [8].

Расчеты активностей $[Ca^{2+}]$ и $[CO_3^{2-}]$ были выполнены в приложении для физико-химического моделирования Geochemist's Workbench, базирующимся на методе констант равновесий. В качестве входных данных использовались концентрации основных ионов (HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) для каждой точки опробования.

Результаты и их обсуждения

Подземные воды района исследований преимущественно гидрокарбонатные с пестрым катионным составом. Воды точек опробования 61G, 63G и 64G отобраны на самых высоких отметках (708-725 м) и являются пресными, их минерализация изменяется от 0,3 г/л до 0,5 г/л, pH – от 7,3 до 7,6. По составу все эти воды – HCO_3 Ca–Mg (по Щукареву). Соленость единственной точки опробования, для которой ведущим катионом является Mg^{2+} составляет 0,6 г/л, pH = 7,5. Подземные воды, отобранные на самых низких отметках (595-632 м) у Торейских озер (точки 67G, 68G, 69G), по химическому типу - HCO_3 Na–Ca и HCO_3 SO_4 –Na. Минерализация вод этой группы выше 1 г/л, максимум (1,7 г/л) фиксируется в скважине 68G у протоки между Торейями. pH также значительно выше и находится в пределах от 7,8 – 8,7. Река Ульза – пресная (0,45 г/л) и слабощелочная (pH=7,8), по химическому составу – HCO_3 Ca–Mg.

Концентрации трития в водах рассматриваемой территории изменяются в диапазоне от 1,7 ТЕ до 27,0 ТЕ, в основном это соответствует «возрасту» вод до 1952, т.е. до 70 лет. Из них 4 пробы воды с концентрациями 1,7-8,7 ТЕ являются смешенными с более возрастными водами.

Табл. 1 Содержание трития в подземных водах района исследований и в р. Ульдза.

Точка опробования	Химический тип воды	Высота, м	ТЕ	Точка опробования	Химический тип воды	Высота, м	ТЕ
61G	HCO_3 -Ca	717	12,1±0,8	67G	HCO_3 -Na	609	8,7±0,5
63G		708	27,8±1,6	68G		595	5,6±0,4
64G		725	16,7±0,9	69G		632	1,7±0,2
66G	HCO_3 -Mg-Na	649	2,3±0,2	9R(р. Ульдза)	HCO_3 -Ca-Mg	604	27,0±1,4

Зависимость концентраций трития от гипсометрического положения вод хорошо видна на рис. 2, где с уменьшением высоты и продвижением вод от областей питания в сторону озер ТЕ становится меньше, т.е. увеличивается «возраст» вод.



Рис. 2 Схема расположения точек отбора подземной воды в зависимости от абсолютной высоты и концентраций ^3H .

Содержания ^3H в водах рек определяется, главным образом, его концентрациями в атмосферных осадках, выпадающих на водосборную площадь [9]. Концентрация трития в основной реке, питающей Торейские озера, – Ульдзе, находится на уровне 27 ТЕ – значение является один из самых высоких среди изученных вод, т.е. вода имеет самый молодой «возраст». Эту величину можно принять условно за точку отчета в регионе, после которой ТЕ уменьшаются. Для датирования подземных вод различными авторами используются несколько моделей. В данной работе для приблизительных расчетов была использована формула (поршневая модель) [10]:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{C_0}{C} \right), \quad (1)$$

где t —«возраст» воды, λ —константа распада трития, равная $0,055 \text{ год}^{-1}$, C_0 —исходная концентрация трития в атмосферных осадках (в нашем случае – в реке Ульдза – 27,0 ТЕ), C —концентрация трития в подземных водах.

Таким образом, условный «возраст» подземной воды зоны активного водообмена находится в пределах от 17 до 40 лет, а замедленного > 57 лет.

Термодинамические расчеты в системе вода-порода показали, что формирование HCO_3 -Ca подземных вод, которые характеризуются наиболее высокими показателями по ^3H (12 – 28 ТЕ), и следовательно, наименее продолжительным временем нахождения в водоносной толще (до 40 лет), проходит в условиях ненасыщенности к кальциту (Рис. 3).

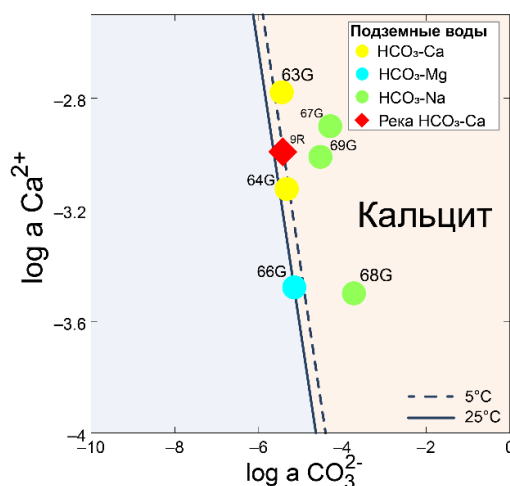


Рис. 3 Равновесие исследуемых природных вод с кальцитом при 5 °C и 25 °C и 1 атм.

В то время как HCO_3 -Na воды имеют концентрации трития 1,7–8,7 ТЕ и, соответственно, более длительно взаимодействуют с минералами вмещающих пород. Это приводит к тому, что с ростом времени взаимодействия системе вода-порода до 50 лет и выше, устанавливается равновесие с кальцитом. Это хорошо согласуется с концепцией содообразования

С.Л. Шварцева [1], согласно которой, для накопления соды необходимо большее время взаимодействия вод с вмещающими породами.

Заключение

Таким образом, замкнутый характер Торейской впадины и полуаридный климат способствуют росту времени взаимодействия исследуемых подземных вод со вмещающими породами в направлении от горного обрамления (область питания) в сторону озерной котловины (область разгрузки). Данные по тритию показали, что в зоне активного водообмена значения ^3H находятся в интервале от 12 до 28 ТЕ, что соответствует условному «возрасту» подземных вод до 40 лет. При этом воды области питания по составу являются – $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Зона замедленного водообмена начинается примерно с концентраций $^3\text{H} \sim 10$ ТЕ, после чего значения продолжают уменьшаться (от 8,7 до 1,7 ТЕ) с увеличением «возраста» воды. Термодинамические расчеты установили, что подземные воды достигают равновесия к кальциту примерно после 50 лет взаимодействия системы вода-порода. После чего Na^+ начинает интенсивно аккумулироваться в водах, а концентрации Ca^{2+} начинают падать, что приводит к смене $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ типа подземных вод области питания на $\text{HCO}_3\text{-Na}$ (содовый) в зоне замедленного водообмена у Торейской котловины. В будущем полученные результаты будут дополнены и доработаны на основе уточняющих расчётов по количеству трития в атмосферных осадках региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ (№ 22-17-00035).

Список литературы

1. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М: Недра, 1998. 288 с.
2. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: A case study from south-eastern Transbaikal region (Russia) // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 123. p. 1-16.
3. Sprenger M. et al. The Demographics of Water: A Review of Water Ages in the Critical Zone // Reviews of Geophysics. Blackwell Publishing Ltd. 2019. Vol. 57, № 3. P. 800–834.
4. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М: Научный Мир, 2009. 632 с.
5. Давыдова Н.Д. Изменения в компонентах степных геосистем Юго-восточного Забайкалья в условиях потепления климата // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28, № 90. P. 3–10.
6. Обязов В.А., Кирилюк В.Е., Кирилюк А.В. Торейские озера как индикатор многолетних изменений увлажненности Юго-восточного Забайкалья и Северо-восточной Монголии // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3, № 3. С. 204–232.
7. Borzenko S. V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // Applied Geochemistry. Elsevier, 2019. Vol. 103. P. 72–84.
8. Lebedeva L.S. et al. Tritium in Natural Water of the Lena River Basin // Geography and Natural Resources. Pleiades journals, 2022. Vol. 43, № 1. P. 32–39.
9. Вакуловский С.М., Катрич И.Ю. Тритий в водных объектах на территории России в 1975-2012 годах // АНРИ. 2013. № 3(74). С. 38–42.

10. Романов В.В. и др. Тритий в водах Плещеева озера и подземных водах Переяславльского водозабора // Исследования природных вод изотопными методами / Ферронский В.И. М: Наука, 1981. С. 79–84.

УДК 556.33, 550.42

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД РАЙОНА ЗВЕНИГОРОДСКОЙ ПРАКТИКИ

А.В. Ермаков^{1,2}

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Геологический институт РАН, Москва, Россия, E-mail: ermakov@ginras.ru

Аннотация

Впервые для территории Звенигородской практики определены изотопные отношения кислорода и водорода в атмосферных осадках, поверхностных и подземных водах. Полученные результаты позволили определить характеристики разных типов водных объектов, проследить их взаимодействие и сезонные изменения изотопного состава.

Ключевые слова: изотопный состав кислорода и водорода, подземные воды, поверхностные воды, атмосферные осадки

STABLE ISOTOPES IN GROUNDWATER AND SURFACE WATER OF ZVENIGOROD FIELD PRACTICE SITE

A.V. Ermakov^{1,2}

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation

²Geological Institute RAS, Moscow, Russian Federation, E-mail: ermakov@ginras.ru

Abstract

For the first time, for the territory of the Zvenigorod practice, the isotopic ratios of oxygen and hydrogen in atmospheric precipitation, surface and ground waters were determined. The results obtained made it possible to determine the characteristics of different types of water bodies, to trace their interaction and seasonal changes in the isotopic composition.

Key Words: stable isotopes, groundwater, surface water, atmospheric precipitation

Введение

Звенигородская биологическая станция (ЗБС) им. С.Н. Скадовского расположена на правом берегу р. Москва к юго-западу от г. Звенигород. С 1973 г. на территории биостанции проводится гидрогеологическая практика (как часть общей практики гидрогеологов, геокриологов, инженер-геологов и геоэкологов). На гидрогеологическом опытном полигоне практики имеется несколько кустов скважин, в ходе маршрутной съемки изучаются

поверхностные водоемы и водотоки, колодцы. В разрезе выделяются несколько грунтовых водоносных горизонтов (два – в аллювиальных отложениях террас и поймы, и один во флювиогляциальных отложениях водораздела) и один межпластовый – в подольско-мячковских известняках среднего карбона. Задачи по полевым методам исследований в основном сконцентрированы на изучении подольско-мячковского и серебрянноторского горизонтов, но проводится гидрогеохимическое опробование всех водных объектов, что позволяет охарактеризовать условия формирования подземных вод на территории практики. Изучение изотопного состава подземных и поверхностных вод предпринято как для введения этого метода исследований в объем практики, так и для получения более полных представлений об условиях формирования и взаимодействия подземных и поверхностных вод.

Массовый отбор проб на исследование стабильных изотопов был проведен в июне 2022 г. (Рис. 1); кроме площадного опробования были отобраны образцы во время проведения задачи кустовая откачка продолжительностью одни сутки. Также начиная с февраля 2022 г. В нерегулярном режиме отбирались пробы из подольско-мячковского водоносного горизонта (ВГ). Последующий отбор проб выполнен в январе и мае 2023 г. Всего было исследовано 81 проба из 26 водопроявлений и 8 проб атмосферных осадков.

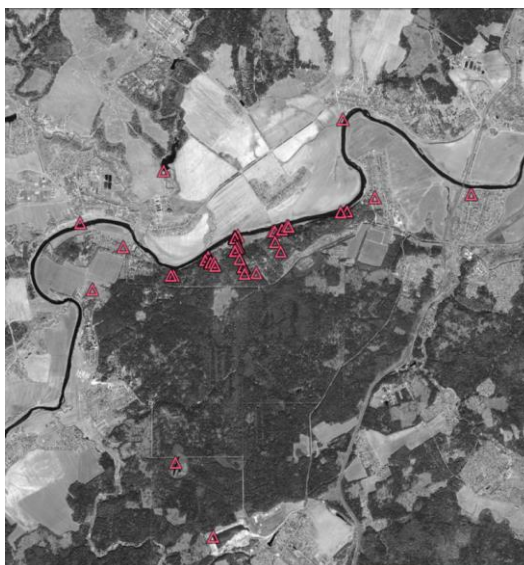


Рис. 1 Спутниковый снимок района Звенигородской практики. Треугольниками показаны точки отбора проб.

Методы исследований

Изотопный состав определялся на анализаторе Picarro L2140i в лаборатории тепломассопереноса Геологического института РАН. Его работа основана на методе CRDS (Cavity Ring Down Spectroscopy – лазерная спектроскопия по затуханию света с кольцевой многоходовой кюветой). CRDS основан на измерении времени затухания излучения в ячейке (кювете) с тремя высокоотражающими зеркалами при многократном прохождении света между

ними. Анализатор Picarro отличается одновременным измерением $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и ^{17}O -excess в пробах воды, высокой точностью и воспроизводимостью результатов измерений (лучше 15 per meg / 0,015‰ для $\delta^{17}\text{O}$ -excess). При регулярных калибровках стандартами воды с известным изотопным составом достигается воспроизводимость лучше 10 per meg (0,01‰).

В состав анализатора входит автосэмплер, с помощью которого в измерительную ячейку можно многократно вводить жидкую пробу объемом от долей до нескольких микролитров. Обычно анализируется проба воды объемом 2 мкл. Необходимый объем образца для анализа может составлять от 300 мкл до 2 мл.

Измерение состоит из серии определений (как правило, 10 для одного образца; точность в 0,02‰ для $\delta^{18}\text{O}$ достигается за 6 введений пробы). Вместе с образцами последовательно анализируются стандарты, откалиброванные относительно VSMOW. Вода вводится в испаритель, откуда в виде водяного пара поступает в анализатор.

Изотопный состав выражается как отношение D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$. В качестве эталона используется отношение $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и D/H для осредненного состава океанической воды (VSMOW, Vienna Standard Mean Ocean Water). Для всех остальных объектов изучения определяется отклонение от стандарта VSMOW в промилле – $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$.

В ГИН РАН используются стандарты USGS-46, USGS-47, USGS-48, а также внутренние лабораторные стандарты БРЗ-21, Ф-21 и М-21, что позволяет определять изотопные отношения в диапазоне -235,8 – 1,5 ‰ для $\delta^2\text{H}$ и -29,8 – 0,49 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$.

Все опробованные объекты были разделены на шесть типов: напорные воды, грунтовые воды, поверхностные воды, р. Москва, зимние осадки, летние осадки. Напорные воды опробованы в скважинах, располагающихся, в основном, в пределах поймы и первой надпойменной террасы р. Москвы. К грунтовым водам отнесены воды источников, колодцев, а также ручьев на бортах долины реки, питающихся за счет разгрузки грунтовых ВГ. Поверхностные воды включают верховое и низинное болота, техногенные выработки – пруды и карьер. Река Москва выделена в отдельный тип т.к. в отличие от других поверхностных вод имеет преимущественно снеговое питание, а также в значительной мере определяет гидрогеодинамический режим четвертичного и подольско-мячковского ВГ вблизи русла, где находится значительное число опробованных объектов.

Результаты и их обсуждения

Обобщенные характеристики выделенных типов водных объектов приведены в табл. 1. Изотопные отношения грунтовых, напорных вод и р. Москвы располагаются в компактной области между -13 – -11 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -90 – -83 ‰ для $\delta^2\text{H}$. Поверхностные воды и осадки демонстрируют существенно больший разброс значений (Рис. 2). Изотопные отношения подземных вод и р. Москвы подтверждают преобладающий вклад снегового питания;

одна из точек зимних осадков – ледяная корка на поверхности старого снега – имеет значения, располагающиеся в области напорных вод, характеризуя утяжеление состава зимних осадков в процессе снеготаяния. Линия испарения поверхностных вод имеет вид $\delta^2\text{H} = 4,42 \cdot \delta^{18}\text{O} - 33,13$; $R^2 = 0,99$ ($n = 7$). По-видимому, только для самых крупных водоемов (болото Сима, Нижнее Луцинское болото, Шараповский карьер) преобладает испарение с водной поверхности, но значительную роль играет и смешение разновременных выпадений летних осадков, в противном случае такой уклон линии тренда отвечал бы условиям влажности воздуха 50 % и ниже [1], что не соответствует условиям Подмоскovie. Для прудов утяжелению состава в некоторой степени способствует и почвенное испарение, а также транспирация, которые изменяют состав питающих их грунтовых вод.

Табл. 1 Изотопные отношения основных типов водных объектов района ЗБС.

Тип	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	SD, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	SD, ‰
Напорные воды	-12,6	0,18	-89,5	1,29
Грунтовые воды	-11,9	0,30	-84,5	1,87
Поверхностные воды	-10,2	2,13	-77,3	8,84
р Москва	-11,7	0,32	-85,1	1,80
Зимние осадки	-16,5	4,97	-121,7	38,37
Летние осадки	-6,4	3,24	-45,9	19,74

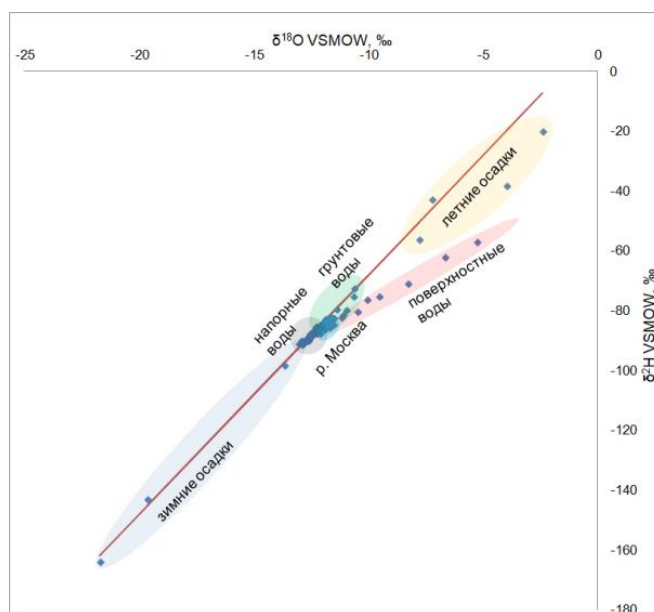


Рис. 2 Изотопная диаграмма состава поверхностных и подземных вод района практики. Точками показаны отдельные значения, областями с заливкой – пределы изменения изотопных отношений для разных типов объектов. Линией показана локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) для г. Москвы по [2].

Изотопный состав атмосферных осадков варьируется в широких пределах, отражая сезонность условий их выпадения и различные источники поступления воздушных масс. По данным [2], исследовавших изотопный состав атмосферных осадков выпадавших в Москве в 2017-2018 гг. источниками поступления атмосферных осадков в Московском регионе являются (в порядке убывания): Черное море и внутриконтинентальные области к югу от Москвы, Средиземное море и внутренние области Европы, Северная Атлантика, Атлантический океан на 40-45° с.ш., Баренцево и Карское моря, Северное и Норвежское моря. Локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) по всем исследованным образцам имеет вид $\delta^2\text{H} = 7,83 \cdot \delta^{18}\text{O} + 8,7$; $R^2 = 0,98$. Линия, построенная по среднемесячным взвешенным значениям с учетом количества выпадений, имеет вид: $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 11,74$; $R^2 = 0,99$.

Уравнение линии тренда, полученное для атмосферных осадков, грунтовых и напорных вод района ЗБС, имеет вид $\delta^2\text{H} = 7,22 \cdot \delta^{18}\text{O} + 1,59$; $R^2 = 0,98$. Однако для оценки сезонной изменчивости изотопного состава грунтовых и напорных вод нами было использовано выражение локальной линии метеорных вод Ю.К. Васильчука с соавторами, исходя из следующих соображений. Уравнение линии тренда для зимних осадков на ЗБС имеет вид $\delta^2\text{H} = 8,02 \cdot \delta^{18}\text{O} + 11,74$; $R^2 = 0,99$ ($n = 4$), что в пределах погрешности совпадает с указанным выше уравнением ЛЛМВ по среднемесячным взвешенным значениям. Если принять, что изотопный состав подземных вод отражает преобладание снегового питания, расположенные справа от ЛЛМВ точки будут отвечать преобразованным водам. Также необходимо отметить, что полученное в работе [2] уравнение ЛЛМВ близко к уравнению глобальной линии метеорных вод, в отличие от исследований, проводившихся в 1970-1979 и 2005-2014 гг. [3], что вероятно отражает современные изменения условий атмосферной циркуляции в Московском регионе.

Сезонное изменение изотопного состава прослежено путем построения траекторий для отдельных объектов (Рис. 3). Воды прудов характеризуются облегчением состава зимой из-за сокращения питания осадками и увеличения доли грунтового питания, и утяжелением летом вследствие испарения с водной поверхности и транспирации. Зимние значения лежат ближе всего к ЛЛМВ. Грунтовые и напорные воды, напротив, утяжеляются зимой и облегчаются летом, при этом изменения происходят вдоль ЛЛМВ, в абсолютных значениях не превышая 1-2 ‰ по $\delta^2\text{H}$.

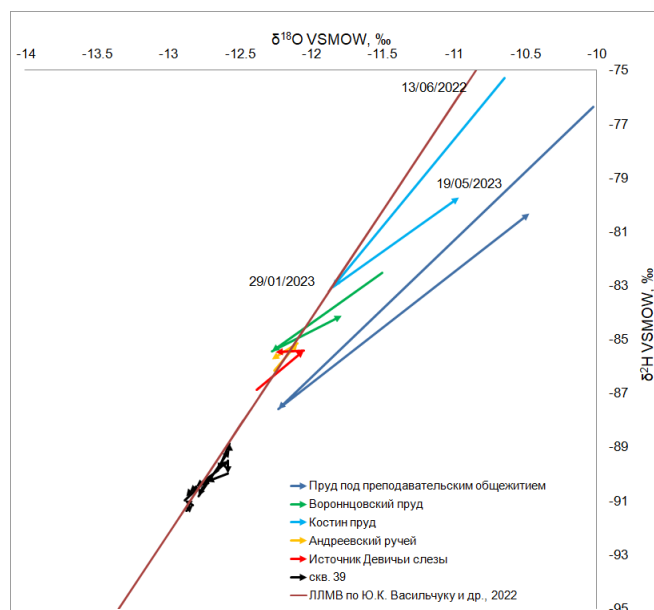


Рис. 3 Эволюция изотопного состава в напорных, грунтовых и поверхностных водах района ЗБС. Для скв. 39 нанесены данные режимных наблюдений 2022-2023 гг., для остальных объектов даты отбора проб идентичны.

Заключение

Проведенный анализ состава водных объектов района Звенигородской практики показал эффективность использования изотопного метода для выяснения условий формирования различных типов вод. Полученные результаты могут быть использованы для введения изотопно-геохимических исследований в программу практики в виде самостоятельной задачи или дополнения к задаче «Гидрогеохимическое опробование». В районе ЗБС исследования стабильных изотопов в подземных и поверхностных водах проведены впервые; полученные результаты будут использованы в последующих экспериментальных работах на гидрогеологическом полигоне.

Благодарности: Автор благодарит за помощь в отборе проб сотрудников кафедры гидрогеологии Обозного В.Н., Лехова В.А., Сорокоумову Я.В., Гриневского С.О., Самарцева В.Н.

Список литературы

1. Gonfiantini R., Environmental isotopes in lake studies. In: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry (eds. Fritz, P. and Fontes, J. – Ch.), B. Elsevier, Amsterdam, vol. 2, The Terrestrial Environment, pp. 113-168, 1986.
2. Vasil'chuk Y., Chizhova J., Budantseva N., Vystavna Y. Stable isotope composition of precipitation events revealed modern climate variability. Theor Appl Climatol 147, pp. 1649–1661, 2022.
3. Zykin N., Tokarev I., Vinograd N. Monitoring of stable isotopes ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) in precipitations of Moscow city (Russia): comparison for 2005–2014 and 1970–1979 periods. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 66. 4, pp. 723-733. 2021.

УДК 579.68

ТЕНЬ МИНУВШЕГО: АНАЛОГИ ДРЕВНИХ БИОЦЕНОЗОВ ЗЕМЛИ В ЕССЕНТУКСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Д.Г. Заварзина*¹, А.А. Маслов², А.Ю. Merkel¹, Н.А. Харитонов², А.А. Ключкина¹,
Е.И. Барановская², Е.А. Байдарико², Н.А. Черных¹, С.Н. Гаврилов¹

¹Институт Микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия, E-mail:
zavarzinatwo@mail.ru

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия,
E-mail: maa20070@yandex.ru

Аннотация

Микробные сообщества, населяющие верхнюю часть литосферы, в частности, водоносные горизонты, представляют большой интерес для микробиологов из-за стабильности и изолированности подземной биосферы по сравнению с поверхностными экосистемами. Нами были проведены исследования микробных сообществ, населяющих три водоносных горизонта 30-километрового участка Ессентукского месторождения минеральных вод, вскрытых шестью скважинами, специально оборудованными для добычи и розлива вод, предназначенных для бальнеолечения. Комплексные исследования, проведенные молекулярными и классическими микробиологическими методами, подкрепленные гидрогеологическими и гидрохимическими данными, выявили существенные различия в филогенетическом и метаболическом составе микробных сообществ разных водоносных горизонтов. Последовательные изменения доминирующих метаболических групп прокариот, прослеживающиеся от фундамента к области питания, неожиданно нашли аналогии с тремя критическими этапами в истории биосферы Земли, а именно: термальной экосистемой, основанной на гидрогенотрофном ацетогенезе, характерной для самых ранних этапов развития биосферы; этапом накопления железисто-кремнистых формаций докембрия, характеризующегося развитием микробных сообществ, осуществляющих анаэробную циклическую трансформацию железа и углекислого газа; периодом кислородной катастрофы (2,2-2,4 млрд. лет), характеризующимся развитием факультативных анаэробов и сульфатредукторов, появившихся благодаря накоплению кислорода в атмосфере и сульфатов в гидросфере. Установлена тесная связь геологических, гидродинамических, гидрохимических и микробиологических процессов, оказывающих прямое влияние на формирование и состав бальнеологически ценных минеральных вод типа Ессентуки № 4 и Ессентуки № 17.

Ключевые слова: Ессентукское месторождение минеральных вод, континентальная подземная биосфера, анаэробные микробные сообщества, ацетогенез, анаэробный цикл железа

SHADOWS OF THE PAST: ANALOGUES OF THE EARTH'S ANCIENT BIOCEANOSES AT THE ESSENTUKI MINERAL WATER BASIN

D.G. Zavarzina*¹, A.A. Maslov², A.Y. Merkel¹, N.A. Kharitonova², A.A. Klyukina¹,
E.I. Baranovskaya², E.A. Baydariko², N.A. Chernyh¹, S.N. Gavrilov¹

¹Winogradsky Institute of Microbiology, Federal Research Center of Biotechnology, RAS, Moscow, Russian Federation

E-mail: zavarzinatwo@mail.ru

²Department of Geology, Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: maa20070@yandex.ru

Abstract

Microbial communities inhabiting the upper part of the lithosphere, in particular, aquifers, are of great interest for microbiologists because of the stability and isolation of the subsurface biosphere compared to surface ecosystems. We have performed investigations of microbial communities inhabiting three aquifers of the 30-km section of the Essentuki mineral water basin, penetrated by six wells, specially equipped for the extraction and bottling of water intended for balneotherapy. Complex studies carried out by molecular and classical microbiological methods, supported by hydrogeological and hydrochemical data revealed significant differences in the phylogenetic and metabolic composition of microbial communities of different aquifers. The successive changes in the dominant metabolic groups of prokaryotes, traced from the basement to the recharge area, unexpectedly found analogies with three critical periods in the history of the Earth's biosphere, namely: the thermal ecosystem based on hydrogenotrophic acetogenesis, characteristic of the earliest stages of biosphere development; the period banded iron formations accumulation, characterized by the development of microbial communities performing anaerobic cyclic transformation of iron and carbon dioxide; the period of the Great Oxidation Event (2-2.4 Ga), characterized by the development of facultative anaerobes and sulfate reducers that appeared due to the accumulation of oxygen in the atmosphere and sulfate in the hydrosphere. Established a close relationship geological, hydrodynamic, hydrochemical and microbiological processes that have a direct impact on the formation and composition of balneologically valuable mineral water type Essentuki № 4 and Essentuki № 17.

Key Words: Essentuki mineral water basin, continental subsurface biosphere, anaerobic microbial community, acetogenesis, anaerobic iron cycle

Введение

Подземная континентальная биосфера, содержащая по современным оценкам до 19% всей биомассы планеты [1], является наиболее стабильной, консервативной и медленно эволюционирующей частью биосферы и, таким образом, представляет своеобразный

заповедник экосистем, воспроизводящих различные этапы истории биосферы Земли, состоящих почти исключительно из прокариот.

Уникальность Ессентукского месторождения минеральных вод (ЕММВ) в контексте исследований микробных сообществ подземной биосферы заключается в том, что оно имеет много общих черт с ранними этапами развития континентов. Это - близость PR-PZ кристаллического фундамента, наличие лакколитов, внедренных во всю толщу маломощных осадочных отложений, большое количество тектонических нарушений, действующих как хорошо проницаемые каналы, и, наконец, большое разнообразие различных типов минеральных и пресных вод, встречающихся на небольшой территории [2].

В рамках переоценки запасов ЕММВ, нами были проведены комплексные микробиологические исследования трех водоносных горизонтов, расположенных в пределах верхнеюрских ($J_3^{tt}-K_1^v$), нижнемеловых ($K_{1a}-al_1$) и верхнемеловых ($K_{2s}-m$) осадочных пород, посредством отбора воды из 6 скважин, оборудованных для добычи и розлива бальнеологически ценных вод типа Ессентуки №4 и Ессентуки №17.

Методы исследований

Отбор проб из скважин №70, 46, 49-Е, 71 ($K_{2s}-m$), 9 ($K_{1a}-al_1$) и 75-бис ($J_3^{tt}-K_1^v$) проводился трижды с интервалом от месяца до 2 лет. В работе были использованы молекулярные методы – определение филогенетического и метаболического разнообразия микробных сообществ на основе анализа библиотек ампликонов гена 16S рРНК и полногеномных данных, полученных из тотальной ДНК, выделенной непосредственно из воды. Микробные сообщества исследовались классическими микробиологическими методами путем получения накопительных и чистых культур целевых метаболических групп прокариот. В дополнение к микробиологическим данным были использованы статистические методы оценки бета-разнообразия сообществ. С помощью жидкостной ионной хроматографии и масс-спектрометрии был определен основной ионный состав и микроэлементный состав вод; свободная газовая фаза исследовалась хроматографически. Изотопные исследования проводились с помощью масс-спектрометрии.

Результаты и их обсуждения

Воды исследованных скважин отличались по химическому, газовому составам, температуре и разделялись на 4 группы:

- Скважина 70, расположенная в зона питания ЕММВ, вскрывающая $K_{2s}-m$ горизонт на участке, где он имеет непосредственную связь с дневной поверхностью, с выраженным влиянием современных климатических, геоморфологических и геологических процессов, добывает пресные (0,4 г/л), холодные (20 °С),

оксигенированные, негазированные, слабощелочные (pH 8,5) бикарбонатные воды типа Na-HCO₃.

- Скважины 46, 49-Е, 71, расположенные ниже по потоку, вскрывают тот же водоносный горизонт в зоне относительно пониженных скоростей фильтрации, изолированной от дневной поверхности, но имеющей связь с фундаментом. Термальные (35-42 °С) восстановленные нейтральные (pH 6,6-6,8) газонасыщенные воды Na-HCO₃-Cl типа, характеризуются газовым фактором 1,5 м³/м³ и относятся к бальнеологически ценным водам типа Ессентуки №4 и Ессентуки №17 с минерализацией (6,8-9,5 г/л). Свободная газовая фаза состоит в основном из CO₂ с примесью N₂ и CH₄.
- Скважина 9 также расположена в области транзита и характеризуется высокой проницаемостью вскрываемых ею нижнемеловых пород, что способствует более быстрому проникновению метеорной воды по сравнению с вышележащим верхнемеловым водоносным горизонтом, вследствие чего воды этого участка водоносного горизонта K_{1a}-al₁ являются пресными (0,4 г/л), теплыми (22 °С), нейтральными (pH 6,5), негазированными типа Ca-Na-Cl-SO₄-HCO₃, содержащими растворенный кислород.
- Скважина 75-бис, вскрывающая водоносный горизонт J_{3tt}-K_{1v}, залегающий непосредственно на фундаменте и тесно с ним связанный, характеризуется термически восстановленными газонасыщенными водами типа Na-Ca-HCO₃-Cl-SO₄ с газовым фактором 16 м³/м³ и минерализацией до 5,7 г/л. Свободная газовая фаза почти исключительно состоит из CO₂.

Пробы для микробиологического анализа из каждой скважины отбирались через разные промежутки времени, не менее трех раз, в течение трех лет. Профилирование участков гена 16S рРНК выявило разнообразные микробные сообщества во всех исследованных скважинах. Сообщества зоны питания водоносного горизонта K_{2s}-m, а также горизонтов K_{1a}-al₁ и J_{3tt}-K_{1v}, содержали только бактерии, в то время как образцы из трех скважин погруженной части горизонта K_{2s}-m характеризовались относительно высоким содержанием архей (Рис. 1). Анализ состава сообществ показал снижение разнообразия как с глубиной, так и по падению водоносного горизонта K_{2s}-m, а также преобладание некультивируемых групп прокариот почти во всех сообществах. Сообщества из скважин 46, 49-Е, 71 содержали большое число общих таксонов, в то время как сообщества вод, добытых из скважин 70, 9 и 75-бис, не содержали общих филотипов. Состав сообществ отличался высокой стабильностью. Расчеты бета-разнообразия выявили разделение проанализированных микробных сообществ на 4 группы, коррелирующими с четырьмя типами вод.

Полногеномные последовательности, использованные для анализа метаболических путей, выявили важные закономерности, устанавливающие связь ведущих метаболических групп микробных сообществ с гидрохимическими и геологическими факторами. Так, сообщество залегающего на фундаменте водоносного горизонта J₃tt-K₁v₂ на 90% было представлено филотипом, близким к недавно описанной *Aceticella autotrophica* (Frolov et al., 2023); термофильной анаэробной ацетогенной бактерии, получающей энергию за счет реакции: $4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$.

Близкие по составу микробные сообщества скважин №46, 49-Е и 71 были представлены исключительно термофильными анаэробными высокоспециализированными микроорганизмами, получающими энергию в основном за счет преобразования минералов железа или соединений серы. Существенную часть сообщества составляли метаногенные археи, осуществляющие реакцию: $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Поиск целевых метаболических групп, проведенный методами классической микробиологии, подтвердил данные метагеномного анализа.

Микробное сообщество участка водоносного горизонта K_{1a}-al₁, вскрываемого скважиной 9, было представлено на 75% тремя филотипами, характеризующимися широкими метаболическими возможностями. Это были мезофильные или умеренно-термофильные факультативные анаэробы, развивающиеся, как за счет анаэробного брожения, так и за счет хемоорганотрофного роста с использованием в качестве акцепторов электронов соединений железа, сульфата и кислорода.

Микробное сообщество участка водоносного горизонта K₂s-m₂ в области питания, вскрываемого скважиной 70, характеризовалось не только максимальным таксономическим разнообразием, но и максимальным разнообразием метаболических реакций, осуществляемых населяющими этот участок бактериями. Среди них были обнаружены аэробы, факультативные анаэробы, способные к брожению, а также восстановлению соединений железа, серы в частности, сульфата, нитрата и кислорода.

Структура четырех выявленных экосистем ЕММВ определяется сочетанием физико-химических факторов, воздействие которых в течении тысяч лет способствовало формированию нескольких отдельных микробных сообществ, метаболические свойства которых неожиданно ярко отражают три этапа в истории развития биосферы Земли. Условия самого глубокого, водоносного горизонта J₃tt-K₁v сочетающие высокий газовый фактор ($16 \text{ м}^3/\text{м}^3$), повышенные давление и температуру, по сути, означающие, что вода в этом участке представляет собой раствор угольной кислоты, оказались идеальными для развития гидрогенотрофных ацетогенов. Эта метаболическая группа прокариот рассматривается микробиологами, как самая древняя, на основе исследования метаболических возможностей предполагаемого общего предка прокариот (last universal common ancestor (LUCA)) [3]. Наши исследования выявили условия, в которых

водородотрофный ацетогенез является ведущим процессом первичной продукции органического вещества. Погруженная часть водоносного горизонта K₂S-m с высоким содержанием CO₂ в свободной газовой фазе и наличием железосодержащих минералов, сформировала микробное сообщество с преобладанием автотрофных метаногенных архей и прокариот, осуществляющих циклическую трансформацию соединений железа и серы, схожие с предполагаемой структурой микробных сообществ, жизнедеятельность которых способствовала накоплению железистых формаций докембрия [4]. Исследованный участок водоносного горизонта K_{1a}-a₁, имеющего связь с дневной поверхностью, населен микроорганизмами-универсалами, появление которых было обусловлено накоплением кислорода в атмосфере и сульфатов в гидросфере во время кислородной катастрофы 2,3-2,0 млрд. лет назад [5].

Заключение

Показано, что для исследованных участков ЕММВ геологические, гидрохимические и гидродинамические условия водовмещающих отложений оказывают решающее влияние на состав и структуру населяющих их микробных сообществ. Подземные экосистемы ЕММВ стратифицированы и отличаются друг от друга преобладающими веществами, используемыми прокариотами для энергетического метаболизма. Выявленные микробные сообщества, представляющие собой "тень прошлого", действуют одновременно в пределах одного интенсивно эксплуатируемого месторождения и способствуют формированию нескольких типов питьевых вод, бальнеологический эффект которых в существенной степени определяется аутигенной микрофлорой.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 21-14-00333.

Список литературы

1. Magnabosco C., Lin L.H., Dong H., Bomberg M., Ghiorse W., Stan-Lotter H., Pedersen K., Kieft T. L., van Heerden E., Onstott T.C. The biomass and biodiversity of the continental subsurface. // *Nature Geoscience*. 2018. № 11, pp. 707–717.
2. Fillimonova E., Kharitonova N., Baranovskaya E., Maslov A., Aseeva A. Geochemistry and therapeutic properties of Caucasian mineral waters: a review. // *Environ. Geochem. Health*. 2022. №44, pp. 2281–2299.
3. Weiss M.C., Preiner M., Xavier, J.C., Zimorski V., Martin, W.F. The last universal common ancestor between ancient Earth chemistry and the onset of genetics. // *PLoS Genet*. 2018. 14.
4. Posth N.R., Inga Köhler I., Swanner E.D., Schröder C., Wellmann E., Binder B., Konhauser K.O., Udo Neumann U., Berthold C., Nowak M., Kappler A. Simulating Precambrian banded iron formation diagenesis. // *Chem. Geol*. 2013. № 362, pp. 66-73.
5. Olejarz J., Iwasa Y., Knoll A.H., Nowak M.A. The Great Oxygenation Event as a consequence of ecological dynamics modulated by planetary change. // *Nat. Commun*. 2021. № 12, 3985.

УДК 556.314

ГРУППОВОЙ СОСТАВ РАСТВОРЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

И.С. Иванова*¹, Ю.В. Колубаева¹, Н.А. Волкова¹

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, Россия, E-mail: IvanovaIS_1986@mail.ru

Аннотация

Природные воды нефтегазодобывающих районов Западной Сибири обогащены растворенными органическими веществами, содержание которых уменьшается в ряду от озер к основным водосборным рекам. Растворенные органические вещества в водах бассейнов рек Таз и Пур, в основном, представлены гидрофильными низкомолекулярными алифатическими соединениями, в водах бассейнов рек Надым и Обь преобладают гидрофобные высокомолекулярные ароматические соединения. В природных водах, относящихся к водосборному бассейну р. Таз, установлены максимальные концентрации органических соединений биогенного происхождения, источником которых является торф. О присутствии в природных водах нефти, или нефтепродуктов однозначно свидетельствуют гопаны, наличие которых установлено в водах бассейнов рек Надым и Обь, а также циклогексаны, обнаруженные в водах бассейна р. Пур. Нефтяные углеводороды в максимальном количестве присутствуют в водах рек Надым, Пур. Максимальное содержание алканов, происхождение которых может быть связано, как нефтью, так и с растительностью, обнаружены в водах бассейнов рек Таз и Пур. В малых реках и озерах водосборных бассейнов рек Таз и Пур в максимальных количествах присутствуют соединения растительного генезиса – олеанены и урсены; в водах термокарстового озера преобладающими являются гопены и тараксерены, указывающие на биогенное происхождение органических соединений.

Ключевые слова: Арктика, природные воды, растворенное органическое вещество, загрязнение

COMPOSITION OF DISSOLVED ORGANIC MATTER IN NATURAL WATERS IN THE OIL AND GAS PRODUCING REGION OF WESTERN SIBERIA

I.S. Ivanova*¹, Yu.V. Kolubaeva¹, N.A. Volkova¹

¹Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russian Federation., E-mail: IvanovaIS_1986@mail.ru

Abstract

The natural waters of the oil and gas producing region of Western Siberia are enriched by dissolved organic matter, the content of which decreases from the lakes to the main catchment rivers. Dissolved organic matter in waters of the Taz and Pur Rivers basins is mainly represented by hydrophilic low-molecular-weight aliphatic compounds; in waters of the Nadym and Ob Rivers basins hydrophobic high-molecular-weight aromatic compounds predominate. The maximum concentrations of organic compounds of biogenic origin, the source of which is peat, are identified in the natural waters of the catchment area of the Taz River. The presence of oil or petroleum products in natural waters is unequivocally confirmed by gopanes identified in waters of the Nadym and Ob Rivers basins, as well as cyclohexane's identified in waters of the Pur river basin. The maximum content of alkanes, the origin of which may be either oil or plant, is found in the waters of the Taz and Pur Rivers basins. In small rivers and lakes of catchments of the Taz and Pur Rivers, compounds of plant origin - oleans and ursens - are present in maximum quantities; in the waters of thermokarst lake gopens and taraxerenes are predominant, indicating the biogenic origin of organic compounds.

Key Words: Arctic, natural waters, dissolved organic matter, pollution

Введение

Вода является одним из основных ресурсов, необходимых для жизни Человека, так как доступ к питьевым водам надлежащего качества является важным социальным аспектом, влияющем на здоровье населения. Территория Западной Сибири характеризуется огромными запасами водных ресурсов, экологическое состояние которых до последнего времени не вызывало тревогу. Однако, природные факторы, происходящие климатические изменения и интенсивная хозяйственная деятельность человека приводят к быстрому нарушению легко уязвимых экосистем в северных широтах Западной Сибири. В условиях потепления климата деградация вечной мерзлоты способствует выводу органического вещества из торфа в воды, что влечет за собой не только закисление природных вод, но и накопление в водах таких элементов как железо, марганец, тяжелые металлы, редкоземельные элементы, постепенно изменяя гидрогеохимический облик обширной территории от южной тайги до Арктики [2]. С другой стороны, возрастающая антропогенная деятельность, связанная с развитием нефтегазового комплекса, также оказывает влияние на экологическое состояние водных ресурсов. Проведенные ранее исследования показывают, что на нефтедобывающих территориях речные загрязнены фенолами нефтяными углеводородами [1], многие из которых токсичны и являются канцерогенами, оказывающими негативное воздействие на живые организмы.

Целью данной работы было изучение распределения растворенного органического вещества (РОВ) и выявление особенностей его группового состава в природных водах арктических территорий Западной Сибири, поскольку органическое вещество является одним

из основных поллютантов, оказывающих влияние на химический состав природных вод на территории крупнейшего нефтегазодобывающего региона России – Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО).

Методы исследований

В основу данной работы положены материалы, полученные сотрудниками ТФ ИНГГ СО РАН в 2020 и 2021 гг. В результате экспедиционных работ было отобрано 21 проба природных вод, из них: 3 – озерных, 11 – речных и 7 проб подземных вод, залегающих на глубинах от 23 до 180 м (Рис. 1). Водные объекты опробовались по направлению движения поверхностного стока в системе «озеро – малая река – главная река» в пределах водосборных бассейнов основных рек ЯНАО, дополнительно, по возможности, отбирались пробы подземных вод.

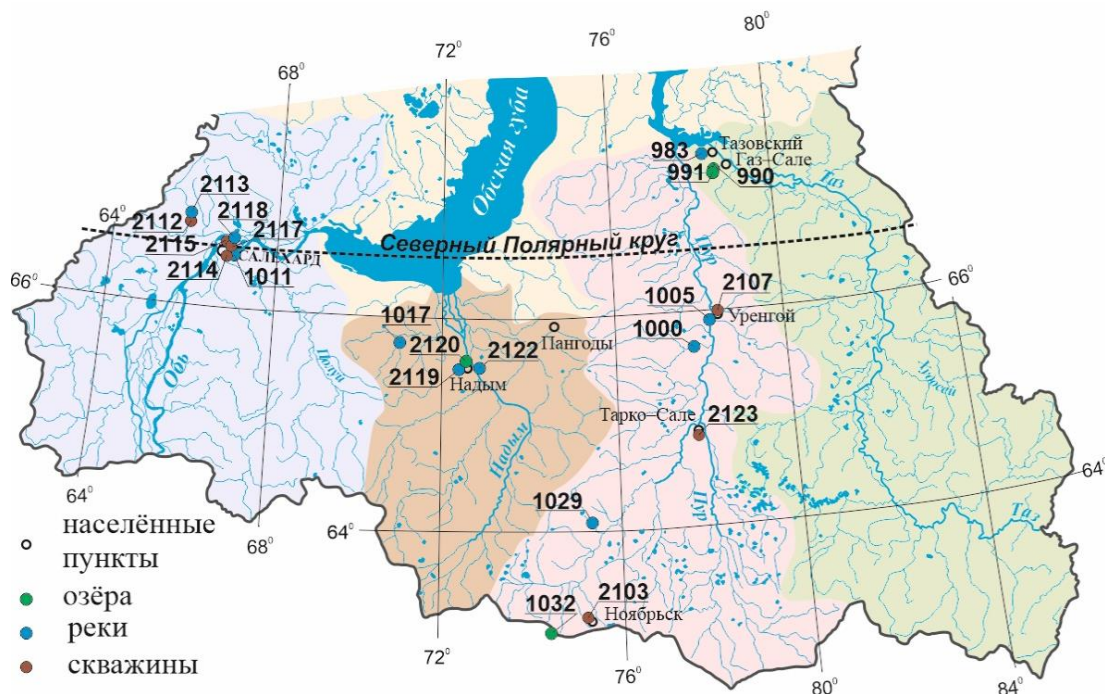


Рис. 1 Схема отбора проб природных вод на территории Ямало-Ненецкого автономного округа.

Концентрации растворенного органического углерода (РОУ) в водах были определены методом высокотемпературного каталитического окисления (ТОС-6000, Shimadzu, Япония) в Лаборатории георесурсов и окружающей среды г. Тулузы (GET, Франция). Для характеристики растворенного органического вещества использовался метод спектроскопии. В ТФ ИНГГ СО РАН были получены УФ-видимые спектры в диапазоне 200–800 нм (Cary 50, Varian, США), на основе которых рассчитаны три основных показателя – $SUVA_{254}$, E_2/E_4 , E_4/E_6 [4, 6]. $SUVA_{254}$ – показатель ароматичности пробы воды, рассчитывается как соотношение поглощения пробы на 254 нм к содержанию РОУ в пробе. Значение $SUVA > 4$ указывает на преобладание гидрофобного и в основном ароматического растворенного органического вещества, тогда как значение

$SUVA < 3$ указывает на присутствие гидрофильного РОВ. Для оценки преобладания автохтонного или аллохтонного РОВ были рассчитаны отношения оптических плотностей пробы на 254 и 436 нм ($E_2:E_4$). Отношение оптических плотностей пробы на 470 и 655 нм ($E_4:E_6$) коррелирует с размером молекулы, соотношением атомов О:С и С:N, содержанием карбоксилов и может как индикатор гумификации РОВ. Значения $E_4:E_6$ могут указывать на фульвовый ($E_4:E_6 > 8$) и гуминовый характер ($E_4:E_6 = 3-5$) [5]. Содержание и индивидуальный состав органических соединений, представленных в природных водах помимо фульвовых и гуминовых кислот [3] определялись в ИХН СО РАН методом газовой хромато-масс-спектрометрии с использованием квадрупольного хромато-масс-спектрометра DFS фирмы (Thermo Scientific, Германия). Количественные определения проводили по площадям пиков с использованием дейтероаценафтена $C_{12}D_{10}$ в качестве внутреннего стандарта.

Результаты и их обсуждение

Природные воды ЯНАО обогащены РОВ, содержание которых уменьшается в ряду озеро (РОУ до 38 мг/л) → малая река (РОУ до 17 мг/л) → главная река (РОУ до 15 мг/л), минимальные содержания РОВ характерны для глубоко залегающих подземных вод (РОУ до 10 мг/л).

На основе полученных концентраций РОУ и УФ-видимых спектров для характеристики РОВ вод был рассчитан показатель $SUVA_{254}$. В поверхностных водах ЯНАО значение $SUVA_{254}$ изменяются в пределах от 1,4 до 5,29; в подземных водах значение $SUVA_{254}$ увеличивается в несколько раз (от 5,20 до 15,62). В озерах и малых реках, относящихся к водосбору р. Таз, РОВ представлены гидрофильными низкомолекулярными алифатическими соединениями, но в водах р. Таз в состав РОВ добавляются гидрофобные высокомолекулярные ароматические соединения. Природные воды бассейна р. Пур, в основном, содержат гидрофильные РОВ, а воды бассейнов рек Надым и Обь характеризуются преобладанием гидрофобных высокомолекулярных ароматических соединений. Однако, воды, отобранные на левом берегу р. Обь (р. Собь, подземные воды в п. Харп) содержат гидрофильные низкомолекулярные алифатические соединения. Гидрофобные органические соединения представлены алканами, эфирами и жирными кислотами, гидрофильные ОС представлены низшими карбоновыми кислотами и спиртами. Стоит отметить, что данный метод оценки является ориентировочным, поскольку на значения $SUVA_{254}$ оказывают влияние pH, ионы железа и нитрат-ионы.

Практически все природные воды содержат РОВ гуминовой природы, однако в водах малых рек водосбора р. Надым отмечено также и наличие фульвовых кислот, а в водах реки Обь преобладающими РОВ являются фульвовой природы. Значения коэффициента $E_4:E_6$ увеличиваются от подземных вод к речным. Для образцов природных вод исследуемого района значения $E_2:E_4$ составили от 2,83 до 32,41. Минимальные значения получены в пробах

подземных вод, максимальные – для воды озер и малых рек, что говорит о присутствии аллохтонных веществ терригенного происхождения.

Среди органических микропримесей в природных водах ЯНАО идентифицировано более 130 органических соединений (ОС), относящихся к 18 структурным классам, имеющим различное происхождение. В наибольшем количестве среди ОС в поверхностных водах присутствуют кислоты и их эфиры, главным образом эфиры бензойной кислоты, в подземных водах доминируют жирные кислоты и их метиловые и изопропиловые эфиры.

В водах Севера Западной Сибири широко представлены пентациклические тритерпеноиды и стероиды C_{29} , источником которых является торф. Наиболее высокие содержания отмечены в пробах, отобранных вблизи п. Тазовский (в среднем 1,6 мкг/л), с максимальными концентрациями в водах термокарстового озера (2,8 мкг/л), далее по направлению стока их концентрации снижаются и достигают минимальных значений в р. Таз. В бассейнах рек Пур и Надым среднее содержание данных ОС снижается до 0,8 и 0,5 мкг/л, минимальный вклад компонентов торфа в состав присутствующих в водах зафиксирован в поверхностных водах бассейна реки Обь (в среднем 0,2 мкг/л).

Холестерин, являющийся одним из продуктов разложения различных представителей животного мира и поставляемого в природные воды, прежде всего, отходами животноводства, также обнаружен в большинстве исследованных проб воды (среднее 0,12 мкг/л), причем его содержание растет от озер к рекам и составляет 0,08 мкг/л и 0,18 мкг/л, соответственно. Вблизи населенных пунктов концентрации холестерина возрастали до 0,25 мкг/л, что скорее всего связано со сбросом коммунально-бытовых сточных вод. Максимальные его содержания отмечены в подземных водах, отобранных в пос. Харп – 0,86 мкг/л, что обусловлено наличием кладбища вблизи водозаборной скважины. По территории ЯНАО минимальным средним содержанием холестерина характеризуются воды водосбора р. Пур (0,05 мкг/л), в водах водосборов рек Таз и Обь – 0,15 мкг/л, а в водах, относящихся к бассейну р. Надым, концентрация составляет 0,19 мкг/л.

О наличии в водах нефти или нефтепродуктов свидетельствуют гопаны и циклогексаны. Гопаны в концентрации 0,002–0,23 мкг/л присутствует в водных объектах, опробованных рядом с г. Салехард и на территории Надымского района, циклогексаны (0,05–0,15 мкг/л) – в некоторых образцах, отобранных в бассейне р. Пур. Также с нефтяным, но и с растительным источником связано происхождение в водных объектах алканов, максимальное содержание которых обнаружено в бассейнах рек Таз и Пур. Преимущественно нефтяной генезис имеют алканы в подземных водах п. Харп (0,8 мкг/л) и одной из водозаборных скважин г. Салехард (1,3 мкг/л), причем вода в п. Харп загрязнена легкими нефтепродуктами, образующимися при протекании природных процессов, а в г. Салехард – мазутом или гудроном. Среди биомолекул

растительного генезиса в максимальных количествах присутствуют олеанены и урсены в водах, отобранных в реках и озерах бассейнов рек Таз и Пур.

Заключение

Природные воды бассейнов рек Таз и Пур, в основном, содержат гидрофильные низкомолекулярные алифатические органические соединения, воды бассейнов рек Надым и Обь характеризуются преобладанием гидрофобных высокомолекулярных ароматических соединений. Однако, воды, отобранные на левом берегу р. Обь содержат гидрофильные низкомолекулярные алифатические соединения. Гидрофобные органические соединения представлены алканами, эфирами и жирными кислотами, гидрофильные ОС представлены низшими карбоновыми кислотами и спиртами.

Среди органических микропримесей в поверхностных водах широко распространены кислоты и их эфиры, главным образом эфиры бензойной кислоты; пентациклические тритерпеноиды и стероиды, источником которых является торф. В подземных водах доминируют жирные кислоты и их эфиры, вблизи населенных пунктов обнаружен холестерин, источниками которого являются сточные воды. О наличии в воде нефти или нефтепродуктов свидетельствуют гопаны и циклогексаны, алканы указывают на присутствие углеводородов смешанного генезиса.

Работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России (номер соглашения в ГИИС «Электронный бюджет» 075-15-2022-241).

Список литературы

1. Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Яценко И.Г., Ельчанинова Е.А. Экологическое состояние водных объектов на территории нефтедобывающих комплексов Среднего Приобья // Нефтехимия. 2017. Т. 57. № 3. С. 340–345.
2. Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А., Дину М. И., Хорошавин В. Ю., Кремлева Т. А. Влияние природных и антропогенных факторов на процессы закисления вод в гумидных регионах // Геохимия. 2017. № 1. С. 41–56.
3. МУК 4.1. 663-97. Методические указания. Определение массовой концентрации органических соединений в воде методом хромато-масс-спектрометрии. – Москва: Министерство здравоохранения России, 1997. 4 с.
4. Drozdova O.Yu., Ilina S.M., Anokhina N.A., Zavgorodnyaya Yu.A., Demin V.V., Lapitskiy S.A. Transformation of organic substances in the conjugate series of surface waters of North Karelia // Water resources. 2019. №1. pp. 43–50.
5. Ilina S.M., Drozdova O.Yu., Lapitskiy S.A., Alekhin Yu.V., Demin V.V., Zavgorodnyaya Yu.A., Shirokova L.S. Viers J., Pokrovsky O.S. Size fractionation and optical properties of dissolved organic matter in the continuum soil solution-bog-river and terminal lake of a boreal watershed // Organic Geochemistry. 2014. V. 66. pp. 14–24.
6. Yan M., Dryer D., Korshin G.V. Spectroscopic characterization of changes of DOM deprotonation–protonation properties in water treatment processes // Chemosphere. 2016. № 4. pp. 426–435.

УДК 556

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС И МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНТЕРПРИТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОХИМИИ ПОРОВЫХ ВОД СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ОТЛОЖЕНИЙ**Е.С. Казак*^{1,2}**¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: Kanigu@mail.ru²ООО «Фарватер», Москва, Россия, E-mail: Kanigu@mail.ru**Аннотация**

Геохимическая характеристика поровых вод слабопроницаемых горных пород различной степени литификации может быть получена с помощью предложенного комплексного подхода, сочетающего в себе лабораторный комплекс современных методов исследований, и модельно-ориентированную интерпретацию полученных в ходе анализа результатов. В данной статье представлен опыт эффективного использования данного комплексного подхода для решения практических задач, включающих характеристику геохимии поровых вод слабопроницаемых отложений различной степени консолидации – слабо литифицированных донных отложений Воронежского водохранилища и плотных отложений баженовской свиты центральной части Западной Сибири.

Ключевые слова: поровые воды, слабопроницаемые отложения, баженовская свита, водосодержание, донные отложения, железо

LABORATORY COMPLEX AND RESULTS MODEL-ORIENTED INTERPRITATION OF THE PORE WATER GEOCHEMISTRY OF LOW-PERMEABLE SEDIMENTS**E.S. Kazak*^{1,2}**¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: Kanigu@mail.ru²LLC «Fairwater», Moscow, Russian Federation, E-mail: Kanigu@mail.ru**Abstract**

The geochemical characterization of pore waters of low-permeable sediments of various lithification state can be obtained using the proposed integrated approach that combines a laboratory complex of modern research methods and a results model-oriented interpretation. This article presents the experience of effective use of this integrated approach for solving practical problems, including the characterization of the geochemistry of pore waters of low-permeable sediments of various degrees

of consolidation - weakly lithified bottom sediments of the Voronezh reservoir and tight shales of the Bazhenov Formation in the central part of Western Siberia.

Key Words: pore water, low-permeable deposits, Bazhenov formation, water content, bottom sediments, iron

Введение

Изучение химического состава и физико-химических свойств поровой воды как дисперсной фазы горных пород представляет значительный интерес для целей гидрогеологии, геохимии, литологии, нефтяной геологии и пр. Для гидрогеолога знание состава и свойств порового раствора помогает при исследовании происхождения и формирования подземных минерализованных вод и рассолов. Для промышленной геофизики важно знать свойства поровых вод, так как они определяют основные промышленно-геофизические параметры (электрические, электрохимические, нейтронные) [5]. Не смотря на то, что экспериментальное изучение поровых растворов ведется уже около века, получение надежных данных о содержании и составе поровых вод, особенно плотных пород, остается для науки до сих пор не отвеченным вызовом.

В данной работе представлен предложенный автором универсальный комплексный подход, сочетающий в себе лабораторный комплекс исследований с комбинацией рутинных и авторских прямых и косвенных методов, и модельно-ориентированную интерпретацию полученных в ходе анализа результатов. Данный комплексный подход эффективно используется для характеристики геохимии поровых вод слабопроницаемых отложений различной степени консолидации [1]. Ниже представлены результаты его применения на образцах слабо литифицированных и плотных отложений [1; 2].

В первом случае объектом исследования являлись поровые воды донных осадков Воронежского водохранилища, расположенного в г. Воронеж. Водоснабжение г. Воронежа, имеющего население около 1 млн. человек полностью базируется на подземных водах. Для отбора подземных вод в городе функционирует система централизованных водозаборов, расположенных по берегам Воронежского водохранилища. Для всех этих водозаборов характерно повышенное содержание железа в отбираемой воде, в то время как воды целевого горизонта в естественных условиях содержат растворенное железо на уровне ниже ПДК. В связи с этим целью исследований является изучение поведения железа в системе «водохранилище – донные отложения – подземные воды – водозабор» для установления источников формирования повышенных концентраций железа и прогноза их изменений.

Во втором случае объектом исследования являлись поровые воды слабопроницаемых плотных отложений баженовской свиты центральной части Западной Сибири. За весь период поиска, разведки и разработки пород БС нигде в скважинах не была встречена водонасыщенная или водонефтяная зона пласта. Надёжная оценка водонасыщенности образцов пород БС

в настоящее время признаётся большинством специалистов в области петрофизического и геолого-геофизического моделирования крайне актуальной проблемой, решить которую может помочь предложенный в данной работе комплексный подход.

Материалы и методы исследований

Лабораторный комплекс включает в себя набор прямых и косвенных методов анализа состава компонентов системы «вода-порода», результаты которых в дальнейшем подвергаются модельно ориентированной интерпретации и комплексному анализу. Предложенный комплексный подход имеет блоковую структуру, которая модифицируется в зависимости от стоящих задач.

Для комплексной характеристики системы «поровая вода – низкопроницаемые отложения» важно достоверно определять как количество различных видов воды в образце, так и ее химический состав, а также общие параметры взаимодействия воды и породы (емкость катионного обмена (ЕКО), удельная поверхность) (Рис. 1). После чего неотъемлемой частью является контроль правильности получаемых результатов, в том числе геохимический контроль измеренных составов вод. Заключительным этапом (модельно ориентированная интерпретация результатов) является статистическая и аналитическая обработка полученных результатов для поиска закономерностей и проверки изначально выдвинутой научной гипотезы, а также моделирование процессов и массопереноса в исследуемой системе «вода-порода».

Следует отметить, что крайне важно для исследований использовать образцы горных пород с максимально сохраненной водонасыщенностью, поэтому большое значение имеет соблюдение регламента правильного отбора и консервации, надлежащего хранения и последующей подготовки образцов к анализам.



Рис. 1 Лабораторный комплекс исследований компонентов системы «поровые воды – слабопроницаемые породы различной степени консолидации».

Для установления потенциального источника железа в подземных водах неоген-четвертичного водоносного горизонта, эксплуатируемого ВС № 4 в г. Воронеже, автором был использован предложенный комплексный подход, включающий следующие блоки: 1) определение химического состава подземных и поровых вод; 2) анализ минерального состава водовмещающих пород и донных осадков; 3) определение ЕКО и площади удельной поверхности водовмещающих пород и донных осадков; 4) многокомпонентное геомиграционное моделирование. Для исследований использовались пробы поверхностной

и подземной воды водозаборных скважин, образцы пород водовмещающих отложений целевого водоносного горизонта, 5 колонок донных осадков, отобранных со дна Воронежского водохранилища.

Изучение геохимии поровых вод плотных отложений БС выполнялось на 43-х образцах пород с максимально сохранённой флюидонасыщенностью, отобранных из 5 скважин 5 различных месторождений Западной Сибири (центральная часть). Изучение состава поровых вод низкопроницаемых пород БС было выполнено с помощью комплексного подхода и включало следующие блоки: 1) определение водосодержания прямым методом испарения на приборе УДАВ 1.2-5; 2) анализ минерального и геохимического состава пород; 3) определение емкости катионного обмена и состава обменных катионов; 4) анализ химического состава поровых вод косвенным методом водных вытяжек и методом вытеснения поровой воды вязким флюидом под большим давлением; 6) термодинамическое моделирование взаимодействия в системе «вода-порода-газ-органическое вещество». В результате такого всестороннего междисциплинарного подхода удалось впервые определить диапазон минерализации и состав поровых вод образцов пород БС рассматриваемых скважин, что несомненно имеет высокую научную и практическую значимость.

Результаты и их обсуждения

Поровые воды Воронежского водохранилища

Интерпретация результатов анализа проб подземных, поверхностных и поровых вод, образцов донных отложений Воронежского водохранилища и пород водоносного горизонта, показывает, что наиболее вероятный источник железа в подземных водах водозаборных скважин – минералы железа, содержащиеся в донных отложениях (до 6,4 % гидроксида железа и до 1,85 % сидерита по данным анализа). Вероятно, поверхностная вода водохранилища претерпевает изменение своего состава, проходя через донные отложения, в частности приобретает высокую концентрацию растворенного железа, мобилизующегося в результате восстановления его гидроксида органическим веществом. Далее вода мигрирует к водозаборным скважинам, где наблюдается ее смешение с бытовым подземным потоком с берега. Экспериментально установлено, что основной формой миграции железа являются органические комплексы, но также присутствуют лабильные и коллоидные формы железа.

Проведенное моделирование многокомпонентной миграции воды водохранилища через донные отложения показало, что термодинамически возможно протекание вышеописанных процессов перераспределения минеральных форм железа. При этом, при заданных параметрах модели, чем больше скорость фильтрации воды водохранилища через донные отложения, тем быстрее произойдет их промывка от гетита. Часть перешедшего в раствор железа по данным расчета мигрирует из донных отложений преимущественно в виде органических комплексов с

фульвокислотой. Результаты моделирования при различных скоростях движения воды за 25 лет показали, что концентрация растворенного железа в донных отложениях изменяется во времени, а на выходе из них в среднем составляет 0,156 ммоль/л и соответствует диапазону концентрации железа, полученной в процессе опробования поровой воды донных отложений. Таким образом, с помощью предложенного комплексного подхода установлено, что основным источником железа в подземных водах водозаборных скважин являются минералы железа донных осадков, поставляющие растворенное железо в ходе их растворения и его миграции привлеченным потоком к водозаборным скважинам.

Поровые воды БС

По данным метода испарения содержание остаточной воды в породах БС составило 0,28–4,27 масс.% (или 2,84–52,43 об.%), при содержании свободной 0,04–2,53 масс.%. Получается, что породы БС на сегодняшний день практически полностью уплотнены и представляют собой региональный водоупор, из которого отжато более 95 % воды. Установлена общая тенденция увеличения содержания остаточной воды с ростом количества глинистых минералов и ее снижение с увеличением количества ОВ (параметр S_2 по пиролизу). В целом полученные результаты укладываются в традиционную концепцию смачиваемости сланцевых пород [3], предполагающей, что в неорганических порах присутствует преимущественно вода, в поровом пространстве твердого ОВ содержатся углеводороды.

Результаты изотопного анализа поровой воды показали, что для вод, полученных методом испарения значения $\delta^2\text{H}_{\text{VSMOW}}$ находится в диапазоне от -64,5 до -63,8 ‰, а $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ – от -2,0 ‰ до +1,4 ‰ и попадают в характерный для подземных вод юрских и доюрских образований Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна диапазон. Более того полученные значения изотопного состава показывают, что поровые воды БС имеют преимущественно морское происхождения в закрытых бассейнах, то есть действительно являются глубинной захороненной морской водой, а не техногенной жидкостью, попавшей в керн при бурении.

Суммарная величина ЕКО составляет 2,87–5,42 смоль/кг и увеличивается для образцов с большим содержанием глин.

С помощью косвенного метода водных вытяжек установлено, что состав поровых вод образцов БС преимущественно хлоридный натриевый. Используя верифицированные составы водных вытяжек из образцов пород БС, а также полученные данные по минеральному составу образцов пород и ЕКО был оценен состав поровой воды в пластовых условиях in-situ путем моделирования обратного извлечению керна процесса в несколько шагов. На шаге 1 оценивается содержание компонентов в поровых водах с учетом их коэффициента разбавления дистиллированной водой при приготовлении водной вытяжки для каждого образца. На шаге 2 полученные растворы приводятся в равновесие с теми фазами, которые могут быстро осаждаться при подъёме керна (диоксид кремния, кальцит и доломит) при повышении

температуры с 10 до 110 °С, а также с обменным комплексом глинистых минералов. На шаге 3 увеличивается парциальное давление $p(\text{CO}_2)$ до 1 атмосферы. Реверс этой ступени представляет собой сброс давления во время подъема буровой колонны в стволе скважины и равновесие с атмосферой. Моделирование выполнялось с помощью программного кода PHREEQC 3.0 [4]. Базы данных PHREEQC- и Wateq.v4 использовались вместо базы данных Pitzer.

В результате найдено, что минерализация поровых вод образцов пород БС изменяется от 11,67 до 18,41 г/л для скв. 1, от 4,29 до 12,06 г/л для скв. 2, от 5,1 до 10,18 г/л для скв. 3, от 8,95 до 30,35 г/л для скв. 4, от 6,42 до 22,33 г/л для скв. 5. Получается, что диапазон минерализации для все исследованных образцов находится от 4,29 до 30,35 г/л в среднем составляя по всем исследованным скважинам 12,79 г/л. По составу воды преимущественно хлоридные натриевые с повышенным содержанием гидрокарбонат иона, имеют глубинный хлоридно-кальциевый тип воды по Сулину. Воды буссульфатные. Полученные результаты соотносятся с измеренным значением минерализации по данным прямого анализа вытесненной воды для образцов БС и результатами прямого анализа притока пластовой воды в интервале георгиевской свиты и пласта АЧ2-БВ12 и верифицируют предложенную модель.

Выявленная изменчивость состава и минерализации поровых вод БС может быть связана с широким шагом отбора образцов керна (около 2 м), а также с известной неоднородностью химико-минералогического состава отложений даже в пределах одной скважины.

Заключение

Для изучения поровых вод слабопроницаемых горных пород необходимо использовать комплексный подход, сочетающий в себе набор прямых и косвенных лабораторных методов, а также термодинамическое и геомиграционное моделирование. Эффективное применение предложенного комплексного подхода на конкретных объектах требует изучения минерального состава горных пород, химического и изотопного состава поровых вод, определение параметров взаимодействия воды и породы, таких как удельная поверхность и емкость катионного обмена. Все это позволяет выбрать оптимальную структуру многокомпонентной модели и набор моделируемых гидрогеохимических параметров для модельно-ориентированной интерпретации результатов.

Список литературы

1. Kazak, E. S., Kazak, A. V. An Integrated Experimental Workflow for Formation Water Characterization in Shale Reservoirs: A Case Study of the Bazhenov Formation // SPE J. 2021. Т. 1, № SPE-205017-PA. – С. 1-16.
2. Kazak, E. S., Pozdniakov, S. P. Field Study and Reactive Simulation of Iron Migration in Groundwater during the Riverbank Filtration // Applied Geochemistry. 2020. – С. 104817. – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292720303097>.

3. Odusina, E. O., Sondergeld, C. H., Rai, C. S. NMR Study of Shale Wettability. – Canadian Unconventional Resources Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2011/1/1/, 2011. – Режим доступа: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-147371-MS>.
4. Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J. Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations // U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43. – Denver, Colorado, USA : U.S. Geological Survey, 2013. – С. 497.
5. Орлов, Л. И., Лавров, А. П., Манжалеи, Н. Т. Комплексное изучение поровых растворов и пластовых вод // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. 1974. – С. 147-171.

УДК 556.114:546.43+553.982(571.1)

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАРИЯ, В СВЯЗИ С ТЕХНОГЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ, ОСЛОЖНЯЮЩИМИ РАЗРАБОТКУ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Т.А. Киреева*¹¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: ta_kireeva@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований гидрохимического поведения соединений бария в глубоких пластовых водах нефтяных месторождений. На примере термальных источников обращается внимание на аномально высокое по отношению к общей минерализации накопление иона Ba^{2+} в водах с температурой более 80°C. Показано, что в океанической воде отношение Ca:Sr:Ba составляет примерно 100:10:0,01 и сохраняется таковым при увеличении общей минерализации до рассольной. В высокотемпературных (75-115°C) пластовых водах некоторых нефтяных месторождений Западной Сибири это соотношение нарушается в пользу аномально высокого накопления бария, вплоть до отношения Ca:Sr:Ba равном 100:10:100, при том, что минерализация пластовых вод не превышает 16-18 г/дм³. Аномально высокие содержания бария в высокотемпературных пластовых водах нефтегазовых месторождений необходимо учитывать при прогнозах сульфатного солеотложения и интенсивности проявления радиогеохимического эффекта.

Ключевые слова: микрокомпоненты, барий, пластовые воды нефтяных месторождений, солеотложение, радиогеохимический эффект

HYDROCHEMICAL FEATURES OF BARIUM, DUE TO TECHNOGENIC PROCESSES COMPLICATING THE DEVELOPMENT OF OIL FIELDS

T.F. Kireeva*¹¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: glukhov@mail.ru

Abstract

The results of studies of the hydrochemical behavior of barium compounds in deep reservoir waters of oil fields are presented. Using the example of thermal springs, attention is drawn to the abnormally high accumulation of the Ba^{2+} ion in waters with a temperature of more than 80 °C in relation to the total salinity. It is shown that in oceanic water the ratio Ca:Sr:Ba is approximately 100:10:0.01 and remains so when the total mineralization increases to brine. In the high-temperature

(75-115 °C) reservoir waters of some oil fields in Western Siberia, this ratio is violated in favor of an abnormally high accumulation of barium, up to the ratio Ca:Sr:Ba equal to 100:10:100, despite the fact that the mineralization of reservoir waters does not exceed 16-18 g/dm³. Abnormally high barium contents in high-temperature reservoir waters of oil and gas fields should be taken into account when predicting sulfate salt deposition and the intensity of the radiogeochemical effect.

Key Words: micro-components, barium, reservoir waters of oil fields, salt deposition, radiogeochemical effect

Введение

В настоящее время практически все нефтегазовые месторождения эксплуатируются с применением различных технических методов, увеличивающих нефтеотдачу пластов. Одним из основных методов является закачка воды в продуктивные горизонты для поддержания пластового давления (ППД). Для этой цели используются различные воды: поверхностные (речные, озерные, морские), а также подземные, как правило, залегающие выше по разрезу. Поступление «чуждых» вод в пластовую систему нарушает гидрогеохимическое равновесие и может вызвать отложение минеральных осадков, потому что закачиваемые воды существенно отличаются по химическому составу от пластовых растворов. Кроме того, поступление огромного количества закачиваемых вод в продуктивные горизонты неизбежно приводит к обводнению добывающих скважин. Таким образом, при эксплуатации нефтяных месторождений необходимо предусматривать прогноз солеотложения и обводнения добываемой продукции. В обоих случаях важную роль играет образование сульфата бария.

Результаты и их обсуждения

Прогноз солеотложения. В составе неорганических солей, которые могут отлагаться в призабойных зонах нагнетательных и добывающих скважин, и непосредственно в добывающих скважинах, наиболее трудноудаляемыми являются сульфаты кальция (гипс и ангидрит), стронция (целестин) и бария (барит). Магний также является щелочноземельным металлом, но его сульфатная соль обладает высокой растворимостью (358 г/дм³ при н.у.) и поэтому не образует твердые солевые осадки. Отложения же барита являются практически не удаляемыми (не растворяются даже в разбавленных кислотах) и его образование в значительных количествах может привести к потере скважины. Растворимость барита настолько мала ($2,3 \cdot 10^{-5}$ г/дм³), что наличие в пластовых водах даже очень малого количества ионов Ba²⁺ обуславливает возможность выпадения BaSO₄, при увеличении в водах содержания SO₄²⁻. Для прогноза образования барита важно иметь в виду, что хотя элементы Ca, Sr и Ba очень близки по химическим свойствам, но есть особенности, которые отличают гидрохимическое поведение бария от кальция и стронция.

Источником бария в пластовых водах являются воды бассейна осадконакопления и водовмещающие горные породы. Содержание бария в океанических водах, которые можно принять как основу вод бассейна осадконакопления, составляет $0,03 \text{ мг/дм}^3$, при этом в океанической воде отношение $\text{Ca}:\text{Sr}:\text{Ba}$ составляет примерно $100:10:0,01$. С ростом минерализации ($M_{\text{общ}}$) и увеличением хлоридности пластовых вод, увеличивается содержание и этих металлов, что связано с хорошей растворимостью их хлоридных солей. Так растворимость BaCl_2 составляет 357 г/дм^3 (при н.у.), а растворимость хлоридов кальция и стронция еще выше. В хлоридных рассолах (хлоридно-кальциевый тип по В.А Сулину) увеличение концентрации кальция, происходящее прямо пропорционально росту $M_{\text{общ}}$, сопровождается увеличением концентраций стронция и бария – геохимических аналогов кальция, но при этом их первоначальные природные соотношения не нарушаются, т.е. соотношение $\text{Ca}:\text{Sr}:\text{Ba}$ в пластовых хлоридно-натриево-кальциевых рассолах при $M_{\text{общ}}$ около 100 г/дм^3 обычно приблизительно соответствует аналогичному соотношению в океанических водах [1]. Например, для пластовых вод месторождения Заманкул (Северная Осетия) содержание этих компонентов составляет $2300, 130, 0,41 \text{ мг/л}$ соответственно при $M_{\text{общ}}$ 80 г/дм^3 . Однако для бария это соотношение не всегда выдерживается. Установлено [2], что в пластовых водах нижнемеловых, юрских и палеозойских отложений одного из нефтяных месторождений Краснотенинского свода Западной Сибири содержание бария составляет $35\text{--}78 \text{ мг/л}$, при $M_{\text{общ}}$ $16\text{--}18 \text{ г/дм}^3$, что на 1-2 порядка выше его содержания в большинстве пластовых рассолов. В водах пород юрского возраста данной структуры отмечено опережающее накопление бария, по отношению к стронцию, что отразилось на величине отношения $\text{Ca}:\text{Sr}:\text{Ba}$, составившем $100:10:100$, что является еще более аномальным. Растворимость некоторых солей бария (BaCl_2 и BaS) существенно повышается с ростом температуры. Вероятно, именно с этим связано уменьшение отношения $M_{\text{общ}}/\text{Ba}$ для вод нижнемеловых, юрских и палеозойских отложений Краснотенинского свода, т.к. температура этих вод достаточно высока и составляет $72, 106$ и 116°C соответственно. В литературе есть сообщения об увеличении содержания бария в высокотермальных водах, в частности, в воде высокотемпературного углекислого источника Гарм-Чашма (Памир) при $M_{\text{общ}}$ $3,47 \text{ г/дм}^3$ содержание Ba^{2+} составляет $0,17 \text{ мг/дм}^3$ [3]. Также хорошо известны [4] барит-полиметаллические жилы, образующиеся при изменении кристаллических пород средне температурными ($300\text{--}400^\circ\text{C}$) гидротермами.

Факт, что барий не является полным гидрохимическим аналогом кальция и в глубоких высокотемпературных водах происходит его непропорциональное (слишком большое) накопление относительно содержания $M_{\text{общ}}$ и кальция, имеет важное практическое значение, потому что в разрабатывающих организациях обычно не определяют содержание бария, ограничиваясь определением кальция, как солеобразующего элемента, а содержание бария

учитывают, исходя из пропорциональности накопления, или не учитывают вовсе, считая его содержание незначительным, особенно для вод с $M_{\text{общ}} < 100 \text{ г/дм}^3$.

Неверные данные о возможности высокого содержания бария в пластовых водах нефтяных месторождений может привести к недостоверному прогнозу сульфатного солеотложения, имеющему самые негативные последствия.

Обводнение добываемой продукции. При нагнетании воды в залежь в передней части фронта вытеснения образуется буферная оторочка, представляющая собой смесь закачиваемой воды с вытесняемыми остаточными водами залежи. Важно контролировать перемещение этого фронта и отслеживать поступление нагнетаемой воды в добывающие скважины. Часто для этого используется метод радиогеохимического эффекта (Алексеев, Хуснуллин, 1965), который заключается в многократном увеличении естественной гамма активности пород в интервале продуктивных пластов в процессе их обводнения и проявляется в возникновении аномалий на кривых гамма-каротажа (ГК). Аномалии на кривых ГК связаны с образованием на цементном камне отложений радиобарита, представляющего собой барит, содержащий примесь RaSO_4 . Однако метод не нашел широкого применения, т.к. проявлялся не всегда, что, вероятно, было связано именно с «непонятным» поведением бария.

Работами Радиевого института (в 1926-1932 гг.) было установлено относительно высокое (по сравнению с другими водами) содержание радия в пластовых водах нефтяных месторождений. Уже тогда отмечалось, что уровни радия более устойчивы в водах, содержащих барий. Радий является геохимическим аналогом бария и по химическим (геохимическим) свойствам очень к нему близок, поэтому при образовании нерастворимого сульфата бария, в нем происходят изоморфные замещения радием бария в кристаллической решетке BaSO_4 , с образованием, так называемых, радиобаритов – Ba(Ra)SO_4 . Следовательно, чем больше в пластовых водах будет бария, тем сильнее будет выражен радиогеохимический эффект, при условии, что для ППД используются маломинерализованные воды, содержащие сульфат-ион. Действительно, радиогеохимический эффект практически всегда отмечается при разработке нефтяных месторождений Западной Сибири, причем, даже тогда, когда при закачке используют попутные воды (замкнутый цикл), что, вероятно, связано с десорбцией бария из глинистого цемента песчаников коллектора.

Заключение

Гидрохимия бария в подземных водах может значительно отличаться от поведения его химических аналогов – кальция и стронция. Это проявляется в аномально высоком (по отношению к $M_{\text{общ}}$) накоплении иона Ba^{2+} в водах с температурой более 80°C . Пренебрежение аналитическим определением Ba^{2+} в пластовых и попутных водах нефтегазовых месторождений может привести к недостоверному прогнозу сульфатного солеотложения, а также к вероятности

проявления радиогеохимического эффекта, что может повлечь тяжелые техногенные последствия.

Список литературы

1. Казак Е.С., Киреева Т.А., Казак А.В., Богданович Н.И. Ионно-солевой комплекс пород баженовской свиты Западной Сибири. // Вестник МГУ. Сер. 4 Геология. 2017. № 4. С. 68-75.
2. Киреева Т.А., Корзун А.В. Новые данные о повышенном содержании бария в пластовых водах нижнемеловых и юрских отложений Краснотеннинского свода (Западная Сибирь) // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 124-128
3. Киреева Т.А., Салихов Ф.С., Бычков А.Ю., Харитоновна Н.А., Ромашкина А.В. Новые данные о микроэлементном и изотопном составе термальных источников Таджикистана // Вестник МГУ. 2018 Сер. 4. Геология. № 6. С. 109-116.
4. Волостных Г.Т. Аргиллизация и оруденение. М: Недра. 1972. 240 с.

УДК 556.314

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Ю.В. Колубаева*¹, И.С. Иванова¹, Н.А. Волкова¹

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, Россия, E-mail: Kolubaeva@inbox.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования пресных подземных вод хозяйственно-питьевого назначения, отобранных в 2021 и 2022 гг. на территории Ямало-Ненецкого автономного округа. В связи с активным освоением арктических территорий Западной Сибири с каждым годом возрастает потребность в обеспечении населения качественной питьевой водой. Однако в силу происходящих климатических изменений и увеличивающейся антропогенной нагрузки, обусловленной развитием нефтегазодобывающей отрасли, природные воды, в том числе и подземные, подвержены загрязнению. В связи с этим актуальным является изучение химического состава подземных вод данной территории. В работе представлены данные по химическому составу подземных вод, которые являются ультрапресными и мягкими, а их общий природный гидрогеохимический облик определяется низкими содержаниями гидрокарбоната-иона, кальция и магния. Для исследуемых вод характерны высокие концентрации железа и марганца, в большинстве случаев превышающие установленные для них нормативы. В некоторых случаях отмечены повышенные содержания хлорид-иона и натрия, соединений азотной группы, что в свою очередь может указывать на вероятность загрязнения подземных вод, которое, возможно, связано с участками нарушения сплошности толщ, перекрывающих водоносные горизонты, а также с расположением эксплуатируемых водозаборных скважин.

Ключевые слова: пресные подземные воды, химический состав, загрязнение вод, хозяйственно-питьевое водоснабжение

CHEMICAL COMPOSITION OF FRESH GROUNDWATER OF THE YAMAL-NENETS AUTONOMOUS OKRUG

Yu.V. Kolubaeva*¹, I.S. Ivanova¹, N.A. Volkova¹

¹Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russian Federation., E-mail: Kolubaeva@inbox.ru

Abstract

This article presents the results of a study of fresh groundwater for domestic and drinking purposes, sampled in 2021 and 2022 on the territory of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug. Due to the active development of the Arctic territories of Western Siberia the need to provide the population with quality drinking water increases every year. However, the ongoing climatic changes and increasing anthropogenic load due to the development of the oil and gas industry, natural waters, including groundwater, are subject to pollution. Therefore, it is important to study the chemical composition of groundwater in this area. This work presents data on the chemical composition of groundwater, which is ultra-fresh and soft, and its general natural hydrogeochemical pattern is defined by low content of the bicarbonate ion, calcium and magnesium. The studied waters are characterized by high concentrations of iron and manganese, in most cases exceeding the limits for them. In some cases, elevated concentrations of chloride ion and sodium, compounds of the nitrogen group are noted, which in turn may indicate the possibility of groundwater pollution, which may be associated with the areas of discontinuity of strata overlapping aquifers, as well as with the location of operated water wells.

Key Words: fresh groundwater, chemical composition, water pollution, domestic and drinking water supply

Введение

Экосистемы северных территорий Западной Сибири в последние десятилетия претерпевают значительные изменения, обусловленные как природными, так антропогенными факторами. Наличие многолетнемерзлых пород, заболоченность, а также климатические изменения; активная добыча углеводородов, способствующая развитию инфраструктуры (трубопроводы, автомобильные дороги, линии электропередач и т.д.) – все это, несомненно, оказывает влияние на химический состав природных вод. По этой причине в водах рек, обладающих невысокой способностью к самоочищению, может возрастать содержание многих компонентов, в числе которых макрокомпоненты, соли тяжелых металлов, нефтепродукты и др. [4]. В свою очередь, наличие загрязняющих веществ в речных водах может являться причиной загрязнения подземных вод, эксплуатируемых в поймах рек. Более того, нефтегазовая промышленность активно воздействует на подземные воды, используя их для поддержания пластового давления, а также закачивая в них подтоварные воды, что негативно сказывается на качестве подземных вод.

В этой связи актуальным является изучение химического состава пресных подземных вод и проверка их гидрогеохимических данных на соответствие нормативам качества вод, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения. В основу данной работы положены результаты исследований, проведенных сотрудниками ТФ ИНГТ СО РАН в 2021 и 2022 гг.

на территории крупнейшего по добыче природного газа и нефти региона России – Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО).

Методы исследований

В результате экспедиционных работ, проведенных в 2021 и 2022 годах, было отобрано 25 проб подземных вод из водозаборных скважин хозяйственно-питьевого назначения, глубина которых варьирует от 5 до 244 м. Все они административно располагаются в пределах Приуральского, Надымского и Пуровского районов ЯНАО (Рис. 1).

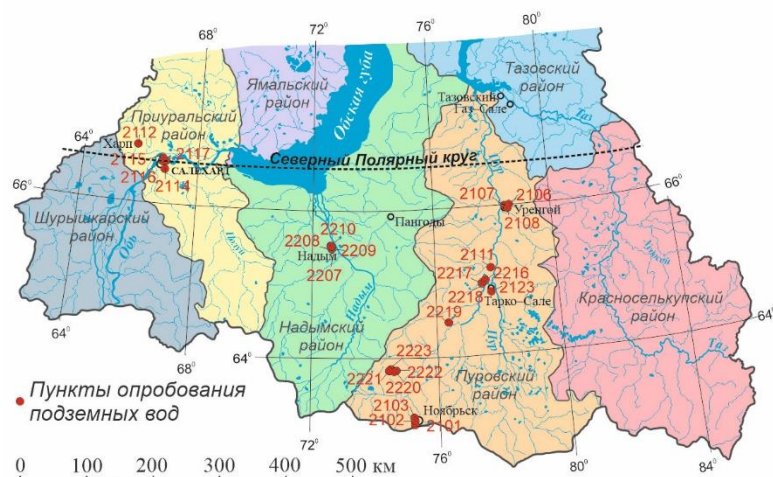


Рис. 1 Схема района исследований и пунктов опробования подземных вод.

В каждой точке опробования проводились измерения быстроменяющихся показателей: температуры, pH, электропроводности, окислительно-восстановительного потенциала. В ТФ ИНГГ СО РАН методом капиллярного электрофореза («Капель-205», Люмэкс, Россия) были определены содержания: основных макрокомпонентов (SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), биогенных соединений (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-}), F^- ; концентрации HCO_3^- определены методом титрования. В Лаборатории георесурсов и окружающей среды г. Тулузы (GET, Франция) определено содержание растворенного органического углерода (POУ) методом высокотемпературного каталитического окисления (TOC-6000, Shimadzu, Япония), концентрации микроэлементов определены методом ICP-MS (Agilent 7500, Agilent Technologies, США). Статистическая обработка полученных данных проводилась при помощи пакета программы Microsoft Office Excel.

Результаты и их обсуждение

Опробованные подземные воды приурочены к двум водоносным комплексам (ВК): четвертичному и эоцен-олигоценному, являющихся основными источниками водоснабжения на территории исследований. Химический состав подземных вод представлен в табл. 1.

Табл. 1 Основные физико-химические показатели состава пресных подземных вод ЯНАО.

Компонент, ед. изм.	Эоцен-олигоценый ВК			Четвертичный ВК			ПДК [3]
	Минимум	Среднее	Максимум	Минимум	Среднее	Максимум	
pH	5,6	6,8	7,4	5,5	6,2	7,9	6-9
Eh, мВ	-109,8	-67,4	-4,6	-113,9	35,0	148,3	
Об.ж., мг-экв/л	0,2	1,0	3,0	0,2	1,3	3,7	7
HCO ₃ ⁻ , мг/л	26,8	94,0	204,0	17,7	71,6	210,0	
SO ₄ ²⁻	< 0,5	1,3	4,2	< 0,5	8,3	25,7	500
Cl ⁻	< 0,5	1,3	86,7	< 0,5	2,7	18,0	350
Ca ²⁺	1,8	11,3	32,9	2,6	14,1	30,7	
Mg ²⁺	1,2	4,9	16,1	0,6	4,2	26,5	50
Na ⁺	2,1	4,7	83,8	1,2	2,6	13,4	200
K ⁺	< 0,5	1,5	3,0	0,5	0,7	4,0	
NH ₄ ⁺	< 0,5	0,8	4,6	< 0,5	0,8	1,7	1,5
NO ₂ ⁻	< 0,2	–	0,91	< 0,2	–	< 0,2	3,0
NO ₃ ⁻	< 0,2	0,25	0,48	0,34	1,1	24,1	45
PO ₄ ³⁻	< 0,25	0,7	4,4	< 0,25	–	2,8	3,5
F ⁻	< 0,1	0,13	0,29	< 0,1	< 0,1	0,15	1,5
РОУ	0,6	4,1	9,5	0,4	2,1	12,7	
Мин.	41	131	357	28	115	287	1000
Fe общ	1,4	3,6	9,1	0,01	2,4	14,8	0,3
Мп, мкг/л	154,7	364,3	918,7	1,1	453,7	1394,7	100
Li	0,5	2,4	7,7	0,5	1,1	3,4	30
B	4,8	55,5	342,5	0,9	9,2	92,9	500
Al	0,2	6,5	63,3	2,6	7,9	38,3	200
Ti	0,3	1,4	13,4	0,04	0,16	1,8	100
V	0,1	0,3	2,5	0,04	0,3	2,3	100
Cr	0,2	0,9	2,2	0,06	0,5	1,6	50
Co	0,02	0,06	0,8	0,02	1,0	5,9	100
Ni	0,03	0,25	1,2	0,2	5,1	35,9	20
Cu	0,01	0,24	2,5	0,1	6,4	18,8	1000
Zn	0,4	3,6	28,1	2,2	9,6	645,6	5000
As	0,07	1,0	9,3	0,02	0,7	3,9	10
Sr	19,6	57,0	121,0	14,1	47,0	216,9	7000
Sb	0,002	0,2	0,7	0,01	0,07	0,2	5
Ba	5,7	14,6	72,2	3,9	14,6	64,6	700
Pb	0,01	0,1	1,6	0,02	0,07	0,9	10

Четвертичный ВК имеет повсеместное распространение, но в качестве источника водоснабжения используется в основном в западной части ЯНАО (г. Салехард, Приуральский район) (Рис. 1). Величина pH вод варьирует в пределах от 5,5 до 7,9 (от слабокислых до слабощелочных) при среднем значении 6,2, что соответствует слабокислой реакции среды. Воды являются ультрапресными с минерализацией от 28 до 287 мг/л, при среднем значении – 115 мг/л. Низкие содержания солеобразующих элементов Ca²⁺ (среднее – 14,1 мг/л) и Mg²⁺ (среднее – 4,2 мг/л) определяют низкие значения показателя общей жесткости, который изменяется от

очень мягких (0,2 мг-экв/л) до умеренно жестких (3,7 мг-экв/л) при среднем 1,3 мг-экв/л. Как правило, изучаемые воды являются гидрокарбонатными кальциево-магниевыми.

Эоцен-олигоценый ВК пользуется широким распространением в центральной части ЯНАО, является основным источником водоснабжения Пуровского района (Рис. 1). Воды этого ВК являются нейтральными (среднее значение pH – 6,8), ультрапресными с минерализацией от 41 до 357 мг/л, при средних значениях – 131 мг/л, очень мягкими (среднее значение общей жесткости – 1,0 мг-экв/л). В водах эоцен-олигенового ВК так же, как и в водах четвертичного ВК, основными солеобразующими ионами являются Ca^{2+} , Mg^{2+} и HCO_3^- . По химическому типу – это, как правило, гидрокарбонатные кальциево-магниевые воды.

Таким образом, в подземных водах гидрокарбонат-ион является основным анионом, содержание же SO_4^{2-} и Cl^- (а среди катионов и Na^+) имеют сугубо подчиненное значение в составе солей. Однако в подземных водах эоцен-олигенового водоносного комплекса, отобранных в Уренгое, отмечены повышенные содержания хлорид-иона и натрия, концентрации которых достигают 86,7 и 83,8 мг/л соответственно, а их химический тип сменяется на гидрокарбонатно-хлоридный натриевый. И хотя водоносный комплекс считается надежно защищенным от антропогенного воздействия, вероятно, существуют условия, где возможно перетекание из вышележащих водоносных горизонтов, которые в пределах водоносного комплекса имеют тесную гидравлическую связь. По данным [5] практически на всех питьевых и промышленных водозаборах исследуемой территории отмечается техногенное влияние нефтегазового комплекса на пресные подземные воды, которое может проявляться в том числе в повышенных концентрациях Cl^- и Na^+ . Также обращают на себя внимание воды, отобранные из скважин небольшой глубины (от 30 до 50 м), находящихся в пойме р. Оби, на водозаборах в п. Харп и г. Салехард (пункты 2112 и 2114, 2115). В их анионном составе наблюдаются более высокие концентрации SO_4^{2-} , достигая 25,7 мг/л, что отражается на химическом типе вод. Эти воды приурочены к четвертичному ВК, который по сравнению с эоцен-олигеновым считается слабозащищенным от поверхностного загрязнения. Учитывая небольшую глубину скважин и их местоположение, отсутствие серосодержащих соединений во вмещающих породах водоносных горизонтов [1], можно предположить, что существует вероятность загрязнения подземных вод. Однако важно также подчеркнуть, что повышенное содержание сульфатов отмечено на севере региона, где возрастает мощность многолетнемерзлых пород, уменьшается мощность водоносного горизонта и, как следствие, усиливаются процессы вымораживания, которые в конечном итоге могут приводить к увеличению содержаний не только SO_4^{2-} , но и Cl^- [1].

В сравнении с речными водами исследуемой территории [2] подземные воды характеризуются невысокими значениями РОУ (Табл. 1). Также их характерной особенностью является наличие фтора в пониженных содержаниях, концентрации его не превышают 0,3 мг/л. Железо и марганец, напротив, в большинстве случаев присутствуют в водах обоих ВК

в повышенных концентрациях, многократно превышающих ПДК для питьевых вод [3]. В целом же анализ результатов химического состава вод на несоответствие гигиеническим нормативам показал, что по обобщенным показателям качества вод, элементам макро- и микрокомпонентного состава, как правило, превышений относительно ПДК не обнаружено, за исключением единичных случаев. При этом фиксируется одновременное присутствие в одной пробе сверхнормативных и повышенных концентраций таких компонентов, как: PO_4^{3-} , Cl^- , Na^+ и NH_4^+ , что, вероятно, свидетельствует о коммунально-бытовом загрязнении. Однако в подземных водах Западно-Сибирского артезианского бассейна отмечается высокое содержание азотных соединений в аммонийной форме, обусловленное процессами разложения погребенного органического вещества.

Заключение

Таким образом, по результатам изучения основных физико-химических показателей состава пресных подземных вод можно сделать вывод, что общий природный гидрогеохимический облик изучаемых вод определяется, главным образом, такими компонентами, как: гидрокарбонат-ион, кальций и магний. Их низкие концентрации вносят основной вклад в величину общей минерализации, которая по классификации относится к ультрапресному типу вод. Результаты полученных данных по компонентам, чьи концентрации превышают нормативные значения, все же указывают на вероятность загрязнения подземных вод, которые считаются надежно защищенными от источников антропогенного загрязнения. Возможно, это связано с участками нарушения сплошности толщ, перекрывающих водоносные горизонты, а также с расположением эксплуатируемых водозаборных скважин.

Исследование выполнено за счет проекта фундаментальных научных исследования Российской академии наук №0266-2022-0016.

Список литературы

1. Бешенцев В.А. Геохимия пресных подземных вод Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона // Горные ведомости. 2016. № 3-4. С. 94–128.
2. Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Трифонов Н.С., Колубаева Ю.В., Соколов Д.А. Растворенные формы миграции гумусовых кислот в поверхностных водных объектах Ямало-Ненецкого автономного округа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 5. С. 56–69.
3. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
4. Сваровская Л.И., Алтунина Л.К., Яценко И.Г. Гидрохимические исследования водных объектов на территории нефтедобывающих комплексов // Оптика атмосферы и океана. 2018. 31 (6). С. 468–472.
5. Ястребов А.А., Иванов Ю.К. Гидрогеоэкологическая оценка состояния пресных вод Надым-Пурской и Пур-Тазовской нефтегазоносных провинций Ямало-Ненецкого автономного округа в связи с интенсивной разработкой месторождений углеводородов // Литосфера. 2018. 18 (1). С. 140–144.

УДК 556.3

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА УЧАСТКАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

В.В. Кузьмин¹, К.А. Болдырев²

¹ООО «ИнжТехПром», Санкт-Петербург, Россия, E-mail: vlad.v.koosm@gmail.com

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва, Россия, E-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru

Аннотация

Выполнен анализ применимости имеющихся статистических и эмпирических оценок коэффициентов линейной сорбции тяжелых металлов. Показана ограниченность применимости статистических оценок при выполнении прогнозов распространения подземных вод высокой минерализации. Разработана модель определения коэффициентов обмена между растворенной и твердой фазой с использованием методов геохимического моделирования.

Приведены результаты определения коэффициентов линейной сорбции для широкого круга катионов применительно к условиям вытеснения природных вод фильтратом полигонов твердых коммунальных отходов.

Ключевые слова: сорбция, загрязнение подземных вод, участки размещения твердых коммунальных отходов

HYDROGEOCHEMICAL ASSESSMENT OF THE SORPTION BEHAVIOR OF HEAVY METALS AT THE SITES OF THE IMPACT OF MSW LANDFILLS ON GROUNDWATER

V.V. Kuzmin¹, K.A. Boldyrev²

¹Ltd «EngTechProm», Saint Petersburg, Russian Federation, E-mail: vlad.v.koosm@gmail.com

²Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE), Moscow, 113191, Russian Federation, E-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru

Abstract

The analysis of the applicability of the available statistical and empirical estimates of the coefficients of linear sorption of heavy metals is carried out. The limited applicability of statistical estimates in the implementation of forecasts of the distribution of groundwater of high mineralization

is shown. A model for determining the exchange coefficients between the dissolved and solid phase using geochemical modeling methods has been developed.

The results of the determination of linear sorption coefficients for a wide range of cations in relation to the conditions of displacement of natural waters by filtrate of landfills of municipal solid waste are presented.

Key Words: sorption, groundwater contamination, municipal solid waste

Введение

Опыт выполнения работ по оценке воздействия полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) на подземные воды и экспертиз проектов по рекультивации и консервации полигонов ТКО показывает, что в подавляющем большинстве случаев, основание полигонов ТКО со сроком эксплуатации более 30 лет и более, не изолировано в степени, исключающей поступление фильтрата в подземные воды. Еще в большей мере это утверждение относится и к т.н. «участкам несанкционированного складирования отходов».

Следствием этого является негативная трансформация качества подземных вод в области влияния полигонов, выражающаяся в увеличении суммарного содержания солей, загрязнении грунтовых и подземных вод органическими веществами, аммонийными формами азота, нефтепродуктами и тяжелыми металлами. Тяжелые металлы относятся к веществам, для которых сорбция, преимущественно по механизму ионного обмена, являются важнейшими геохимическими процессами, определяющими перенос загрязняющих веществ в водоносных горизонтах.

Ввиду ограниченных ресурсов проектов (прежде всего временных), прогнозы распространения загрязнения в рамках разделов проектов ОВОС и ПМОС выполняются, как правило, с привлечением статистических данных или ранее выполненных эмпирических оценок.

Представляет интерес рассмотрение возможности использования имеющихся параметрических данных и моделей для обеспечения задач прогноза распространения тяжелых металлов на участках загрязнения подземных вод фильтратом полигонов ТКО.

Статистические и эмпирические оценки значений сорбционных свойств тяжелых металлов

В работе [7] приведен обзор коэффициентов линейной сорбции, полученных для широкого ряда элементов, адсорбирующихся по механизму линейной сорбции.

Значения статистических оценок коэффициентов сорбции представлено в табл. 1.

Табл. 1 Значения коэффициентов линейной сорбции K_d для различных типов грунтов, [7].

Элемент	Значения K_d (кг/дм ³)		
	Пески	Суглинки	Глины
Ca	8,9	30,9	47,1
Cd	24,8	86,6	131,8
Fe	394,8	1377,9	2097,2
K	17,9	62,6	95,2
Mn	38,8	135,4	206,1
Ni	86,6	302,4	460,3
Pb	103,1	359,8	547,6
Zn	14,2	49,5	75,3

Применимость рекомендуемых значений коэффициентов сорбции K_d для оценки воздействия фильтрата полигонов на подземные вызывает сомнения. По мнению авторов для фильтрата ТКО значения представленных коэффициентов завышены на порядок и более.

Это связано с тем, представленные статистические значения и эмпирические оценки получены, в основном, для вод относительно низкой минерализации и относительно низкой активностью компонентов в растворе.

Анализ качества фильтрата ТКО показывает, что фильтрат представляет собой минерализованные воды высокой, реже средней минерализации, с концентрацией веществ в растворе от 5,0 до 20,0 г/л и более.

Очевидно, что использование коэффициентов сорбции, полученных для пресных и слабо минерализованных вод, не могут дать достоверную оценку потенциального загрязнения подземных вод применительно к прогнозам распространения фильтрата.

Активности ионов высоко минерализованных вод значительно выше активности соответствующих ионов в пресных растворах. Увеличение минерализации раствора приводит к снижению сорбционных свойств системы вода/порода.

На рис. 1 приведены, полученные авторами зависимости коэффициента линейной сорбции от активности катионов в растворе для некоторых катионов.

Определения были выполнены для суглинков при суммарной емкости катионного обмена $СЕС = 21$ мг-экв/100 г грунта. Представленные на рис. 1 данные демонстрируют существенную обратную зависимость между активностью катионов и коэффициентом распределения между твердой и жидкой фазой. Так, при возрастании активности катионов Cr^{3+} на порядок (от $3,2 \times 10^{-12}$ моль до $5,1 \times 10^{-11}$ моль), значение коэффициента K_d уменьшалось с 192,1 кг/дм³ до 7,1 кг/дм³.

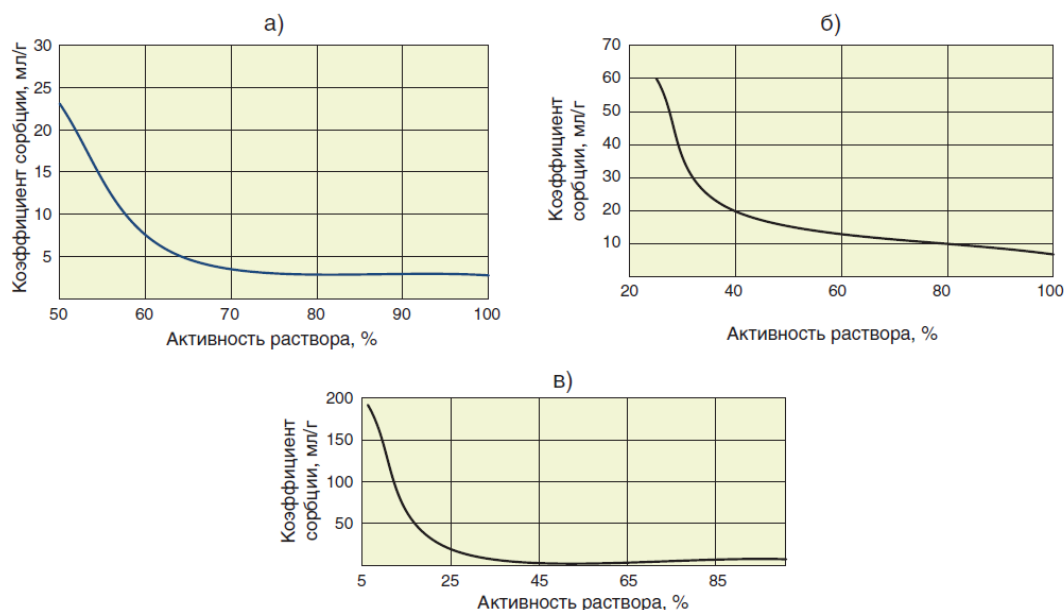


Рис. 1 Зависимость коэффициента линейной сорбции катионов металлов от активности раствора. а- марганец; б- стронций; в хром.

Методы исследований

До недавнего времени, гидрогеохимическое моделирование, помимо вычислительных трудностей, сдерживалось неполнотой или отсутствием термодинамических баз данных, необходимых для количественного описания химических процессов. В особенности это касалось констант равновесия в реакциях катионного обмена на активных участках пород, реакциях образования органических комплексов и твердых комплексов на поверхности оксидов металлов и т.п.

Трудами Parkhurst, Allison, Dzombak и Morel, Ball и Nordstrom, Appelo и Postma и др. [3-6; 8; 9] этот пробел научной базы знаний в значительной степени заполнен.

Термодинамические базы данных, такие, как `llnl.dat`, `minteq.dat`, `wateq4f.dat`, `phreeqc.dat`, дают возможность количественно охарактеризовать основные химические трансформации в системе вода-порода с полнотой, достаточной для выполнения гидрогеохимического моделирования миграции широкого ряда веществ.

Расчеты проводились в программном пакете геохимического моделирования PhreeQC 2.18, который находится в свободном доступе на сайте US EPA.

Модель учитывает сорбцию катионов по механизму ионного обмена, процессы растворения/осаждения веществ, активность веществ в растворенной и твердой фазе, процессов образования органических комплексов металлов в жидкой фазе [1].

Определение сорбционных свойств выполнялось с использованием конвенции Гейнса-Томаса, согласно которой, активность адсорбированных катионов принимается пропорциональной эквивалентной доле адсорбированных на обменных участках катионов.

Для определения значения коэффициентов обмена катионов по отношению к натрию $K_{Na/M}$ были использованы данные, представленные в работе [6].

Активности растворенных компонентов определялись на основе уравнения Дебая-Хюккеля.

При расчетах принимались значения емкости катионного обмена СЕС:

СЕС = 5,0 – мг-экв./100 грамм для песков;

СЕС = 17,0 – мг-экв./100 грамм для суглинистых отложений.

СЕС = 80,0 мг-экв./100 грамм для глин (соответствует емкости монтмориллонитовых глин.

Модельный исследования были выполнены с использованием раствора с суммарным содержанием солей 8463,6 мг/дм³. Модельный состав катионов и анионов отвечает среднему их содержанию в фильтрате полигонов ТКО по статистическим оценкам, табл. 2.

Табл. 2 Состав модельного фильтрата.

Концентрация макрокомпонентов, мг/дм ³								
HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
1235	2150	2576	12	529	578	578	1350	9,8
Концентрация микрокомпонентов, мг/дм ³								
NH ₄ ⁻	Mn ²⁺	Cu ²⁺	Ni ²⁺	Fe ²⁺	Zn ²⁺	Pb ²⁺	Cd ²⁺	Cr ³⁺
2,65	4,5	0,021	0,014	16,6	0,022	0,0073	0,0014	0,0037

Результаты геохимического моделирования

Результаты определения коэффициентов сорбции K_d представлены в табл. 3.

Табл. 3 Значения расчетных коэффициентов сорбции K_d^i для индикаторных показателей в составе фильтрата полигонов ТКО, кг/дм³

СЕС, мг-экв./100 гр.	Значение K_d , кг/дм ³					
	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mn ²⁺
5,0	0,20	0,99	0,99	1,58	2,47	1,31
17,0	0,68	3,4	3,4	5,4	8,5	4,5
80,0	3,24	16,19	16,19	26,20	40,94	21,65
СЕС, мг-экв./100 гр.	Значение K_d , кг/дм ³					
	Cu ²⁺	Ni ²⁺	Fe ²⁺	Zn ²⁺	Pb ²⁺	Cd ²⁺
5,0	1,58	1,58	1,10	2,47	4,39	2,47
17,0	5,4	5,4	3,8	8,5	15,1	8,48
80,0	26,20	26,20	18,19	40,94	72,78	40,94

Сопоставление полученных авторами данных со статистическими оценками, представленными в табл. 1 следует, что использование коэффициентов сорбции, полученных

для относительно пресных вод, в решении задачах оценки распространения фильтрата ТКО, может приводить к весьма существенному завышению сорбционных свойств пород.

Следует отметить, что значения K_d , полученные для осредненного фильтрата и представленные в Таблице 3, могут рассматриваться лишь как оценочные.

Это связано с тем, что разработанная модель катионного обмена не учитывает в явном виде два противоположно направленных процесса.

Первый процесс, снижающий интенсивность адсорбции катионов, связан с наличием в растворе фильтрата прочных органических комплексов. В работе [2] показано, что в водах фильтратов, помимо гуминовых и фульвиновых кислот, в значимых количествах присутствуют функциональные группы: аминогруппы $-NH_2$, амидные $-CO-NH_2$, спиртовые $-CH_2-OH$, альдегидные $-CHO$, карбоксильные $-COOH$, кетонные $-CO-$, метоксильные $-OCH_3$, фенольные $-C_6H_5-OH$, хинонные, гидрохинонные, которые связываются с тяжелыми металлами, увеличивая их подвижность.

Второй процесс, увеличивающий сорбционные свойства пород, связан с замедлением движения катионов, вследствие процессов образования комплексов на оксо-гидроксидах железа и марганца, оксидах кремния, органическом веществе пород.

Заключение

Прямое применение статистических и эмпирических значений коэффициентов сорбции K_d при оценке воздействия фильтрата полигонов на подземные воды не может быть признано корректным. Это связано с тем, что статистические значения и эмпирические оценки характеризуют воды относительно низкой минерализации с низкой активностью компонентов в растворе.

Результаты исследований предлагают рассчитанные коэффициенты линейной сорбции ряда тяжелых металлов, которые могут использоваться, как ориентировочные, при выполнении прогнозов распространения загрязнения в области потенциального влияния фильтрата твердых коммунальных отходов.

Список литературы

1. Болдырев К. А., Кузьмин В. В., Куранов Н. П. Методика расчета выхода тяжелых металлов из слоя донных отложений водоемов Журнал ВСТ, 2016 №6.
2. Глушанкова И.С. Очистка фильтрационных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов на различных этапах жизненного цикла. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Пермь, 2004 г.
3. Allison, J.D., Brown, D.S., and Novo-Gradac, K.J., 1990, MINTEQA2/PRODEFA2-- A geochemical assessment model for environmental systems--version 3.0 user's manual: Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, 106 p.

4. Appelo, C.A.J., and Postma, D., 1993, *Geochemistry, groundwater and pollution*: Rotterdam, A.A. Balkema, 536 p.
5. Ball, J.W., and Nordstrom, D.K., 1991, *User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters*: U.S. Geological Survey Open-File Report 91-183, 189 p. (Revised and reprinted August 1992.).
6. Bruggenwert, M.G.M. and Kamphorst, A., 1982, *Survey of experimental information on cation exchange in soil systems*. In G. H. Bolt (ed.), *Soil Chemistry, B. Physico-chemical models*. Elsevier, Amsterdam, 141-203.
7. D.H. Thibault, M.I. Sheppard and P.A. Smith. *A critical compilation and review of default soil solid/liquid partition coefficients, K_d, for in environmental assessment*. Whiteshell Nuclear Research Establishment Pinawia, Manitoba, Canada ROE ILO, 1990.
8. Dzombak, D.A., and Morel, F.M.M., 1990, *Surface complexation modeling--Hydrous ferric oxide*: New York, John Wiley, 393 p.
9. Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.C., and Plummer, L.N., 1980, *PHREEQE--A computer program for geochemical calculations*: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 80-96, 195 p. (Revised and reprinted August, 1990.).

УДК 556.31+628.16(571.621)

ОПЫТ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ НА ТУНГУССКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ НЕКОНДИЦИОННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В.В. Кулаков¹¹*Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, Россия, E-mail: vvkulakov@mail.ru*

Аннотация

В статье использованы материалы многолетних исследований и изложены результаты изучения природных биогеохимических процессов, идущих в зоне Тунгусского месторождения подземных вод, и изменений, которые вносит в эти процессы внутрипластовая водоподготовка. Охарактеризованы закономерности формирования биогеохимических реакционных зон в водоносном горизонте, а также результаты опытных и пуско-наладочных работ в период строительства водозабора на Тунгусском месторождении подземных вод. Продолжается строительство Тунгусского водозабора с использованием внутрипластовой водоподготовки питьевых подземных вод по технологии SUBTERRA. В основу технологии заложена возможность искусственного создания вокруг водозаборных скважин биогеохимических зон с особыми окислительно-восстановительными условиями. В этих зонах насыщенная кислородом и освобожденная от избыточных концентраций углекислого газа вода закачивается в эксплуатационные скважины для инфильтрации в водоносный горизонт. Растворенный кислород окисляет железо, марганец и другие нормируемые компоненты в подземных водах, которые формируют вторичные минералы в водоносном горизонте. Питьевая подземная вода при откачке из скважин направляется в сборный коллектор водозабора.

Ключевые слова: Тунгусское месторождение, некондиционные подземные воды, удаление железа и марганца в пласте

EXPERIENCE OF IN-SITU WATER TREATMENT AT THE TUNGUSKA RESERVOIR SUBSTANDARD GROUNDWATER

V.V. Kulakov¹¹*Institute of Water and Ecology Problems, FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation, E-mail: vvkulakov@mail.ru*

Abstract

The materials of multiyear research are provided in this article presenting the results of studying the natural biogeochemical processes taking place in the Tunguska groundwater reservoir zone, and the modifications that intraformational in-situ water treatment makes to these processes. The regularities of

the biogeochemical reaction zones formation in the aquifer are characterized, as well as the results of experimental and commissioning works during the construction of the water intake at the Tunguska groundwater reservoir. The construction of the Tunguska water intake using in-situ water treatment of drinking groundwater with SUBTERRA technology is continued. The technology is based on the possibility of artificial creation of biogeochemical zones with special redox conditions around the water intake wells. In these zones, saturated with oxygen and cleared from excess concentrations of carbon dioxide, the water is pumped into production wells for infiltration into the aquifer. Dissolved oxygen oxidizes iron, manganese and other standard components of groundwater, subsurface iron and manganese removal, which form secondary minerals in the aquifer. Drinking groundwater is entrapped out of the wells to the collection header of the water intake.

Key Words: Tunguska reservoir, substandard groundwater, subsurface iron and manganese removal

Введение

В области очистки подземных вод, содержащих избыточные концентрации нормируемых компонентов (Fe, Mn, As, Ni) эффективной технологией является внутрипластовая водоподготовка, успешно применяемая на ряде водозаборов в России уже более 40 лет, а за рубежом известная более 120 лет [1; 3; 6].

Свое развитие в практике обеспечения населения питьевой подземной водой технология водоподготовки питьевых вод в водоносном горизонте получила в 70-е годы 20-го века в странах Западной Европы, когда появилась возможность автоматического управления процессом водоподготовки. К настоящему времени, в основном за рубежом, эксплуатируются несколько тысяч установок обезжелезивания и деманганации подземных вод в пласте. В 1985 году эта технология внутрипластовой очистки подземных вод была принята межведомственной экспертной комиссией ГКНТ СССР, согласована в Минздраве СССР и рекомендована к широкому внедрению [1]

Проблемы использования подземных вод для питьевых нужд населения в бассейне р. Амур (Дальний Восток России) связаны с повышенными концентрациями железа (до 25–70 мг/дм³), марганца (до 3 мг/дм³) и кремния (до 15–30 мг/дм³) [2; 3; 6; 9]. В отличие от подземных вод Европы, подземные воды региона имеют повышенную концентрацию растворенного CO₂ (200–250 мг/дм³) и низкую температуру (около 6°C). Площади распространения некондиционных подземных вод приурочены к артезианским бассейнам и долинам равнинных рек, выполненным рыхлыми аллювиальными отложениями.

Тунгусское месторождение подземных вод расположено в 10 км западнее г. Хабаровска, на междуречье рек Амура и Тунгуски.

Методы исследований

Опытные гидрогеологические исследования по возможности применения технологии водоподготовки питьевых подземных вод в водоносном горизонте аллювиальных отложений долины р. Амура на Тунгусском месторождении проводились в 1993-1995 годах [2]. Были выполнены уникальные опытно-технологические исследования условий очистки подземных вод, как традиционными способами на поверхностных установках, так и геотехнологическим методом – обезжелезиванием и деманганацией подземных вод непосредственно в водоносном горизонте [1; 2]. Выполненными работами доказана возможность очистки подземных вод от этих компонентов непосредственно в водоносном пласте по железу - менее $0,1 \text{ мг/дм}^3$, марганцу – менее $0,05 \text{ мг/дм}^3$ [3].

В 2006 году после изучения многолетнего опыта эксплуатации водозаборов подземных вод с внутрипластовой очисткой от железа и марганца (с начала 1990-х годов) в Европейских странах (Германия, Словакия, Швеция) Водоканалом г. Хабаровска было принято решение о применении при внутрипластовой очистке технологии SUBTERRA (Германия) [6]. По этой технологии аэрированная вода закачивается в водозаборную скважину. После некоторой выдержки в пласте кондиционная питьевая вода, очищенная от нормируемых компонентов, откачивается из этой скважины и подается потребителю.

Тунгусский водозабор с использованием технологии очистки подземных вод в пласте методом SUBTERRA по проектным и технологическим решениям является пионерным в России. Применение автоматизированной системы управления работой водозабора и технологическими процессами по очистке подземных вод в пласте соответствуют современным отечественным и зарубежным требованиям и обеспечивают рациональную и эффективную разработку месторождения.

В ноябре 2011 года осуществлен ввод в эксплуатацию пускового комплекса (1 секция Тунгусского водозабора), производительностью до $25\,000 \text{ м}^3/\text{сутки}$ [6]. Добыча подземных вод после выполнения пуско-наладочных работ по формированию биогеохимического реактора у эксплуатационных скважин с подачей питьевой воды в г. Хабаровск начата в июле 2012 года.

Литологические характеристики водоносных пластов и их изменения вблизи от эксплуатационных скважин изучались по керновому материалу параметрических скважин, пробуренных в 2016-2017 годах, как на отдалении, так и вблизи от эксплуатационных скважин [4; 8]. Кроме того, непосредственно из интервала расположения рабочей части фильтров эксплуатационных скважин отобран материал, полученный путем импульсного гидродинамического воздействия на водоносный горизонт с последующей откачкой.

В процессе исследований качественного состава подземных вод выполнялись многоэлементный химический анализ масс-спектрометрическим и атомно-эмиссионным

методами, анализ растворенного органического углерода, определение растворенных газов, микробиологический анализ, хромато-масс-спектрометрический анализ органических веществ [5; 7; 9; 10].

Результаты и их обсуждения

Геологический разрез и гидрогеологические условия

По данным поисково-разведочных работ, выполненных в 1997-2000 годы, а также при сооружении эксплуатационных и наблюдательных скважин, пробуренных в зонах биогеохимических реакторов в пласте в 2007-2017 годах, основной водоносный горизонт месторождения мощностью около 60 м локализован в плиоцен-нижнечетвертичных песчано-гравийно-галечных аллювиальных отложениях, перекрытых покровными суглинками и глинами мощностью 5-15м. Водоносный горизонт подстилается олигоценowymi водоупорными глинами, аргиллитами и бурыми углями [4; 8; 9].

Водоносные пески месторождения состоят из кварца (40-70 вес. %) и полевого шпата (анортит, альбит, ортоклаз, 20-50 вес. %), к которым в количестве первых процентов примешиваются халцедон, слюды и глинистые минералы. В виде единичных зерен встречаются гранат, пироксены, амфибол и акцессорные – циркон, рутил, сфен. Отмечаются слои, обогащенные растительными остатками и обломочным материалом гравийно-галечной размерности.

Содержание сидерита в песках варьирует от 0 до 14,35 вес.%, увеличиваясь с глубиной. Сидерит кристаллизуется в поровом пространстве водоносного горизонта, иногда практически полностью закупоривая его бурой кристаллической массой с образованием конкреций. Концентрации железа и марганца в валовом составе песков варьируют в пределах 1,93-13,66 и 0,12-1,86 вес. % соответственно. Они изменяются согласованно и коррелируются с количеством сидерита. Поскольку собственные минералы (окислы и гидроокислы) железа и марганца около эксплуатационных скважин не обнаружены, это свидетельство, что они практически в полном объеме входят в состав сидерита.

Во всех пробах водоносных песков отмечается наличие тонкой фракции, состоящей из глинистого материала, аморфного кремнезема, тонкозернистого сидерита и микрообломков преимущественно полевошпатового состава [8]. Ее компоненты имеют как первично осадочную природу, так и представляют собой продукты разрушения минералов песков при взаимодействии с водной средой. Аморфный кремнезем присутствует в виде тонкозернистых хлопьевидных агрегатов. Его содержание колеблется в пределах 5-15 вес.% и не зависит от близости точки опробования к эксплуатационной скважине. Высвобождение кремнезема в процессе разрушения полевых шпатов и других минералов песков, обеспечивает высокое содержание растворенного кремнезема в подземных водах.

Качественный состав подземных вод

Как и для всех подземных вод Среднеамурского артезианского бассейна, для вод Тунгусского месторождения характерны высокие концентрации железа, марганца и кремния, препятствующие использованию этих вод в качестве питьевых, а также высокие концентрации растворенного CO_2 и низкая температура, усложняющие водоподготовку [1; 3; 5; 9].

По составу природные подземные воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые. Общая минерализация подземных вод составляет 127-176 мг/дм³. Величина pH изменяется в пределах от 5,8 до 6,3, Eh – от -30 до 50 mV, органолептически диагностируется наличие сероводорода. Концентрация кремниевой кислоты в воде изменяется от 30 до 65 мг/дм³ (14-20 мг/дм³ по Si), железа в форме Fe^{2+} от 15 до 30 мг/дм³, марганца от 1,4 до 2,1 мг/дм³, содержание нитритов не превышает 0,01 мг/дм³, нитратов 0,4 мг/дм³, фтора 0,04-0,15 мг/дм³, иона аммония до 1-2 мг/дм³. Растворенный кислород в подземных водах месторождения отсутствует. Растворенная углекислота - 190-250 мг/дм³.

В вертикальном разрезе и по площади химический состав подземных вод в междуречье Амура и Тунгуски существенно не меняется, за исключением уменьшения с глубиной концентраций железа и марганца и некоторого роста концентраций кремния.

Подземные воды Тунгусского месторождения являются достаточно агрессивными и весьма сложными с точки зрения водоподготовки [3; 6; 9; 10]. Система «вода-порода» в водоносном горизонте месторождения является неравновесной, что приводит к разрушению матричного материала песков и накоплению в них продуктов разрушения и вторичного минералообразования. При отсутствии внешних воздействий эта система находится в динамическом равновесии.

Технология водоподготовки питьевых вод в пласте

Основы технологии обезжелезивания и деманганации подземных вод в пласте опираются на естественные природные окислительно - восстановительные процессы по созданию искусственных геохимических барьеров за счет насыщения подземной воды кислородом непосредственно в водоносном горизонте. В период эксплуатации водозаборных скважин поддерживается динамическое равновесие (циклы откачки воды сменяются циклами насыщения подземных вод кислородом) таким образом, чтобы содержание железа и марганца в откачиваемой из скважины воде за весь период откачки не превышало нормативного значения. Обезжелезивание и деманганация воды наиболее активно происходят на границе вода-порода, где осуществляются химическая адсорбция, ионный обмен и микробиологические процессы.

Согласно технологии SUBTERRA в природной подземной воде при ее насыщении кислородом происходит окисление и осаждение железа, марганца и некоторых других нормируемых компонентов. Создание аэробных условий вокруг скважин стимулирует рост железо-марганцевых бактерий [1; 3; 5; 6; 7; 9]. В результате на минеральном субстрате

водоносного горизонта образуется пленка из продуктов окисления, которая стимулирует дальнейшую адсорбцию ионов. Таким образом, бактериальная пленка на поверхности пород в водоносном слое образует дополнительный «окисляющий элемент» системы водоочистки. В процессе водоподготовки проводятся многократные циклы аэрирования подземных вод в пласте и откачки воды из скважин.

Для создания вокруг скважин эффективно работающего биогеохимического реактора требуется определенное время, за которое произойдет сорбция кислорода на поверхности частицы пород пласта, в достаточном количестве размножатся железо-марганцевые бактерии, а поверхность минеральных частиц покроется каталитической пленкой нерастворимых форм железа и марганца. Эта пленка образуется за счет отмирающих бактерий.

Осаждение железа происходит преимущественно на периферии биогеохимического реактора, где количество железо-окисляющих бактерий максимально [5; 9]. Перемещаясь потоком подземных вод в направлении фильтра при откачке скважин они поставляют органическое вещество, служащее источником органического углерода для жизнедеятельности марганец-окисляющих бактерий. Эти бактерии развиваются и наиболее активно развиваются во внутренней зоне геохимического реактора вблизи ствола эксплуатационной скважины.

Преимуществом технологии внутрипластовой очистки является и то, что формируемый в пласте биогеохимический барьер, на котором осаждается железо и марганец, является препятствием для поступления к скважинам вредных примесей, транспортируемых вместе с речным фильтратом из р. Амур.

Исследования на пилотной установке

Для уточнения принятых в 2000 году проектных решений и обоснования возможности и целесообразности применения технологии очистки подземных вод в пласте по методу SUBTERRA (Германия) в 2007 году Водоканалом была построена пилотная установка с производительностью 5000 м³/сутки с использованием вновь пробуренных 3 эксплуатационных скважин и 14 наблюдательных скважин.

В составе пилотной установки смонтированы обогатительная установка (оксигенатор и декарбонизатор) с системой трубопроводов и пунктом автоматического управления процессом.

Опытная эксплуатация пилотной установки продолжалась с октября 2007 г. до августа 2011 г. Опытным путем установлено, что такой биогеохимический реактор вокруг скважин начинает работать «на полную мощность» по очистке подземной воды от железа ($\text{Fe} < 0,3 \text{ мг/дм}^3$) через 7 дней, по очистке от никеля – 7 месяцев, а по очистке от марганца ($\text{Mn} < 0,1 \text{ мг/дм}^3$) только через 1,5 года.

Таким образом, в течение 2007-2011 годов на пилотной установке при опытно-промышленной эксплуатации удалось получать питьевую подземную воду, соответствующую нормативным требованиям без использования реагентов и строительства дорогостоящих наземных очистных сооружений.

Пуско-наладочные работы и эксплуатация водозабора

Первый пусковой комплекс (первая секция) Тунгусского водозабора, состоящий из 12 эксплуатационных скважин для отбора питьевой воды, введен в стадию пуско-наладочных работ в ноябре 2011 года.

На пилотной установке, а также при эксплуатации пускового комплекса установлено, что зона осаждения железа в пласте находится на расстоянии около 7 м от скважин и простирается в радиальном направлении до 10–15 м. Зона осаждения марганца приближена к скважинам и расположена в радиусе до 7 м.

В рамках используемой технологии ранее предполагалось, что в зонах биогеохимических реакторов растворенные в воде железо и марганец окисляются до окислов и гидроокислов, которые в тонкодисперсном виде отгоняются потоком закачиваемой воды на периферию, где осаждаются в порах водоносного горизонта и аккумулируются на поверхности водовмещающих пород [4; 8].

Однако минералогические исследования материала из наблюдательных скважин показали, что в них в интервале расположения водозаборных фильтров эксплуатационных скважин окислы и гидроокислы железа и марганца отсутствуют [4; 8]. В то же время в зоне биогеохимических реакторов наблюдается значительное количество тонкокристаллического сидерита. Окисленные соединения железа, образующиеся при внутрипластовом окислении, под воздействием природных бескислородных подземных вод с высоким содержанием CO_2 и низкими значениями pH, преобразуются в Mn-содержащий сидерит. Таким образом, на Тунгусском водозаборе основным коллектором окисленных форм железа и марганца выступают не окислы и гидроокислы, а техногенный тонкокристаллический сидерит, накапливающийся на периферии реакционных зон. Железосодержащие силикаты в этом процессе не образуются. В зонах биогеохимических реакторов у каждой эксплуатационной скважины к этим продуктам добавляются вторичные минералы, которые вместе с твердыми продуктами разрушения и глинистыми минералами образуют специфический нерастворимый в кислотах композит. Этот композит, участвующий в кольматаже прифилтрового пространства эксплуатационных скважин, приводит к увеличению объема твердой фазы в геологическом разрезе водоносного горизонта и снижает пористость песков.

Из минералогических изменений в зоне биогеохимических реакторов после регенерации достоверно зафиксировано лишь резкое уменьшение в составе песков сидерита вплоть до его полного исчезновения в непосредственной близости от фильтров эксплуатационных скважин.

Причиной этого является разложение сидерита при взаимодействии с соляной кислотой, закачиваемой в скважины в процессе регенерации для уменьшения колюматажа фильтров эксплуатационных скважин. Косвенным свидетельством этого процесса являются мощные выбросы углекислоты из наблюдательных скважин, расположенных на расстоянии до 6 м от эксплуатационной [8].

По кусту наблюдательных скважин мониторинга подземных вод, расположенному в центре 1-й секции водозабора, концентрация железа в 2013 году составляла 7-9 мг/дм³, а в 2018 – 2022 годах колебалась в пределах 12–18 мг/дм³. Содержание марганца в подземных водах куста наблюдательных скважин достаточно стабильно и изменяется от 0,6-1,0 до 1-3 мг/дм³ (Рис. 1).

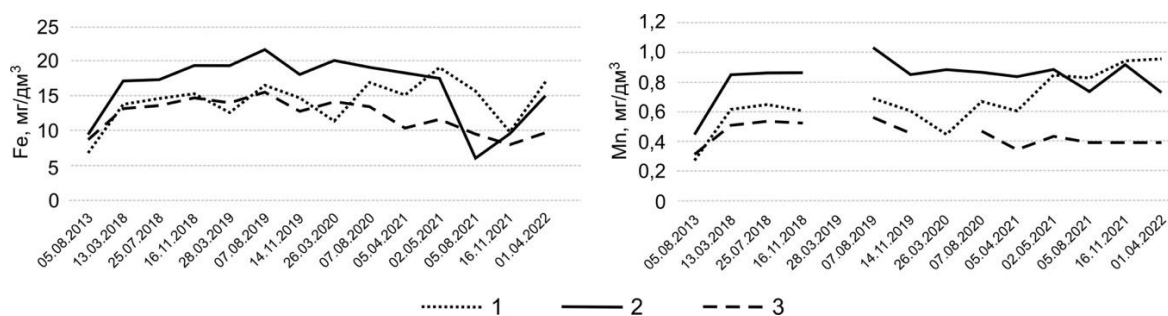


Рис.1 Содержания железа и марганца в подземных водах куста наблюдательных скважин. Глубина интервала размещения фильтров (от – до, м) в наблюдательных скважинах куста (1 – 16-20, 2 – 36-40, 3 – 46-50) и эксплуатационных (от 28,8-33,8 до 33,8-40,7).

По данным результатов анализов водных проб в 2017 – 2022 годах, отобранных на станции 2-го подъема в сборном коллекторе Тунгусского водозабора, величина pH колебалось в пределах 6,1 – 6,5, концентрации железа общего стабильно составляли 0,01 – 0,04 мг/дм³, марганца не превышало 0 – 0,03 мг/дм³.

Как видно из табл. 1, в сборном коллекторе из эксплуатационных скважинах концентрации железа в подземной воде после водоподготовки снижались до 0,1 мг/дм³ и менее в течение 1 года, а концентрации марганца устойчиво были ниже 0,05 мг/дм³ только в последние 5 лет (с 2017 – 2022 гг.). По-видимому, на эпизодическое увеличение содержания марганца в подземных водах отдельных скважин в количестве больше 0,1 мг/дм³ сказывались периодические регенерации рабочей части фильтров, особенно с использованием реагентов.

Таким образом, можно констатировать, что применение на Тунгусском водозаборе метода внутрислоевого очистки подземных вод в модификации SUBTERRA способствует устойчивому процессу водоподготовки питьевых подземных вод.

Табл. 1 Нормируемые компоненты качественного состава подземных вод.

Наименование показателей	pH	Eh	Растворенный кислород	Растворенная углекислота	Mn	Fe	As	Ni	Ba
Единица измерения	Ед.	mV	мг/дм ³						
Предельно допустимая концентрация по СанПиН	6-9	Не нормируется	Не нормируется	Не нормируется	0,1	0,3	0,01	0,02	0,1
Природный состав до начала пилотных исследований в 2000 – 2006 гг.									
	5,9-6,1	-15 - +22	0-1,1	190-250	2,5-2,7	25,0-28,0	0,016-0,035	0,037	0,07-0,11
Качественный состав, достигнутый на пилотной установке водозабора в 2007 – 2010 гг.									
	6,7-7,0	+320-400	7,8 - 10,0	4,0 – 18,0	<0,01	<0,01	<0,002	0,004	0,04-0,06
Качественный состав в сборном коллекторе НС-2 водозабора при эксплуатации в период 2012 – 2022 гг.									
	6,0 – 7,5	+240- 400	1 – 9,7	4,6 – 76,0	0,004 – 0,036	<0,05	<0,005	<0,001	0,013 – 0,020
Качественный состав в кусте № 1151 наблюдательных скважин мониторинга в период 2012 – 2022 гг.									
	5,8 – 6,5	-8 – (-177)	< 1,0	88 - 216	0,5 – 2,5	12,8 – 27,3	0,009 – 0,035	<0,001-0,005	0,07 – 0,146

Заключение

Тунгусский водозабор подземных вод г. Хабаровска является уникальным сооружением по многим позициям. Прежде всего, это высокие природные концентрации в подземной воде железа и марганца, а также запроектированные системы кондиционирования питьевой подземной воды непосредственно в водоносном горизонте (пласте). В мировой практике при проектной производительности, равной 106 тыс. м³/сутки, до настоящего времени такие водозаборы не известны.

Основы технологии обезжелезивания и деманганизации подземных вод в пласте опираются на естественные природные окислительно - восстановительные процессы по созданию искусственных биогеохимических барьеров за счет насыщения подземной воды кислородом непосредственно в водоносном горизонте.

На Тунгусском водозаборе подземных вод основным коллектором окисленных железа и марганца выступают не окислы и гидроокислы, а техногенный тонкокристаллический сидерит, накапливающийся в водоносном горизонте на периферии реакционных зон. Вместе с твердыми продуктами разрушения и глинистыми минералами они образуют специфический нерастворимый в кислотах композит.

Опыт эксплуатации пилотной установки с 2007 года, пуско-наладочные работы и эксплуатация, особенно в период с 2017 по 2022 год, свидетельствуют о достижении основной

цели: устойчивого процесса обезжелезивания и деманганизации некондиционных подземных вод в водоносном горизонте с весьма сложными гидрогеохимическими условиями. В город подается питьевая подземная вода, соответствующая нормативным значениям качества по всем лимитируемым показателям (табл. 1).

Учитывая несомненные экономические преимущества технологии внутрислоевой очистки подземных вод, ее безотходность, экологическую чистоту и безопасность, есть все основания для использования данной технологии в качестве приоритетной при разведке, подсчете запасов некондиционных подземных вод и разработке проектов водозаборов для централизованного обеспечения питьевых потребностей населения городов и поселков.

Автор искренне благодарен сотрудникам МУП г. Хабаровска «Водоканал», а также научным и производственным организациям из России (ИТиГ ДВО РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова), Германии (Дрезденский университет прикладных наук, Берлинский университет технических наук), Словакии и Швеции за конструктивное научно-техническое сотрудничество в период многолетних исследований, проектирования, строительства и эксплуатации Тунгусского водозабора подземных вод.

Список литературы

1. Кулаков В.В. Использование внутрислоевой очистки подземных вод от железа и марганца (на примере г. Хабаровск) // Вестник ДВО РАН. 2013. № 2 (168). С. 84 – 89.
2. Кулаков В.В. Тунгусское месторождение некондиционных подземных вод для водоснабжения Хабаровска – от выбора объекта до начала эксплуатации // Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование, практика: Материалы международной научной конференции: Москва, 22-24 мая 2013 г.: к 60-летию со дня основания кафедры гидрогеологии МГУ им. Ломоносова. М.: МАКС Пресс. 2013. С. 449 – 455.
3. Кулаков В.В. Водоподготовка питьевых вод в водоносном горизонте на Тунгусском водозаборе некондиционных подземных вод в Хабаровске // Водное хозяйство России. 2016. № 2. С. 88 – 97.
4. Кулаков В.В., Бердников Н.М., Крутикова О.В., Архипова Е.Е. Природные и техногенные процессы минералообразования в водоносном горизонте Амуро-Тунгусского междуречья // Тихоокеанская геология. 2019. Т. 38, № 2. С. 63 – 72.
5. Кулаков В.В., Кондратьева Л.М. Биогеохимические аспекты очистки подземных вод Приамурья // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 109 – 118.
6. Кулаков В.В., Стеблевский В.И., Домнин К.В., Тесля В.Г., Хердлицус Й. Опыт промышленной эксплуатации пилотной установки очистки подземных вод на Тунгусском водозаборе // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 7. С. 29 – 35.
7. Braun B., Schreoder J., Knecht H., Szewzyk U. Unraveling the microbial community of a cold groundwater catchment system // Water Research 107. 2016. pp. 113 - 126.
8. Kulakov V.V., Berdnikov N.V. Hydrogeochemical processes in the Tunguska reservoir during in situ treatment of drinking water supplies // Applied Geochemistry 120. 2020. 104683. <http://www.elsevier.com/locate/apgeochem> Applied Geochemistry 120 (2020) 104683. <http://www.elsevier.com/locate/apgeochem>

9. Kulakov, V.V., Fisher, N.K., Kondratieva, L.M., Grischek, T. Riverbank Filtration as an Alternative to Surface Water Abstraction for Safe Drinking Water Supply to the City of Khabarovsk, Russia. In C. Ray and M. Shamrukh (eds.) Riverbank Filtration for Water Security in Desert Countries. Springer Science + Business Media. 2011. T. 103. pp. 281-298.
10. Paufler, S., Grischek, T., Feller, J., Herlitzius, J., Kulakov, V.V. Manganese release linked to carbonate dissolution during the start-up phase of a subsurface iron removal well in Khabarovsk, Russia. Science of the Total Environment. 2019. T. 650. pp.1722-1733.

УДК: 550.4

АЗОТНЫЕ И МЕТАНОВЫЕ ТЕРМЫ ПОДВИЖНЫХ ПОЯСОВ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ДАЛЬНЕЙШИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В.Ю. Лаврушин^{*1}, Г.А. Челноков¹, А.С. Айдаркожина^{1,2},
А.В. Ермаков¹, Л.А. Лямина^{1,2}

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия, E-mail: v_lavrushin@ginras.ru

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: altin.echo@mail.ru

Аннотация

Приводится обзор достижений в области изучения азотных и метановых терм амагматических районов горно-складчатых поясов Северной Евразии (Кавказ, Забайкалье, Тянь-Шань, Памир, Сихотэ-Алинь, Чукотка и др.). Благодаря внедрению аналитических методов, обеспечивающих массовое определение значений $\delta^{15}\text{N}(\text{N}_2)$, $\delta^{13}\text{C}$ в HCO_3 , CO_2 и CH_4 , $\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в H_2O , показано, что помимо атмосферного азота в газах терм часто присутствует избыточный коровый азот - продукт денитрификации органических соединений. Исследования изотопного состава углерода в различных формах CO_2 не выявили в этих водах признаки присутствия мантийных дериватов. Вся углекислота имеет преимущественно атмосферно-биогенное происхождение. В газах термальных вод обнаружен аномально-широкий диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ в CH_4 (от -80 до +44 ‰). Генезис ультра-тяжелого CH_4 ($\delta^{13}\text{C}$ -10...+44 ‰) связывается с микробиальными процессами окисления этого газа.

Исследования изотопного состава O и H в H_2O показали, что в водном балансе терм в основном доминируют инфильтрационные воды дальней циркуляции. Высказана гипотеза, что появление в некоторых районах Северной Евразии высокоминерализованных терм может указывать на самые ранние этапы формирования гидротермальных систем. Их состав со временем будет эволюционировать в сторону снижения общей минерализации воды.

Ключевые слова: азотные термы, генезис компонентного состава вод

NITROGEN AND METHANE TERMS OF THE MOBILE BELTS OF NORTHERN EURASIA: NEW RESULTS AND FURTHER DIRECTIONS OF RESEARCH

V.Yu. Lavrushin^{*1}, G.A. Chelnokov¹, A.S. Aidarkozhina^{1, 2}, A.V. Ermakov¹,
L.A. Lyamina^{1, 2}

¹Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, E-mail: v_lavrushin@ginras.ru

²Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail altin.echo@mail.ru

Abstract

The study of N₂ and CH₄-bearing thermal manifestations in the amagmatic areas of the mountain-folded belts of Northern Eurasia (Caucasus, Transbaikalia, Tien Shan, Pamir, Sikhote-Alin, Chukotka, etc.) is discussed in detail in this article. Using a wide spectrum of isotopes ($\delta^{15}\text{N}(\text{N}_2)$, $\delta^{13}\text{C}$ in HCO₃, CO₂, and CH₄, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$, and $\delta^{18}\text{O}$ in H₂O) it was established that extra crustal nitrogen, which results from the denitrification of organic compounds, is frequently present in thermal gases in addition to atmospheric nitrogen. According to the isotopic composition of carbon in different forms of CO₂ the existence of mantle derivatives in these fluids was not found. As a result, CO₂ has both biological and atmospheric sources. Thermal water associated gases showed an extremely wide range of $\delta^{13}\text{C}$ values in CH₄ (from minus 80‰ to +44‰). The genesis of ultra-heavy CH₄ ($\delta^{13}\text{C} = -10\ldots+44\text{‰}$) is related to microbial gas oxidation.

Isotopic composition of O and H in H₂O show that infiltration waters from long-range circulation predominate in water balance of thermal fluids. The hypothesis is expressed that the appearance of thermal waters with high mineralization in a few regions of northern Eurasia may signify the beginning stages of the establishment of hydrothermal systems. During the evolution of these systems, the mineralization of water will decrease.

Key Words: nitrogen therms, genesis of the component composition of waters.

Введение

Большой вклад в изучение азотных и метановых термальных вод (t от ~20 до 100 °C) внесли работы советских гидрогеологов В.В. Иванова, В.Н. Дислера, Л.Н. Барабанова, Б.Ф. Маврицкого, Н.Н. Славянова, Е.В. Посохова, Г.С. Вартаняна, М.К. Курбанова и многих других. Было показано [2], что эти воды характерны для амагматических районов горно-складчатых систем, и их появление характеризует промежуточный этап между постплатформенной активизацией процессов горообразования и проявлениями магматизма. Считается [1], что формирование таких терм обеспечивается проникновением инфильтрационных вод по разломным нарушениям на глубину до 3-5 км. При этом нагрев воды осуществляется за счет регионального теплового потока. Хотя периодически встречаются и гипотезы о взаимосвязи таких вод с локальными магматогенными термоаномалиями.

Среди естественных термальных водопоявлений наиболее известны азотные термы. Вместе с тем, достаточно широкое развитие в аналогичных геолого-тектонических обстановках имеют и метановые термальные воды. Разница состоит лишь в том, что азотные термы формируются, как правило, в массивах кристаллических пород (гранитов, гнейсов и т.п.), а метановые – в комплексах осадочных пород богатых органическими остатками. Часто выходы термальных вод разного состава располагаются на небольшом удалении друг от друга. Поэтому разделять их на два принципиально разных типа не имеет смысла [6]. Несмотря на длительную

историю исследования этих типов вод до сих пор мало информации об изотопном составе молекулярного азота – основного компонента газовой фазы, почти не изучены изотопные характеристики углерода в метане, углекислоте и в воднорастворенных формах CO_2 . Также отсутствуют обобщающие работы по исследованиям изотопного состава О и Н водной фазы, которые позволяют получить общие представления об условиях и особенностях формирования водного баланса термальных вод. Кроме того, нет единого мнения о причинах появления в некоторых прибрежно-морских регионах (Чукотка, Кавказ) термальных вод с высокой минерализацией воды (до 70-100 г/л).

В рамках этих проблем мы провели обобщение материалов исследования термальных вод горно-складчатых поясов Северной Евразии.

Материалы и методы исследований

Объектами исследования были как естественные термальные источники, так и скважинные воды, локализованные в пределах горных систем Большого и Малого Кавказа, Полярного Урала, Тянь-Шаня, Памира, Сихотэ-Алиня, а также Байкальской рифтовой зоны (Забайкалье) и Северо-Востока Чукотки. Все они были исследованы в разные годы сотрудниками ГИН РАН. В собранных пробах воды и газа исследовался химический состав воды и свободной газовой фазы, изотопные характеристики углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в CH_4 , CO_2 и воднорастворенных формах неорганического углерода (TDIC), изотопный состав азота ($\delta^{15}\text{N}$) в N_2 , $^3\text{He}/^4\text{He}$, в некоторых случаях изотопный состав сульфатной серы ($\delta^{34}\text{S}$), а также изотопные характеристики О и Н воды ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$). Лабораторные исследования выполнялись в научных подразделениях ГИН РАН, ИПРМ РАН, ИСЭЖ РАН и ВСЕГЕИ.

Результаты исследования и их обсуждение

Особенности газового состава. Поскольку речь идет о термах амагматических районов подвижных поясов Земли, то в их газовом составе углекислота занимает подчиненное положение. Как правило, ее концентрация не превышает 1-2 %. Соответственно, основными компонентами газовой фазы в зависимости от особенностей состава водовмещающих пород являются N_2 или CH_4 . Также в виде примеси в составе газовой фазы присутствуют Ar (в концентрациях $> 1\%$ в азотных газах и $< 1\%$ в метановых), гелий и углекислота.

Особенности солевого состава. Термы характеризуются очень разнообразным составом и минерализацией воды. Их минерализация (М) варьирует от $\sim 0,1$ до ~ 100 г/л. Самые низкие М (< 1 г/л) характерны для азотных терм. Такая минерализация воды типична для терм Забайкалья, Памира, Сихотэ-Алиня, Тянь-Шаня и Алтая. Самые высокие значения М ($>> 1$ г/л) встречаются в термах Чукотки, Восточной части Большого и Малого Кавказа, Тянь-Шаня. Часто выходы таких вод тяготеют к побережьям морских (Чукотка) или озерных водоемов (Кавказ, Тянь-Шань) [1].

Встречаются разные химические типы вод. Например, для маломинерализованных терм Байкальской рифтовой зоны, Забайкалья Сихотэ-Алиня, Памира и Тянь-Шаня характерны воды $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na}$ -типов. Минерализованные термы ($>> 1$ г/л) Кавказа Чукотки, Тянь-Шаня относятся к Cl-Na , реже, к Cl-Na-Ca или $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$ -типам вод [1].

Изотопный состав компонентов (N, C, O, H, He) термальных вод. Важной характеристикой флюидных систем, указывающей на их взаимодействие с мантийными дериватами, является изотопный состав гелия ($^3\text{He}/^4\text{He}$). Он позволяет определить генезис гелия, оценив вклады мантийной ($^3\text{He}/^4\text{He}_{\text{мантий}} = 1,2 \times 10^{-6}$) и коровой ($^3\text{He}/^4\text{He}_{\text{коров}} = 1 \dots 10 \times 10^{-8}$) составляющей в составе He. Поскольку азотно-метановые термы, в общем, характерны для домагматических этапов развития подвижных поясов Земли, то в их газах часто, но далеко не всегда, отмечаются коровые значения $^3\text{He}/^4\text{He}$. Однако в некоторых областях (термы Забайкалья, Сихотэ-Алиня, Малого Кавказа, Чукотки) все же фиксируется примесь мантийного гелия ($^3\text{He}/^4\text{He} = 20 \dots 400 (\times 10^{-8})$) [4; 5; 7; 8 и др.]. Однако значения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в этих газах оказываются, как правило, все же ниже, чем в ближайших углекислых источниках, связанных с центрами развития неоген-четвертичного вулканизма. При этом, несмотря на присутствие в газах этих терм мантийного гелия исследования изотопного состава углерода в CO_2 не выявляют примеси мантийной углекислоты ($\delta^{13}\text{C}_{\text{мантий}} = -6 \pm 2$ ‰). Значения $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$ варьируют в диапазоне от -28 до -10 ‰ [4; 5; 7; 8]. Это указывает на биогенную природу CO_2 газов термальных вод.

Этот же вывод подтверждается и исследованиями значений $\delta^{13}\text{C}$ в воднорастворенных формах CO_2 в речных и термальных водах. Они показали [5], что, например, термы Забайкалья в сравнении с речной водой характеризуются такими же или более низкими значениями $\delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3)$.

Изотопный состав углерода метана, присутствующего в газах метановых и азотных терм, варьирует от -80 до +44 ‰. Для газов с высокими концентрациями CH_4 (от ~1 до ~95 %) характерны такие же значения $\delta^{13}\text{C}$, как и в промышленных нефте-газоносных залежах ($\delta^{13}\text{C} \sim$ от -80 до -30 ‰). При этом определения $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ в газах азотных терм ($\text{CH}_4 < 0.2$ %) ранее не выполнялись. Для них нами были получены очень контрастные значения $\delta^{13}\text{C}$. Например, в газах Малого Кавказа (Тальш) они менялись от -57,4 до -8,9 ‰ [4], в газах восточной части Большого Кавказа – от -68 до -22,4‰; Чукотки – от -51,4 до -18,9 ‰ [7]. Формально оперируя стандартными метками $\delta^{13}\text{C}$ для метана осадочных залежей углеводородов (-80...-35 ‰), угольных месторождений (-50...-30‰) и вулканогенных газов (-25... -10 ‰), такому метану азотных терм может быть приписан практически любой генезис. Более того, иногда обнаруживаются значения $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$, которые совсем не вписываются в такую изотопную систематику метана: до -8,9 ‰ (Тальш); +20 ‰ (Восточный Кавказ); -4,5...+16,5 ‰ (Забайкалье) и даже до +44 ‰ (месторождение Кульдур) [данные авторов]. До недавнего времени такие данные воспринимались в качестве лабораторных артефактов. Однако, определения $\delta^{13}\text{C}$ в CH_4

в одном из источников Байкальской рифтовой зоны (ист. Змеиный, $\delta^{13}\text{C}$ до +11 ‰) показали [3], что это не так. Они хорошо воспроизводятся при опробовании в разное время и в разных лабораториях. Предполагается, что положительные значения $\delta^{13}\text{C}$ в CH_4 являются результатом частичного микробиального окисления метана в гидротермальной системе.

Таким образом, данные по $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ в азотных термах нельзя рассматривать в качестве надежного источника информации о генезисе CH_4 . Вместе с тем, наличие в гидротермальных системах микроколичеств изотопно-тяжелого метана ставит новые вопросы, в частности, об участии такого газа в микробиологических, а возможно, и геохимических процессах.

Проведенные в последние годы исследования изотопного состава молекулярного азота в метановых и азотных термах позволили впервые получить представление о генезисе N_2 в термах [4, 5, 7]. Эти исследования показали, что для азотных и метановых терм характерны значения $\delta^{15}\text{N}$ от -5 до +5 ‰. Причем, для собственно азотных вод типичны около нулевые и положительные значения (до +5 ‰), а для метановых - весь диапазон $\delta^{15}\text{N}$.

Таким образом, азот в термальных газах далеко не всегда имеет исключительно атмосферное происхождение, как считалось ранее [1]. Очевидно, что его некоторая часть заимствуется из вмещающих пород. Положительные значения $\delta^{15}\text{N}$ однозначно указывают на коровое происхождение некоторой части N_2 . Происхождение азота с отрицательными значениями $\delta^{15}\text{N}$ менее определено. Теоретически он может иметь даже мантийный ($\delta^{15}\text{N}(\text{N}_2)_{\text{манти}} = -5 \pm 2$ ‰) генезис. Однако сопоставление значений $\delta^{15}\text{N}$ в термальных водах различных регионов (Кавказ, Чукотка) показало, что они часто находятся в зависимости от концентрации CH_4 и/или значений $\delta^{13}\text{C}$ в CO_2 . Это однозначно указывает на биогенную (коровую) природу такого азота. Также было показано, что газы термальных вод в сравнении с газами ближайших нефтегазоносных бассейнов характеризуются более высокими значениями $\delta^{15}\text{N}$. Вероятно, изотопные характеристики азота могут рассматриваться в качестве индикатора условий формирования вод в условиях активного или замедленного водообмена.

Исследования изотопного состава O и H водной фазы дают информацию об особенностях водного баланса и гидрогеологических условиях формирования гидротермальных систем. Почти всегда, фигуративные точки термальных вод на диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ локализуются вдоль глобальной линии метеорных вод, что указывает на доминирующую роль в их водном балансе инфильтрационных вод [4; 5; 7; 8]. При этом часто в сравнении с речными водами термальные характеризуются более низкими значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$. В зависимости от региона данная закономерность трактуется по-разному. В областях развития многолетнемерзлых пород (Чукотка, Забайкалье, Полярный Урал) – предполагается участие талых или древних подмерзлотных вод, а в районах с сильно пересеченным рельефом – вод, область питания которых находится на сотни метров выше области разгрузки. Действительно, при сочетании благоприятных факторов (большое количество атмосферных осадков

и контрастность рельефа) иногда удается доказать присутствие в водном балансе терм как транзитных, так и местных инфильтрационных вод (Рис. 1) [4]. Например, в водном балансе терм Талыша преобладают воды дальней циркуляции, которые частично разбавляются местными инфильтрационными водами (тренд В-Г на рис. 1).

Также эти исследования позволили рассмотреть генезис так называемых «береговых» высокоминерализованных терм ($M = 2 \dots 100$ г/л), которые локализуются на периферии горных сооружений вблизи побережий морей (Чукотка) и крупных внутриконтинентальных водоемов (Каспийского моря, оз Иссык-Куль) [4; 5; 7]. Показано, что в их изотопном составе О и Н почти всегда доминируют изотопно-легкие инфильтрационные воды, в то время как солевой состав наследуется от седиментационных рассолов. Нами была высказана гипотеза, что появление высокоминерализованных терм характеризует самые ранние этапы формирования гидротермальных систем, формирующихся на границе растущих горных сооружений с осадочными бассейнами. При этом в береговых термах полностью отсутствуют признаки вовлечения в их циркуляционные системы ближайших к местам разгрузки озерных или морских вод [4; 5; 7]. Это позволяет исключить из рассмотрения гипотезу о возникновении подобных термальных систем в местах локальных магматогенных термоаномалий.

В целом, наши исследования изотопных характеристик О и Н азотных и метановых терм доказали, что это классические циркуляционные системы, возникающие в областях с сильным перепадом рельефа, движение вод в которых обеспечивается исключительно разницей напоров между областями питания и разгрузки.

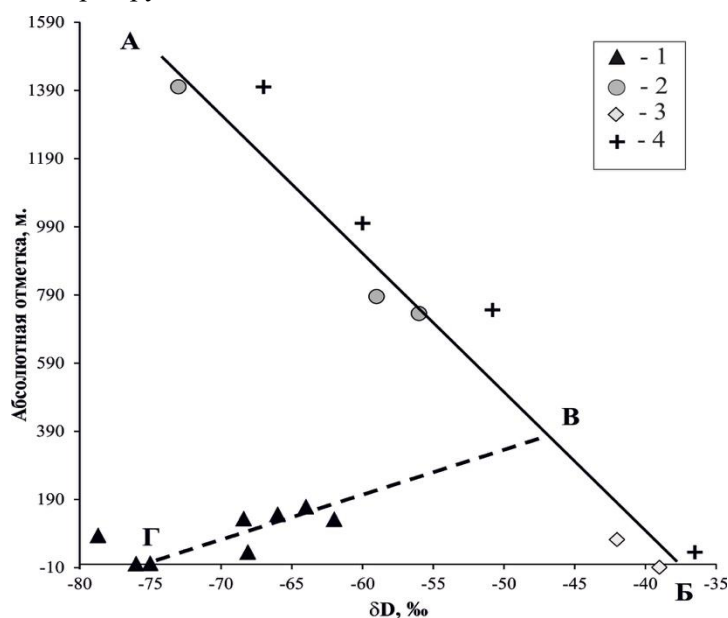


Рис. 1 Соотношения изотопных характеристик водорода вода и абсолютных отметок отбора проб термальных (1), холодных углекислых (2), родниковых (3) и речных (4) вод Талыша (Малый Кавказ).

Линия А-Б – высотная зависимость δD ; В-Г – линия смешения местных инфильтрационных (В) и транзитных (Г) вод.

Заключение

Проведенные исследования позволили получить новую информацию об изотопных характеристиках азота, углерода, угольной кислоты и метана, гелия, водорода и кислорода воды, которые с одной стороны указывают на исключительно инфильтрационный генезис этих водопоявлений и отсутствие вещественного вклада мантийных источников в солевой и водный баланс этих терм. С другой – они открывают новые направления исследований их вещественного состава. В частности, в дальнейшем предстоит выяснить условия образования, геохимические и биологические циклы избыточного азота и ультра-тяжелого метана.

Список литературы

1. Барабанов Л.Н., Дислер В.Н. Азотные термы СССР. М.: «Геоминвод», 1968. 323 с.
2. Дислер В.Н. Возможные направления эволюции угольных вод и азотных терм областей новейшего горообразования // Бюлл. МОИП. 1971. Т. XLVI (3). С. 114-124.
3. Калмычков Г.В., Nachikubo A., Покровский Б.Г., Minami H., Yamashita S., Хлустов О.М. Метан с аномально высокими значениями $\delta^{13}\text{C}$ и δD из прибрежных термальных источников озера Байкал // Литология и полезные ископаемые. 2020. № 4. С. 1-7.
4. Лаврушин В.Ю., Ибрафиллов Ю.Г., Поляк Б.Г. и др. Условия формирования термоминеральных вод Талышской складчатой зоны Малого Кавказа (Азербайджан) по изотопно-химическим данным ($^3\text{He}/^4\text{He}$, $\delta^{13}\text{C}\text{CO}_2$, $\delta^{13}\text{C}\text{CH}_4$, $\delta^{15}\text{N}\text{N}_2$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta\text{DH}_2\text{O}$ и $\delta^{18}\text{O}\text{H}_2\text{O}$) // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 1. С. 58-82.
5. Лаврушин В.Ю., Челноков Г.А., Брагин И.В., Айдаркожина А.С. Изотопно-геохимические особенности ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) азотных и угольных вод Забайкалья // Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. С. 179-183.
6. Маврицкий Б.Ф. Термальные воды складчатых и платформенных областей СССР. М.: Наука, 1971. 243 с.
7. Поляк Б.Г., Лаврушин В.Ю., Чешко А.Л., Киквадзе О.Е. Термы Чукотки. Тр. ГИН РАН, вып. 631. М.:ГЕОС, 2022. 222 с.
8. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 216 с.

УДК 556.314

**ДИНАМИКА ФОСФОРА В РОДНИКАХ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ
ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА****Е.Е. Лапина*¹, Л.Э. Лапина¹**¹*Институт Водных Проблем РАН, Москва, Россия, E-mail: khelena1974@mail.ru***Аннотация**

В последние годы большое внимание уделяется росту фосфатизации окружающей среды. Исследована многолетняя динамика содержания фосфора в родниках прибрежной зоны Иваньковского водохранилища – основного источника питьевого водоснабжения г. Москвы. Статистическими методами установлено, что в водах аллювиального водоносного горизонта (родниковый сток) за последние 17 лет происходит круглогодичный прирост минерального фосфора на 1,5 %, общего - на 1,2 % в год. В теплый период года интенсивность прироста увеличивается и составляет соответственно 2,5 и 1,5 %. Причины возрастания концентраций фосфора могут быть обусловлены как ростом диффузного загрязнения региона, так и климатическими изменениями.

Ключевые слова: минеральный и общий фосфор, родники, Иваньковское водохранилище

**PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SPRINGS OF THE COASTAL
ZONE OF THE IVANKOVO RESERVOIR****E.E. Lapina*¹, L.E. Lapina¹**¹*Water Problems Institute RAS, Moscow Russian Federation, E-mail: khelena1974@mail.ru***Abstract**

In recent years, much attention has been paid to the growth of environmental phosphatization. The long-term dynamics of the phosphorus content in the springs of the coastal zone of the Ivankovo reservoir, the main source of drinking water supply in Moscow, has been studied. Statistical methods have established that in the waters of the alluvial aquifer (spring runoff) over the past 17 years there has been a year-round increase in mineral phosphorus by 1.5%, total - by 1.2% per year. In the warm period of the year, the intensity of growth increases and amounts to 2.5 and 1.5%, respectively. The reasons for the increase in phosphorus concentrations can be due to both an increase in diffuse pollution of the region and climate change.

Key Words: mineral and total phosphorus, springs, Ivankovo reservoir

Введение

Иваньковское водохранилище (р. Волга по линии Тверь – Дубна) как основной источник водоснабжения Москвы имеет стратегическое значение, что подразумевает отслеживание качества его притоков и подземных вод. Питающие его подземные воды подразделяются на грунтовые и напорные. Напорные воды хорошо защищены от проникновения загрязняющих веществ с дневной поверхности. Грунтовые воды являются более уязвимыми. Сравнение данных двух площадных гидрохимических съемок грунтовых вод по периметру водохранилища выявило увеличение концентраций фосфора за период 1999 – 2019 гг. [4; 8].

Среди имеющихся водоносных горизонтов в четвертичных отложениях водосбора Иваньковского водохранилища наиболее уязвим аллювиальный (в пределах надпойменных террас может рассматриваться как объединенный аллювиально-флювиогляциальный). Именно отклик аллювиальных вод на внешнее воздействие является наиболее показательным. Известно, что **интегральную характеристику химического состава грунтовых вод отражает родниковый сток** [2; 3]. В долине р. Волги от Твери до Дубны сток приурочен к основанию II и III цокольных террас, к границе аллювиальных песчаных отложений с подстилающими моренными суглинками.

В географическом отношении регион приурочен к южной части Верхневолжской низины с Иваньковским водохранилищем в центре. Район работ занимает северо-западную часть Московского артезианского бассейна. Рельеф слаборасчлененный, абсолютные отметки поверхности меняются в диапазоне 124-149 м [3]. Климат региона умеренно-континентальный, среднегодовая температура воздуха – 3,8°C, среднемесячная температура самого холодного месяца -9,8°C. За последние 30 лет установлен рост зимних температур воздуха на 0,04°C в год [5].

Методы исследований

В основу исследования легли собственные данные многолетних наблюдений за химическим составом вод опорных родников в период 2006 – 2022 гг. Применены методы полевых исследований и статистического анализа.

В родниках гидрохимические характеристики определялись круглогодично дважды в месяц. Проанализированные содержания соединений фосфора наблюдались в воде нисходящего родника контактного типа, расположенного в реликтовом сосновом бору. Родник считается фоновым, выходит в борту террасы Волги [3].

Химические анализы выполнены в аккредитованной лаборатории филиала Института водных проблем РАН - Иваньковской научно-исследовательской станции. Концентрации $P_{\text{общ}}$ и PO_4^{3-} определены фотометрическим методом с использованием молибдата аммония и аскорбиновой кислотой в фильтрованных пробах.

Результаты и их обсуждения

Для статистического анализа число членов выборки составило 260 определений по каждому показателю, период наблюдений 2006 – 2022 гг. Аналогично методике обработки данных площадных съемок грунтовых вод [4] сначала обработан весь массив данных, затем отдельно блоки по сезонам. Методом наименьших квадратов находили уравнение прямой, наиболее корректно описывающее данные измерений, где в качестве независимой переменной выступает время. Угловой коэффициент дает скорость роста того или иного соединения, свободное слагаемое – его значение в начале времени наблюдений (Табл. 1).

Табл. 1 Аппроксимация значений минерального (x) и общего (y) фосфора.

п	Уравнение	Период
260	$x = 0,0010 t + 0,0671$ $y = 0,0012 t + 0,1021$	Весь год
134	$x = 0,0015 t + 0,0617$ $y = 0,0016 t + 0,1028$	Теплый период
126	$x = 0,0004 t + 0,0735$ $y = 0,0009 t + 0,1014$	Холодный период

Примечание: $t = 0$ – 2006 г., измеряется в годах

Холодный период определен с октября по март, теплый период – с апреля по сентябрь. Простые расчеты показывают, что годовой прирост минерального фосфора за год составит 1,5 %, общего фосфора – 1,2 %. Из величин угловых коэффициентов прямых очевидно, что скорость роста значений фосфора летом в сравнении с зимой больше (Табл. 2).

Табл. 2 Прирост (%) минерального (PO_4^{3-}) и общего (Р общ) фосфора по сезонам.

Сезон	PO_4^{3-}	Р общ
Зимняя межень, 2006 – 2021 гг.	0,5	0,9
Летняя межень, 2006 – 2022 гг.	2,5	1,5

Величина общего фосфора зимой растет несколько быстрее, чем минерального, а в теплый период – наоборот, что может быть связано с потеплением зим и ростом количества оттепелей.

Возрастание фосфатизации компонентов окружающей среды (почвенного покрова, грунтовых и поверхностных вод) отмечается учеными разных специальностей, выдвигаются гипотезы о причинах, ускоряющих этот процесс, как климатических, так и антропогенных [6; 7]. Увеличение концентраций общего фосфора в родниковых водах за весь период исследований в родниковых водах очевидно (Рис. 1). Здесь временная динамика Р общ представлена уже в сутках, где $t = 1$, дата 1 января 2006 г.

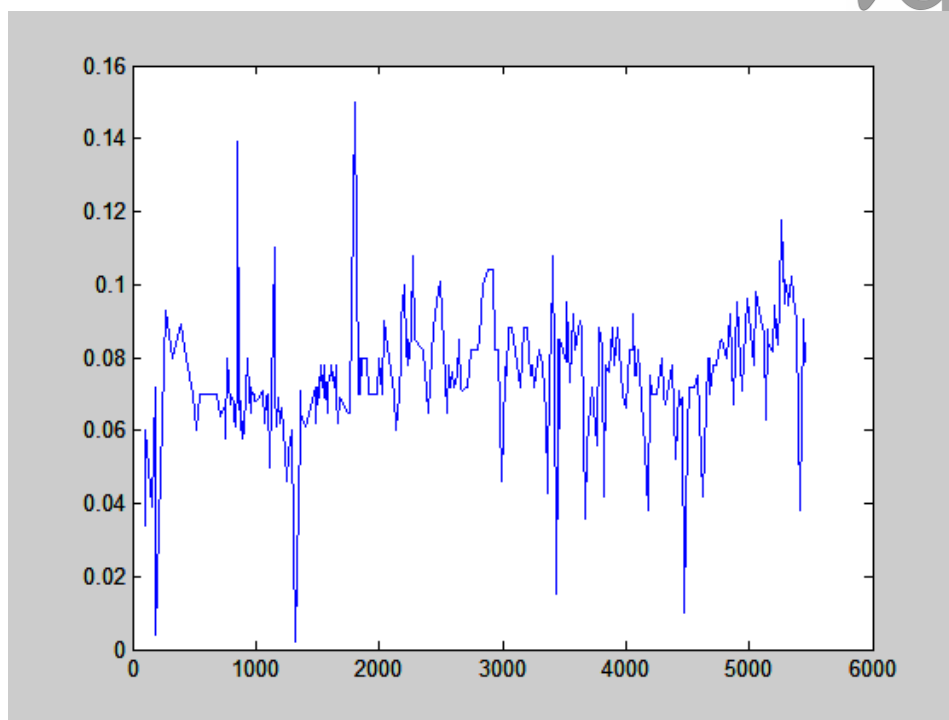


Рис. 1 Временной ряд данных измерений $P_{\text{общ}}$, период 2006 -2022 гг.

Рост количества осадков и, соответственно, увеличение инфильтрационного питания подземных вод в Верхневолжском и близком к нему Московском регионе показан в работах [1; 5]. Сравнение внутригодового хода концентраций общего фосфора в воде родника в годы разной водности подтверждает относительно быстрое поступление фосфатов на уровень грунтовых вод с дневной поверхности, особенно при песчаном сложении зоны аэрации (Рис. 2)

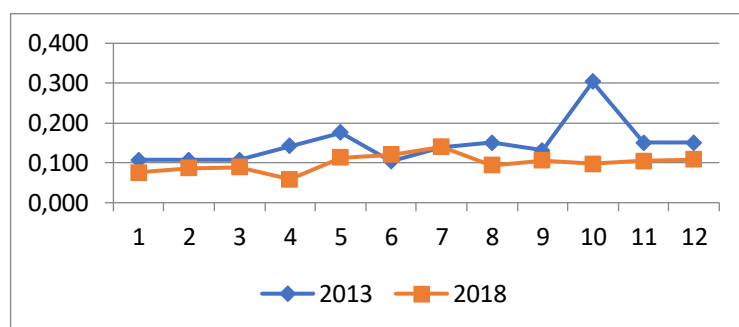


Рис. 2 Внутригодовой ход $P_{\text{общ}}$ (мгР/л) в многоводном (2013) и средневодном годах (2018).

Увеличение концентраций в воде родника имеет наибольший градиент в теплый период года и составляет 2,5 % для минерального фосфора и 1,5 % $P_{\text{общ}}$. В колодцах рост $P_{\text{общ}}$ за 20 лет летом составил 1,2% в год [4], что свидетельствует в пользу гипотезы об активизации биогеохимических процессов в почве в связи с ростом температур воздуха, когда подвижный фосфор начинает поступать из ранее накопленного резерва.

Закключение

Статистическими методами установлено, что в водах аллювиального водоносного горизонта (родниковый сток) с 2006 по 2022 гг. в береговой зоне Иваньковского водохранилища происходит круглогодичный прирост минерального фосфора на 1,5 %, общего - на 1,2 % в год. В теплый период года интенсивность прироста увеличивается и составляет соответственно 2,5 и 1,5 %. Уточнение причин интенсификации роста фосфора в родниковых водах требует дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002

(№ государственной регистрации Государственного задания ИВП РАН 122041 100236-4).

Список литературы

1. Гриневский С.О., Поздняков С.П. Ретроспективный анализ влияния климатических изменений на формирование ресурсов подземных вод // Вестн. Моск. Ун-та. сер. 4. Геология. 2017. № 2. С. 42 – 51.
2. Злобина И.Л., Медовар Ю.А., Юшманов И.О. Трансформация состава и свойств подземных вод при изменении окружающей среды. М.: Изд-во «Мир науки». 2017. URL: <http://izd-mn.com/PDF/21MNNPM17.PDF>
3. Лапина Е.Е., Ахметьева Н.П., Кудряшова В.В. 2014. Родники долины верхней Волги и ее притоков: условия формирования, режим, охрана. ООО «Купол», Тверь. 256 с.
4. Лапина Е.Е., Кудряшова В.В., Лапина Л.Э. Изменения химического состава грунтовых вод вокруг Иваньковского водохранилища за 20 лет// Экологический мониторинг и моделирование экосистем. 2023. № 1-2. С. 18 – 37.
5. Лапина Л.Э., Григорьева И.Л. Анализ изменения температуры воздуха и суммы осадков по данным метеостанций Старица и Тверь за многолетний период //Вестник ТвГУ, серия "география и геоэкология". 2020. № 3(31). С.57-78
6. Титова В.И., Варламова Л.Д., Дабахова Е.В., Бахарев А.В. Изучение фосфорных удобрений и фосфатного состояния почв//Агрохимический вестник. 2011. № 2. С. 3 -6.
7. Шилькрот Г.С. О миграции фосфора и других химических элементов с грунтовым стоком в сельских ландшафтах // сб. н. трудов конф. «Научное обеспечение реализации водной стратегии РФ на период до 2020 г. КНЦ РАН, 2015. С. 386 – 394.
8. Lapina Elena, Lapina Larisa, Kudrajshova Vera. Transformation of the groundwater composition in coastal zone of the Ivankovo reservoir during 20 years. Engineering geology and hydrogeology, 35, Sofia, 2021, pp. 3-14.

УДК 556.314

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ ВОДОРОДА, КИСЛОРОДА И УГЛЕРОДА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

О.Е. Лепокурова*¹, И.С. Иванова¹

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, Россия,
E-mail: LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Аннотация

На основе полученных изотопных данных установлено, что для каждого водного объекта (почвенные воды, просадки, озера, реки, подземные воды) характерны индивидуальные интервалы значений δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$, что свидетельствует о разной специфике их формирования. Все изученные природные воды по генезису являются метеорными. В поверхностных водах на изотопный состав оказывают влияние процессы испарения и условия питания вод. Имеются два источника CO_2 в водах: биогенный и атмосферный, преобладание одного из них зависит от размера водного объекта и интенсивности движения вод. Доля участия талых вод в подземных водах выше, что еще раз подтверждает их криогенную метаморфизацию. Видимо с последним фактом связан встречающийся в водах тяжелый гидрокарбонат-ион, однако это требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: поверхностные и подземные воды, стабильные изотопы, арктические районы, Ямало-Ненецкий автономный округ, генезис, мерзлота.

STABLE ISOTOPES OF HYDROGEN, OXYGEN, AND CARBON IN NATURAL WATERS OF THE YAMAL-NENETS AUTONOMOUS REGION

O.E. Lepokurova*¹, I.S. Ivanova¹

¹Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russian Federation, E-mail: LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Abstract

On the basis of the obtained isotope data, it was established that for each water body (soil water, subsidence, lakes, rivers, groundwater) individual intervals of δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$ values are characteristic, which indicates different specifics of their formation. All studied natural waters are meteoric in origin. In surface waters, the isotopic composition is influenced by evaporation processes and water supply conditions. There are two sources of CO_2 in waters: biogenic and atmospheric, the predominance of one of them depends on the size of the water body and the intensity of water

movement. The proportion of meltwater in groundwater is higher, which once again confirms their cryogenic metamorphization. Apparently, the heavy hydrocarbonate ion found in the waters is associated with the latter fact, but this requires further study.

Key Words: Surface and ground waters, stable isotopes, arctic regions, Yamalo-Nenets Autonomous Region, genesis, permafrost.

Введение

В условиях потепления климата, которое наиболее интенсивно проявляется в северных широтах, изотопные анализы все чаще используются для оценки вклада талых вод, образующихся при деградации многолетнемерзлых пород, в баланс общего водного стока. На территории ЯМАО уже проводились работы по изучению стабильных изотопов поверхностных (речных, озерных, почвенных, вод просадок и даже снега) вод для понимания доминирующих процессов образования стока в условиях, подверженных влиянию многолетней мерзлоты [1–3]. Результаты показали тесную гидравлическую связь между поверхностными водными объектами и ландшафтом, а также тесную связь с сезонностью. Целью данных исследований было получить дополнительные сведения об изотопном составе водных объектов арктических районов Западной Сибири, подверженных влиянию многолетней мерзлоты, включая и подземные воды зоны активного водообмена, с использованием стабильных изотопов H, O, C.

Объект и методы исследований

На особенности природных условий арктической зоны Западной Сибири влияют широко распространенная многолетняя мерзлота, близость холодного Карского моря, обилие болот, озёр и рек. Почвенный покров в основном представлен торфяными, преимущественно олиготрофными почвами. В геологическом разрезе преобладают осадочные породы, перекрытые четвертичными озерными и речными отложениями песка, ила и глины [1; 3]. Питание рек в основном происходит за счет осадков, преимущественно снеговых, в меньшей степени дождевых, а также за счет болотно-грунтовых вод. Водно-болотный и озерный покров может варьировать от 20 до 80 процентов в течение года, в зависимости от сезонных гидрологических условий. Замедленный круговорот веществ в условиях низких температур и заболоченность водосборов способствуют накоплению в поверхностных водах широкого спектра органических веществ. Основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения являются подземные воды четвертичного и эоцен-олигоценного водоносных комплексов, представленные разноразмерными песками и алевритами. Подземные воды приурочены к над-под-межмерзлотным и сквозным таликовым зонам, напорные. Питание подземных вод происходит в основном в летний период за счет инфильтрации атмосферных осадков [4].

Полевые исследования проходили в течение трех лет, в августе-сентябре 2020-2022 гг. Всего на изотопный анализ было отобрано 43 пробы воды: 9 речных, 11 озерных, 2 почвенных вод и 3 вод просадок (начальная стадия образования термокарстовых озер), а также 18 подземных вод из скважин на хозяйственно-питьевое водоснабжение (Рис. 1).

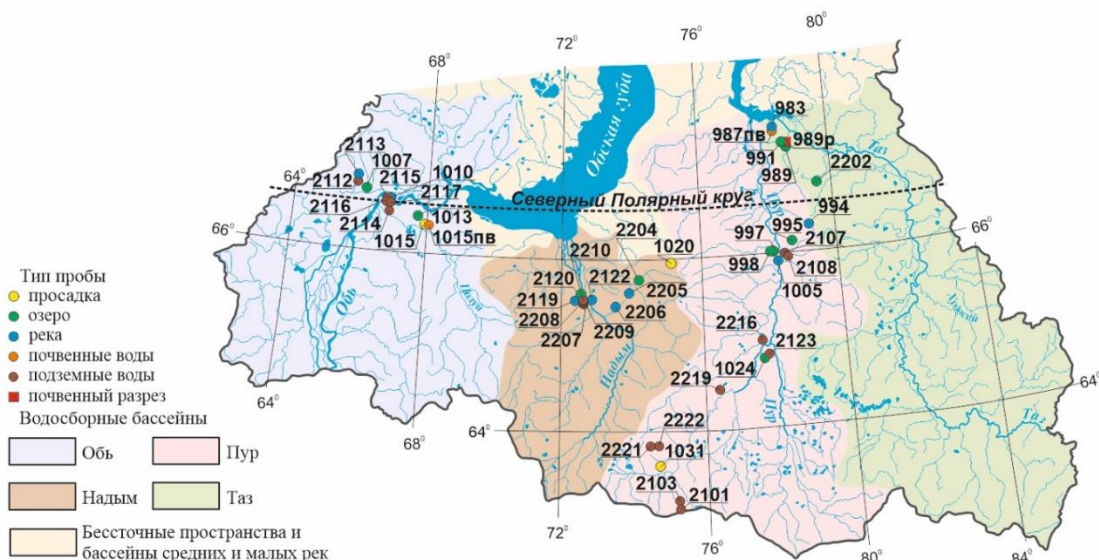


Рис. 1 Схема отбора проб в регионе.

Изотопный состав кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты (DIC) был проанализирован в Институте геологии и минералогии СО РАН с использованием масс-спектрометра FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II.

Результаты и их обсуждения

Химический состав природных вод кратко можно охарактеризовать следующим образом.

Поверхностные воды. Практически повсеместно преобладают ультрапресные (минерализация от 2 до 130) воды с высокими концентрациями РОВ ($C_{орг}$ до 122 мг/л) и широким диапазоном значений pH от 3,9 до 7,9. В направлении просадка – озера – реки увеличивается минерализация и pH вод, но уменьшается концентрации РОВ, состав вод меняется от сложного органо-сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатного аммонийно-кальциево-натриевого (болота, просадки) до гидрокарбонатного кальциевого (реки) [5].

Подземные воды зоны активного водообмена. Воды пресные с минерализацией от 29 до 357 мг/л, pH от 5,5 до 7,9, температура 2–5°C. При этом большинство проб воды по составу гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 29–289 мг/л, отобраны с глубин 10–180 м. Лишь три пробы подземной воды имеют содовый состав с повышенным содержанием хлор-иона (до 87 мг/л), соленостью 191–357, с глубин 100–244 м. Концентрации органических веществ

значительно ниже, чем в поверхностных водах – 0,6–12,7 мг/л. Криогенная метаморфизация подземных вод в следствии многократного промерзания и оттаивания отложений верхнего этажа ведет к постоянным колебаниям минерализации, росту Na^+ и Cl^- ионов [4].

Фигуративные точки по изотопному составу воды разных водных объектов (Таблица) нанесены на диаграмму δD – $\delta^{18}\text{O}$ (Рис. 2а), чтобы сравнить с глобальной и локальной [1] линиями метеорных вод, а также с данными по снегу региона [2] (Рис.).

Табл. 1 Изотопный состав природных вод и водорастворенного углерода ЯНАО.

Водный объект	Кол-во проб	$\delta^2\text{H}$, ‰ (VSMOW)	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ (VSMOW)	d_{exs} , ‰	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, ‰ (VPDB)
Почвенные воды	2	$-110,2 \dots -106,2$ -108,2	$-15,3 \dots -15,0$ -15,1	$12,6 \dots 14,1$ 13,8	$-23,5 \dots -17,9$ -20,7
Воды просадок	3	$-101,3 \dots -89,6$ -94,5	$-14,0 \dots -11,6$ -12,6	$2,9 \dots 10,9$ 6,3	$-23,0 \dots -19,5$ -21,7
Озерные воды	11	$-101,6 \dots -69,3$ -87,2	$-14,1 \dots -7,3$ -10,2	$12,1 \dots 11,3$ -5,2	$-25,9 \dots -6,0$ -14,8
Речные воды	9	$-126,8 \dots -100,0$ -111,7	$-16,9 \dots -12,3$ -15,1	$-1,3 \dots 18,7$ 9,2	$-17,2 \dots -3,9$ -10,4
Подземные воды зоны активного водообмена	18	$-135,2 \dots -117,2$ -128,2	$-19,6 \dots -15,9$ -17,7	$4,3 \dots 21,5$ 13,4	$-30,4 \dots -15,3$ -20,3
					$-4,1 \dots -13,7$ -8,1

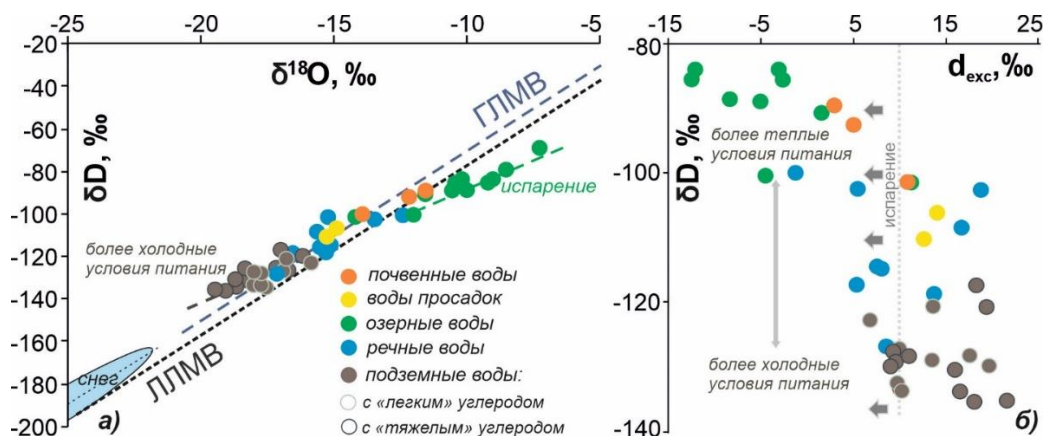


Рис. 2 Соотношение значений: а) δD и $\delta^{18}\text{O}$ для природных вод ЯНАО с нанесением глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ), локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ), б) δD и d_{exs} .

Поверхностные воды. При сравнении полученных результатов по всем водным объектам, очевидно наиболее выраженное обогащение вод озер O^{18} («изотопный кислородный сдвиг»), что вызвано фракционированием при испарении. Более отчетливо о наличии неравновесных процессов формирования влаги (процесса испарения) можно судить по величине дейтериевого эксцесса (Табл. 1, Рис. 2б). В наибольшей степени они проявились в водах рек и просадок, т.е. для всех открытых водоемов, характеризующихся аэробными условиями.

При этом, речные и почвенные воды, иногда воды просадок, в сравнении с другими водными объектами имеют более легкий изотопный состав δD (Рис. 2б) и $\delta^{18}O$, т.е. формировались в более холодных условиях. Для речных вод это связано с более активным движением водных масс, для почвенных и вод просадок, видимо, с влиянием талых вод. Озёрные воды формируются в застойном режиме, вода успевает нагреться и для них в большей степени проявляются эффекты эвапотранспирации [3].

Подземные воды. Имеют более легкий изотопный состав по сравнению с поверхностными водами региона (Рис. 2а), особенно облегчение заметнее по O^{18} , и приближены к данным по снегу. Это свидетельствует о более холодных условиях питания вод, т.е. в их формировании в большей степени участвовали талые воды.

В водах, обогащенных органическим веществом, кроме изотопного состава самого растворителя важно было изучить изотопный состав водорастворенного углерода $\delta^{13}C(HCO_3^-)$ или $\delta^{13}C_{DIC}$.

Поверхностные воды. Результаты показали (Табл. 1), что интервал значений $\delta^{13}C_{DIC}$ очень широкий: от -25,6 до -3,9‰, и в данных условиях указывают на наличие двух источников углекислоты: легкой биогенной (от -25,6 до -15,6‰) и тяжелой атмосферной (от -11,0 до -3,9‰). При этом, в почвенных водах и водах просадок однозначно присутствует только биогенный источник CO_2 . В данном случае можно сказать, что DIC формировался в восстановительной среде с большим содержанием органических веществ. Речные и озерные воды характеризуются уже более тяжелыми значениями $\delta^{13}C$, указывающий на смешанный источник CO_2 . Для мелких озер (с площадью менее 100 тыс. м²) (Рис. 3а) и в истоках и заводях рек, насыщенных органическим веществом и малоинтенсивным перемешиванием вод (застойные воды – низкая скорость обмена углекислотой с воздухом) вклад биогенной углекислоты в DIC существенно выше. В крупных водоемах с интенсивным течением воды и большой площадью зеркала (реки и крупные озера) вклад атмосферной углекислоты в общий баланс DIC будет большим.

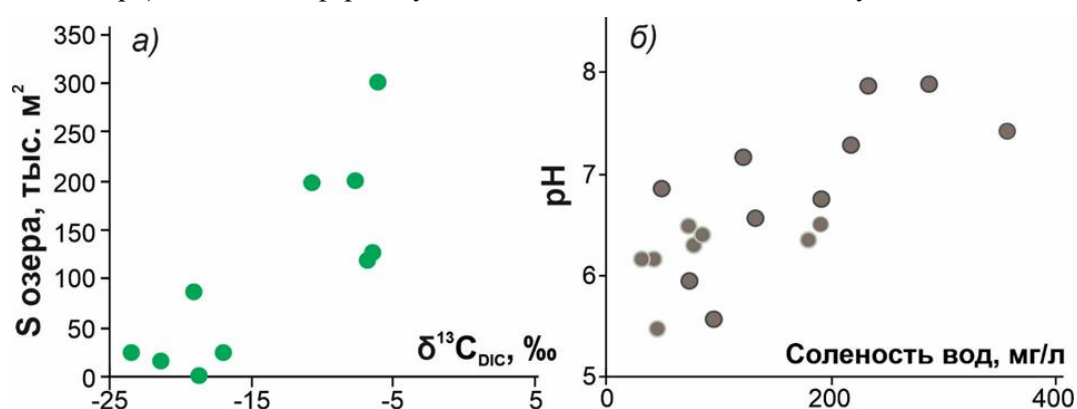


Рис. 3 Зависимость значений $\delta^{13}C_{DIC}$ вод от: а) площади озерных вод, б) значений солености и рН подземных вод. Условные см. на рис. 2.

Подземные воды. Интересные данные получены по подземным водам зоны активного водообмена. Интервал значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ еще шире: от -30,4 до -4,1‰, где ожидаемо должен быть только легкий биогенный CO_2 . В качестве «утяжелителя» не может уже выступать атмосферный CO_2 . Однако и тяжелая глубинная углекислота, и тяжелая карбонатная углекислота, в данных гидрогеологических условиях не могут проявляться. Чтобы разобраться в этом, отдельно рассмотрены особенности вод с легким и тяжелым $\delta^{13}\text{C}$. Небольшие корреляционные связи $\delta^{13}\text{C}$ обнаружены с pH, минерализацией (Рис. 3б) и гидрокарбонат-ионом (все с коэффициентом корреляции по 0,44), а также с сульфат-ионом (-0,49). Не выявлены зависимости вертикальные и широтные. Возможные причины утяжеления состава углерода связаны с особенностями криогенной метаморфизации состава вод, а также микробными процессами. Однако требуются более детальные исследования.

Заключение

Общая схема распределения изотопов в природных водах ЯНАО следующая. Почвенные воды по изотопному составу близки к метеорным, а в формировании HCO_3^- принимает участие только биогенный CO_2 . В водах просадок и речных водах уже начинают проявляться процессы испарения, на что указывают утяжеление $\delta^{18}\text{O}$ и уменьшение параметра d_{exs} . В озерных водах процессы испарения становятся еще более очевидными. При этом для просадок остается преобладающим биогенная углекислота, а в речных и озерных водах, с увеличением размера озер и интенсивности потока движения, начинает принимать активное участие атмосферная утяжеленная углекислота. Подземные воды имеют более легкий изотопный состав по сравнению с поверхностными водами региона, что говорит о большей доле участия талых вод. Остается открытым вопрос поступления изотопно-тяжелого CO_2 в подземные воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (номер соглашения в ГИИС «Электронный бюджет» 075-15-2022-241).

Список литературы

1. Ala-Aho P. et al. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape // Journal of Hydrology. 2018. V. 556. P. 279–293.
2. Васильчук Ю.К. и др. Изотопно-кислородный и дейтериевый состав снежного покрова Западной Сибири на профиле от Томска до Обской губы // Доклады академии наук. 2016. Т.471. №5. С.590–594.
3. Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Пыряев А.Н. Использование стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования поверхностных водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. №6.
4. Бешенцев В.А., Семенова Т.В. Подземные воды севера Западной Сибири (в пределах Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона). – Тюмень: Из-во ТюмГНУ, 2015. 244 с.

5. Солдатова Е.А., Иванова И.С., Колубаева Ю.В., Соколов Д.А. Особенности формирования химического состава поверхностных вод арктических территорий Западной Сибири // Геохимия. 2022. Т. 67. № 11. С. 1142–1156.

УДК 550.46, 551.49

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ СТРОНЦИЯ В ПИТЬЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ НА УДАЛЕНИИ ОТ МОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

А.И. Малов^{1*}, Е.С. Сидкина², Д.Д. Ершова¹, Е.В. Черкасова²

¹ *Федеральный исследовательский Центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаврова УрО РАН, Архангельск, Россия, E-mail: malovai@yandex.ru*

² *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия*

Аннотация

Установлены закономерности формирования высоких концентраций Sr в пресных подземных водах, используемых для водоснабжения, в зависимости от времени их пребывания в водоносном горизонте карбонатных отложений. В среднем за каждую тысячу лет концентрация Sr увеличивается на 2,1-3,5 мг/л, а минерализация воды на 70-320 мг/л. Кроме того, высокие концентрации Sr коррелируют с повышением отметок рельефа, глубин скважин и снижением Eh. Они связаны с растворением значительных образований целестина и стронцианита, вплоть до их рудопроявлений. Этим обусловлены повышенные значения индексов насыщения (SI) для целестина и стронцианита до -1,42 и 2,05 соответственно и корреляция их с минерализацией воды, а также отсутствие корреляции между минерализацией воды и SI для основных породообразующих минералов. Низкие концентрации Sr не коррелируют с возрастом подземных вод и глубиной скважин и тяготеют к понижениям рельефа с практическим отсутствием вышележащих отложений и положительными значениями Eh в водоносном горизонте, что свидетельствует об активном водообмене. Они связаны с растворением гипса, кальцита и доломита, содержащих Sr в качестве примеси. Это приводит к тому, что SI для гипса, кальцита и доломита коррелирует с минерализацией воды, а для целестина и стронцианита характерны пониженные SI до -5,02 и -0,92, соответственно. Установленные закономерности позволяют более обоснованно выбирать места для строительства водозаборных скважин для получения питьевой воды нормативного качества.

Ключевые слова: подземные воды, стронций, гидрохимия, изотопы углерода, датирование

FEATURES OF THE FORMATION OF HIGH STRONTIUM CONCENTRATIONS IN DRINKING GROUNDWATER DISTANT FROM THE SEA COAST

A.I. Malov^{*1}, E.S. Sidkina², D.D. Ershova¹, E.V. Cherkasova²

¹ *N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the UB RAS, Arkhangelsk, Russian Federation;*
E-mail: malovai@yandex.ru

Abstract

The patterns of formation of high concentrations of Sr in fresh groundwater, depending on the residence time in the aquifer, have been established. On average, for every thousand years, the concentration of Sr increases by 2,1-3,5 mg/l, and the mineralization of water by 70-320 mg/l. In addition, high concentrations of Sr correlate with an increase in relief elevation and well depths and a decrease in Eh. They are associated with the dissolution of significant formations of celestite and strontianite, up to their ore occurrences. This is the reason for the increased saturation indices (SI) for celestite and strontianite up to -1,42 and 2,05, respectively, and their correlation with water salinity, as well as the lack of correlation between water salinity and SI for the main rock-forming minerals. Low Sr concentrations do not correlate with the groundwater residence time and tend to depressions in the relief with a virtual absence of overlying deposits and positive Eh values in the aquifer, which indicates active water exchange. They are associated with the dissolution of gypsum, calcite and dolomite containing Sr as an impurity. The established patterns make it possible to more reasonably choose places for the construction of water wells.

Key Words: groundwater, strontium, hydrochemistry, carbon isotopes, dating

Введение

Стронций – природный элемент, повсеместно встречающийся в горных породах в основном в виде SrSO_4 (целестин) и SrCO_3 (стронцианит). Он классифицируется в России как токсичное неорганическое вещество с ПДК в питьевой воде 7,0 мг/л. Негативное действие стронция связано с тем, что из-за сходства с кальцием он накапливается в костях и может вызывать заболевания опорно-двигательного аппарата и зубов.

В осадочных бассейнах стронций в значительных количествах появляется, как правило, в результате испарительного концентрирования морской воды. Грандиозным галогенезом отличался пермский период. В это время месторождения галогенов накапливались в очень крупных бассейнах, таких как Восточно-Европейский, Западно-Европейский и Северо-Американский. В периоды континентального режима ультрапресные атмосферные воды, растворяя галогенные породы, образовывали новые типы подземных вод – гидрокарбонатные, сульфатные, гидрокарбонатно-хлоридные, в том числе с повышенным содержанием стронция до 52 мг/л. Особенно высоки они в карбонатно-терригенных отложениях вблизи морского побережья [1, 2].

Исследуемый регион относится к Восточно-Европейскому бассейну и характеризуется широким развитием подземных вод с высоким содержанием стронция, приуроченных к водоносным горизонтам пермских отложений. В то же время площадное распределение

стронция на удалении от моря изучено еще недостаточно полно, чтобы достоверно объяснить широкую изменчивость распределения его концентраций и разработать критерии локализации участков водоносных горизонтов с благоприятным качеством подземных вод, перспективных для использования. С этой целью была поставлена задача выяснить зависимость содержания стронция в воде от таких параметров, как время пребывания подземных вод в водоносном горизонте, химический состав и общее содержание растворенных веществ, степень насыщения подземных вод по отношению к карбонатным и сульфатным минералам, окислительно-восстановительные и кислотнo-щелочные условия, высотные отметки и глубины скважин.

Методы исследований

Для исследований были выбраны две площади в Архангельской области, расположенные на расстоянии 250 км (Карпогорский полигон) и 500 км (Вельский полигон) от моря, чтобы можно было сопоставить особенности влияния указанных факторов в континентальных условиях с влиянием ранее изученных приморских условий. Учитывая опасность высоких концентраций Sr и положительные эффекты, связанные с воздействием низких концентраций [3], для исследований были выделены два соответствующих кластера подземных вод. Методика изотопно-химических определений изложена в работе [4].

Результаты и их обсуждения

Высокие концентрации стронция (> 7 мг/л)

Из двадцати девяти проб подземных вод, отобранных в ходе исследования, только в двенадцати были обнаружены концентрации стронция ниже 7 мг/л, девять из которых были обнаружены на Карпогорском полигоне.

Установлено, что высокие концентрации Sr повышаются от 8,3 до 43,6 мг/л с повышением общей минерализации (TDS) подземных вод от 0,28 до 1,29 г/л и снижением pH с 7,83 до 7,35. Однако корреляция Sr и TDS ($R^2 = 0,47$) выше, чем корреляция Sr и pH ($R^2 = 0,22$). На этом основании вполне ожидаема несколько повышенная корреляция увеличения насыщенности подземных вод по отношению к стронцианиту и целестину в сторону увеличения TDS ($R^2 = 0,55$ и $0,36$ соответственно) по сравнению с отсутствием корреляции в сторону уменьшения pH ($R^2 = 0,00$ и $0,08$, соответственно). Индекс насыщения (SI) воды по стронцианиту увеличивается с 1,26 до 2,05, а SI по целестину с -2,8 до -1,42. Логична и повышенная корреляция между увеличением содержания Sr в воде и увеличением насыщенности подземных вод по отношению к стронцианиту и целестину ($R^2 = 0,64$ и $0,68$, соответственно). Радиоуглеродное датирование также показывает снижение недонасыщенности воды целестином и увеличение насыщения стронцианитом с увеличением времени пребывания подземных вод в водоносном горизонте ($R^2 = 0,34$ и $0,40$, соответственно). Кроме того,

наблюдается тенденция к увеличению высоких концентраций Sr с увеличением времени пребывания подземных вод в водоносном горизонте ($R^2 = 0,29$).

Связь между значениями Sr и SI для гипса не очевидна ($R^2 = 0,30$), при этом недонасыщенность воды по отношению к гипсу снижается с -2,74 до -1,72. Связь между TDS и показателями насыщения подземных вод по отношению к гипсу, кальциту и доломиту также выражена слабо ($R^2 = 0,27, 0,27$ и $0,42$, соответственно).

Высокие концентрации Sr слабо коррелируют с Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} и Na^+ , а корреляция с Ca^{2+} практически отсутствует. Однако имеет место высокая корреляция TDS с HCO_3^- , Mg^{2+} и Na^+ и практическое отсутствие корреляции с Ca^{2+} . Наряду с этим установлено резкое увеличение мольных отношений $Sr:Ca^{2+}$ при повышении $Mg^{2+}:Ca^{2+}$ до 0,5–1,1 (Рис. 1). Многие исследователи связывают этот процесс с дедоломитизацией карбонатных пород [2].

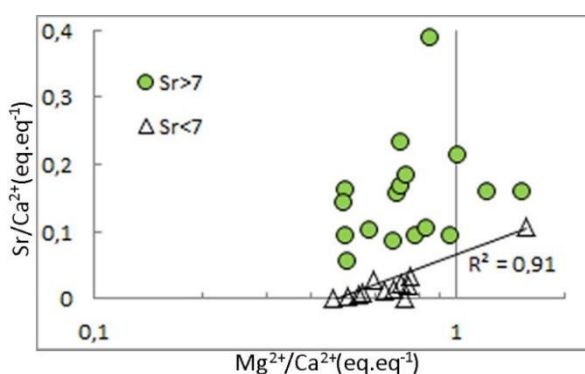


Рис. 1 График зависимости $Sr:Ca^{2+}$ от $Mg^{2+}:Ca^{2+}$, показывающий увеличение концентрации Sr одновременно с увеличением концентрации Mg^{2+} и уменьшением концентрации Ca^{2+} в подземных водах вследствие процесса дедоломитизации.

Тенденция к корреляции роста концентраций $Sr > 7$ мг/л с увеличением глубины водозаборных скважин и наличием восстановительных условий в водоносном горизонте связана по всей видимости с преобладанием здесь замедленного водообмена, в результате чего сохраняются не успевающие раствориться включения целестина. Также имеется корреляция высоких концентраций стронция с альтитудой (абс. м) ($R^2 = 0,37$). Это объясняется повышенной мощностью глинистых четвертичных отложений до 80-100 метров в пределах холмистых участков, распространенных на юге Архангельской области в Вельском районе и классифицируемых, как конечно-моренный рельеф, оставленный отступающими плейстоценовыми ледниками. Эти отложения экранируют водоносные горизонты, также затрудняя в них водообмен и способствуя сохранению Sr в подземных водах. В г. Вельске, расположенном в речной долине, альтитуды и мощность четвертичных отложений существенно меньше. Для Пинежского района (Карпогорский полигон) характерен карстовый рельеф с

практическим отсутствием перекрывающих отложений, что способствует активному водообмену с растворением гипсовых включений в водоносном горизонте P₂kz и выносом Sr.

Низкие концентрации стронция (< 7 мг/л)

В этом кластере TDS подземных вод увеличивается с 0,15 до 0,60 г/л при снижении pH с 7,85 до 7,12, а концентрации Sr увеличиваются в тех же направлениях с 0,07 до 3,77 мг/л. Отличия этих вод от вод с высоким содержанием Sr заключаются в следующем.

Низкие концентрации Sr не коррелируют с минерализацией воды ($R^2 = 0,00$), а слабая корреляция с pH ($R^2 = 0,22$) наблюдается в направлении повышения щелочности воды. На этом основании ожидаемо отсутствие корреляции насыщенности подземных вод по отношению к стронцианиту и целестину в сторону увеличения TDS ($R^2 = 0,00$ и 0,19 соответственно) так же, как и отсутствие корреляции в сторону уменьшения pH ($R^2 = 0,30$ и 0,01, соответственно).

Для подземных вод с низким содержанием Sr характерны очень низкие значения индексов насыщения по отношению к стронцианиту и целестину. SI для стронцианита увеличивается с -0,92 до 1,08, а SI для целестина с -5,0 до -2,73. Однако хорошо выражена связь между TDS и индексами насыщения подземных вод по отношению к гипсу, кальциту и доломиту ($R^2 = 0,77$, 0,48 и 0,51, соответственно). Низкие концентрации Sr не коррелируют с компонентами ионного состава подземных вод. В то же время процессы дедоломитизации существенно влияют на увеличение содержания Sr ($R^2 = 0,91$) (Рис. 1).

Подземные вод с низким содержанием Sr преобладают в окислительных условиях водоносного горизонта. Это вероятно связано с активным водообменом, в результате чего здесь растворены значительные включения целестина. Соответственно, с увеличением глубины водозаборных скважин низкие концентрации Sr не возрастают.

Заключение

В табл. 1 проведено сравнение некоторых физических характеристик, от которых зависит концентрация стронция в подземных водах, по нескольким районам исследований.

Табл. 1 Некоторые физические характеристики районов исследований, от которых зависит концентрация стронция в подземных водах (min-max/среднее).

Район	Количество скважин, шт	Альтитуда, м	Глубина скважин, м	TDS, г/л	Eh, мВ	¹⁴ C возраст, тысяч лет	Sr, мг/л
Вельский район	12	58-167 (93)	60-98 (72)	0,44-1,39 (0,67)	-48,7	0-31,1 (10)	0,33-43,6 (20,9)
город Вельск	6	5-93 (68)	49-70 (58)	0,28-0,57 (0,39)	-86	0-5,47 (3,15)	2,9-15,9 (10,9)
Карпогорский полигон	11	5-71 (52)	45-84 (60)	0,15-0,48 (0,31)	68,2	0-2,51 (0,96)	0,07-10,5 (3,1)
город Мезень	17	6-28 (14)	40-60 (50)	0,41-0,98 (0,66)	-9,35	0-4,66 (2,06)	0,76-39 (13)

Как видно из таблицы, для трех районов, охарактеризованных в данной статье, время нахождения подземных вод в водоносном горизонте, или возраст подземных вод имеет существенное значение для повышения концентрации Sr и величины TDS. В среднем, за 1000 лет (по моделям Pearson и Mook) концентрация Sr увеличивается на 2,1-3,5 мг/л, а TDS на 67-310 мг/л (Рис. 2).



Рис. 2 Концептуальная модель формирования высоких и низких концентраций Sr в пресных подземных водах на Северо-Западе России на удалении от моря.

В Мезенском районе, располагающемся вблизи морского побережья в долине реки Мезень, зона активного водообмена приурочена к относительно возвышенным отметкам рельефа – надпойменным террасам с минимальной мощностью песчаных отложений четвертичного возраста [1], перекрывающим водоносный горизонт P_2kz . Для пониженных частей речной долины, поймы и заболоченных надпойменных участков, характерна повышенная глинистость, способствующая снижению инфильтрации атмосферных осадков и активности водообмена. В среднем, за 1000 лет (по модели Ферронского) концентрация Sr увеличивается на 6,3 мг/л, а TDS на 320 мг/л.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-10004, <https://rscf.ru/project/23-27-10004/>.

Список литературы

1. Малов А.И. Подземные воды Юго-Восточного Беломорья: формирование, роль в геологических процессах / Екатеринбург: Из-во УрО РАН, 2003. 234 с.
2. Musgrove M. The occurrence and distribution of strontium in U.S. groundwater // Applied Geochemistry. Vol. 126. 2021. № article 104867.
3. Höllriegl, V., München, H.Z. Strontium in the environment and possible human health effects. In: J. Nriagu (ed.) Encyclopedia Environmental Health / Neuberberg: Germ. Res. Cent. Env. Health. 2011. pp. 268-275.
4. Malov A.I. Evolution of the groundwater chemistry in the coastal aquifers of the south-eastern White Sea area (NW Russia) using ^{14}C and ^{234}U - ^{238}U dating // Science of the Total Environment. Vol. 616–617. 2018. pp. 1208–1223.

УДК 550.46

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ВОДЫ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Р.М. Манасыпов*¹, Д.Г. Курашев¹, А.Г. Лим¹, И.В. Крицков¹, Т.В. Раудина¹

¹Томский государственный университет, Томск, Россия, E-mail: rmmanassypov@gmail.com

Аннотация

Выявлено систематическое снижение концентрации растворенного органического углерода (РОУ) и увеличение концентрации SO_4 и некоторых металлов (Mn, Co, Cu, Mo, Sr, U, Sb) в водах термокарстовых озер с увеличением водной поверхности озера и в зависимости от типа многолетней мерзлоты. Эти особенности могут быть интерпретированы как сочетание (i) выщелачивания органического углерода (ОС) и связанных металлов при береговой абразии мерзлого торфа и поступления этих соединений с надмерзлотным стоком и (ii) питания крупных озер подземными водами (особенно в зоне сплошного распространения ММП). Возможное смещение границы многолетней мерзлоты к северу может привести к уменьшению концентраций и запасов растворенного неорганического углерода (РНУ), Li, B, Mg, K, Ca, Sr, Ba, Ni, Cu, As, Rb, Mo, Sr, Y, Zr, редкоземельных элементов (РЗЭ), Th и U в 2–5 раз в зоне сплошной криолитозоны, при этом возможно увеличение в 2–3 раза концентрации РОУ, Cd, Sb и Pb. Смещение зоны спорадической мерзлоты к северу может привести к 2–5-кратному уменьшению содержания РОУ, Al, P, Ti, Cr, Ni, Ga, Zr, Nb, Cs, РЗЭ, Hf, Th и U. Однако точная величина этой реакции будет сильно зависеть от сезона, при этом наибольшие эффекты будут наблюдаться в сезоны базового стока.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, термокарст, озерная вода, углерод, микроэлементы, Западная Сибирь

ELEMENTAL COMPOSITION OF THERMOKARST LAKE WATERS IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA

R.M. Manasypov*¹, D.G. Kurashev¹, A.G. Lim¹, I.V. Krickov¹, T.V. Raudina¹

¹Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, E-mail: rmmanassypov@gmail.com

Abstract

A systematic, all-season decrease in the concentration of dissolved OC (DOC) and an increase in SO_4 and some metal (Mn, Co, Cu, Mo, Sr, U, Sb) concentration with an increase in lake surface area, depending on the type of the permafrost zone were revealed. These features are interpreted as a combination of (i) OC and organically bound metal leaching from peat at the lake shore, via abrasion

and delivery of these compounds by suprapermafrost flow, and (ii) deep groundwater feeding of large lakes (especially visible in the continuous permafrost zone). The permafrost boundary shift northward may decrease the concentrations and pools of dissolved inorganic carbon Li, B, Mg, K, Ca, Sr, Ba, Ni, Cu, As, Rb, Mo, Sr, Y, Zr, rare earth elements (REEs), Th, and U by a factor of 2–5 in the continuous permafrost zone, but increase the concentrations of DOC, Cd, Sb, and Pb by a factor of 2–3. In contrast, the shift of the sporadic to isolated zone may produce a 2–5-fold decrease in DOC, Al, P, Ti, Cr, Ni, Ga, Zr, Nb, Cs, REEs, Hf, Th, and U. The exact magnitude of this response will be strongly seasonally dependent, with the largest effects observable during baseflow seasons.

Key Words: permafrost, thermokarst, lake water, carbon, trace elements, Western Siberia

Введение

Площадь криолитозоны Западной Сибири составляет 1,05 млн км² [1]. Большинство озер на данной территории термокарстового происхождения, образовавшихся при таянии мерзлых торфяников. По последним данным, полученным по спутниковым снимкам высокого разрешения общая площадь озер составляет 61900 км², а общее количество термокарстовых озер составляет 727,7 тыс. [1]. Термокарстовые озера Западной Сибири являются ключевыми компонентами обмена парниковыми газами (ПГ) между поверхностными водами и атмосферой [2]. Такие озера представляют собой высокодинамичные водные системы, питающиеся по большей части атмосферными осадками [3]. Термокарстовые озера, как наиболее распространенные водоемы в арктических и субарктических районах, также являются основными пулами и источниками [4] растворенных металлов и РОУ. Площадь водосбора термокарстовых озер практически равняется площади водного зеркала в силу особенностей рельефа мерзлых торфяников на севере Западной Сибири [3]. Большая часть химических элементов и РОУ поступает в озера при береговой абразии мерзлого торфа [3; 5], с поверхностным стоком в период снеготаяния, атмосферным переносом [6] и после низовых пожаров [7].

Методы исследований

Пробы озерной воды отбирались на четырех ключевых участках в Западной Сибири, расположенных в четырех зонах распространения ММП: южный участок в окрестностях г. Когалыма, таежный биом зоны изолированной мерзлоты; окрестности поселка Ханымей, биом северной тайги зоны спорадической мерзлоты; окрестности поселка Уренгой, биом лесотундры прерывистой мерзлоты; и самый северный ключевой участок в окрестностях поселка Тазовский, тундровый биом сплошной криолитозоны.

Пробы воды отбирали с поверхности озера (15–20 см) с помощью стерильных пластиковых шприцев и виниловых перчаток. Озерная вода фильтровалась на месте сразу после

отбора проб через одноразовые фильтрующие насадки MILLEX (0,45 мкм). Первые 20–50 мл фильтрата не анализировали. Отфильтрованные пробы озерной воды делили на две части, каждую из которых помещали в полипропиленовый флакон (12 и 30 мл), предварительно подготовленных в чистой комнате (класс чистоты A10000). Один флакон был подкислен бидистиллированной азотной кислотой до $\text{pH} = 2$ для анализа растворенных катионов, а другой не был подкислен для анализа PO_4 , P_H_4 и основных анионов (Cl , SO_4). До анализа образцы хранились в холодильнике при температуре 4°C . В каждом месте отбора проб измеряли температуру, pH , удельную электропроводность (SC) и содержание растворенного кислорода (O_2) с помощью измерителя WTW Multi 3430. Микроэлементы измеряли с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с использованием квадруполь ICP-MS (Agilent Technologies 7500 ce) с внутренним стандартом $\text{In} + \text{Re}$ и погрешностью 5%, с использованием международного геостандарта SLRS-5. Измерение концентрации PO_4 проводилось методом инфракрасной спектроскопии (TOC-VCSN, Shimadzu), с точностью 5% и пределом обнаружения 0,1 мг/л; (2) определение хлоридов и сульфатов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (Dionex ICS-2000) с точностью 2% и обнаружением предел 0,02 мг/л.

Результаты и их обсуждения

Зависимость концентраций PO_4 , P_H_4 , анионов и микроэлементов в водах термокарстовых озер от площади водного зеркала

При рассмотрении всех зон распространения многолетней мерзлоты выявлено повышение pH , концентраций P_H_4 , щелочных и щелочноземельных элементов (Li , Mg , K , Ca и Sr), двухвалентных тяжелых металлов (Co , Ni и Cu), трехвалентных и четырехвалентных гидролизатов (Y , Zr , $\text{P}_3\text{Э}$, Th), Mo , As и U пропорционально увеличению водной поверхности. Увеличение концентраций лабильных растворимых элементов (щелочных и щелочноземельных металлов, Mo , As , U) в южной части криолитозоны может быть интерпретирован как следствие поступления глубинных подземных вод, которые контактируют с карбонатными породами и проникают в крупные озера по таликам или в результате подземного стока. В зоне сплошной вечной мерзлоты, это увеличение может быть связано с десорбцией растворимых элементов из морских глинистых минеральных поверхностей (иллит, монтмориллонит), обнажающиеся на дне крупных озер. Увеличение концентрации нерастворимых трехвалентных и четырехвалентных гидролизатов при увеличении площади озера выражено преимущественно во время базового стока и, вероятно, происходит из силикатсодержащих пород, таких как глины, растворение которых в более глубоких горизонтах почвы поставляет в озерную воду трех- и четырехвалентные гидролизаты (TE^{3+} и TE^{4+}). Эти элементы затем стабилизируются в растворе с помощью органических и железоорганических коллоидов. Наоборот, концентрации PO_4 и P_b уменьшаются при

увеличении площади озера, что отражает их преимущественное поступление из мерзлого торфа, разрушающегося на границе озера. Последующее поступление этих элементов в водную толщу происходит за счет надмерзлотного стока по мерзлым органическим горизонтам.

Влияние градиента вечной мерзлоты на концентрацию элементов в термокарстовых озерах

В зависимости от зоны распространения ММП нами выделены следующие группы:

(1) Элементы, концентрации которых увеличиваются к северу (см. рисунок): РНУ, Mg, Ca, Mo, Sr, U, Li, Na, Ti, V, Fe, Co, Ni, Cu, Y, Zr, РЗЭ, Hf и Th. В частности, рН и концентрация РНУ, Mg, Ca, Mo, Sr и U незначительно менялась с юга на север (от изолированной до прерывистой криолитозоны) и резко (в 2–3 раза) увеличивалась в зоне сплошной мерзлоты. Возможным фактором, влияющим на эту закономерность, является малая мощность торфяной залежи на севере [8], где талый слой достигает минерального горизонта (морские глины, содержащие иллит, монтмориллонит). Это способствует накоплению малоподвижных литогенных элементов и быстро увеличивающейся концентрации РНУ в озерных водах зоны сплошной мерзлоты.

(2) Элементы, концентрации которых уменьшаются к северу ($p < 0,05$): SO_4 , Cd, Pb, Sb и Cs. Снижение содержания SO_4 может быть связано с изоляцией сульфатсодержащих грунтовых вод, залегающих в зоне сплошной криолитозоны. Микроэлементы Cd, Pb, Sb, и Cs, как известно, обогащают торф и торфяные поровые воды [9], а их пониженная концентрация на севере может объясняться уменьшением торфяной толщи в зоне сплошной мерзлоты [8]. Кроме того, малое поступление данных элементов в воду термокарстовых озер на севере может быть связано с уменьшением влияния атмосферных аэрозолей [6].

(3) Элементы, не проявляющие статистически значимых изменений концентраций ($p < 0,05$) – SC, Cl, РОУ, B, Al, Si, K, Cr, Mn, Zn, As, Rb.

Однако некоторые элементы, такие как РОУ, Al, Cr и Mn, демонстрировали четкий максимум в зонах спорадического или прерывистого распространения ММП. Предположительно, это связано в максимальной глубины сезонно-талого слоя и латеральным переносом вещества во время летнего и осеннего стока и одновременно значительным количеством мерзлого торфа обеспечивает наиболее оптимальные окислительно-восстановительные условия для мобилизации Mn (и Cr) из озерных отложений в воду. А также с выщелачиванием РОУ и Al из мерзлого торфа и транспортирование их в виде коллоидов [10].

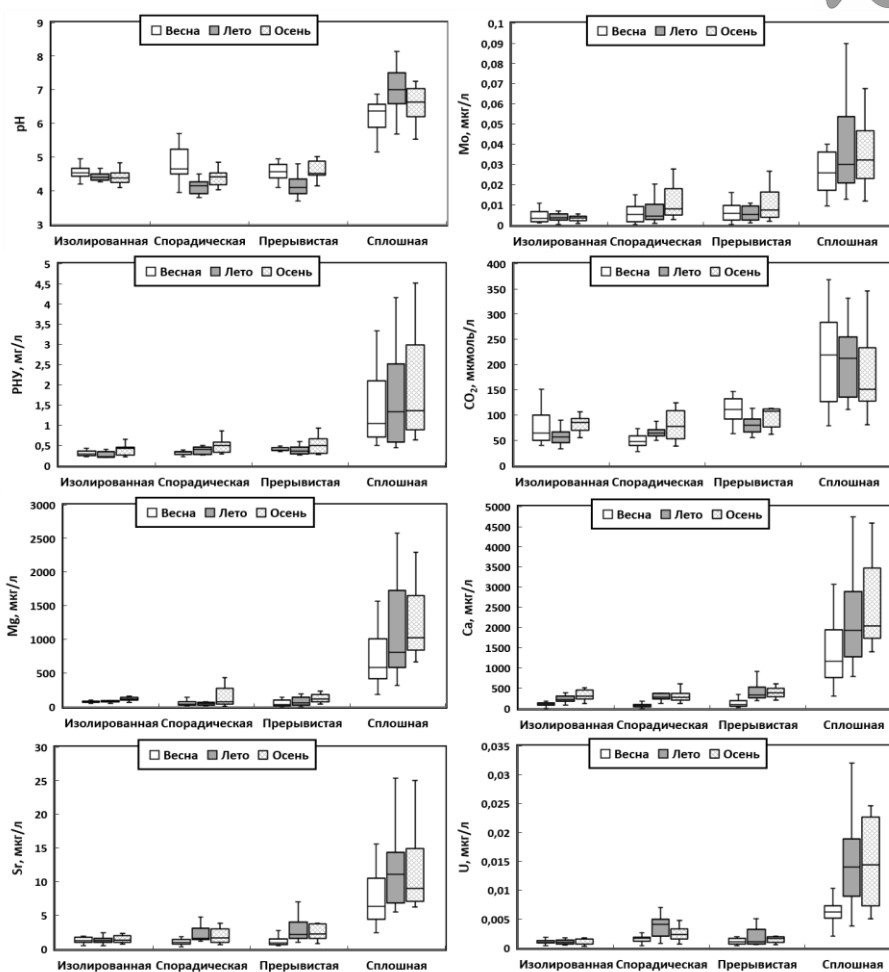


Рис.1 Увеличение уровня pH и концентрации некоторых химических элементов в различных зонах мерзлоты Западной Сибири.

Закключение

В результате проведенных работ были выявлены основные факторы окружающей среды, определяющие химический состав воды термокарстовых озер, такие как размер озера и тип распространения многолетней мерзлоты. Эти факторы определяют связь озера с подземными водами, почвенными надмерзлотными водами и подстилающими озера минеральными отложениями, а также интенсивность выщелачивания торфа на берегу озера. Выявлены две группы элементов: растворимые высокоподвижные PNU, Ca, Mg, Sr, Mo, U, связанные с резервуарами подземных вод и морскими глинистыми минералами (хлорит, монтмориллонит) и малорастворимые литогенные трехвалентные и четырехвалентные гидролизаты, контролируемые органическими и органоминеральными коллоидами.

Для прогнозирования возможных изменений концентраций углерода, макро- и микроэлементов в водах термокарстовых озер, в ответ на потепление климата и смещение границы многолетней мерзлоты к северу, используется подход «замена пространства

временем». Сдвиг зон мерзлоты на 2–4° к северу может привести к снижению в 2–5 раз РНУ, Ca, Mg, Sr, Al, Fe, Ti, Mn, Ni, Co, V, Mo, Sr, Zr, Hf, Th, РЗЭ, U в озерах, расположенных в сплошной мерзлоте. Однако элементы, поступающие от выщелачивания торфяной массы и верхнего органического горизонта (POY, Si, K, Cr, Zn, As и Rb) будут демонстрировать довольно небольшие изменения концентрации (т.е. снижение на 20–30%). В южной части криолитозоны Западной Сибири (зона спорадического распространения ММП), можно ожидать значительное снижение концентраций POY, Al, Ti, Cr, Ni, Ga, Zr, Nb, РЗЭ, Hf, Th и U. Эти предположения могут считаться только прогнозами первого порядка и требуют дальнейших проверок с помощью связанных экосистем, растительности, подземных вод и моделирования климата.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-10067.

Список литературы

1. Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Polishchuk V.Y., Lim A., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. Minor contribution of small thaw ponds to the pools of carbon and methane in the inland waters of the permafrost-affected part of the Western Siberian Lowland // *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13. Article number 045002.
2. Serikova S., Pokrovsky O.S., Laudon H., Krickov I.V., Lim A.G., Manasypov R.M., Karlsson J. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia // *Nature Communications*. 2019. V. 10. p. 1–7.
3. Manasypov R.M., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Thermokarst lake waters across the permafrost zones of western Siberia // *The Cryosphere*. 2014. Vol. 8. pp. 1177–1193.
4. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Krickov I.A., Kopysov S.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Trace element transport in western Siberian rivers across a permafrost gradient // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13. pp. 1877–1900.
5. Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Desmukh C., Pokrovsky B.G., Audry S., Viers J. Biogeochemistry of organic carbon, CO₂, CH₄, and trace elements in thermokarst water bodies in discontinuous permafrost zones of Western Siberia // *Biogeochemistry*. 2013. Vol. 113. pp. 573–593.
6. Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasypov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Y., Shirokova L.S., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. Vol. 21. pp. 5725–5746.
7. Manasypov R.M., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. Experimental modeling of thaw lake water evolution in discontinuous permafrost zone: Role of peat, lichen leaching and ground fire // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 580. pp. 245–257.
8. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N., Sugaipova A., Kouraev A., Zakharova E., Pokrovsky O., Shirokova L., Kolmakova M., Manassypov R., Dupre B. West Siberian palsa peatlands: Distribution, typology, cyclic development, present day climate-driven changes, seasonal hydrology and impact on CO₂ cycle // *International Journal of Environmental Studies*. 2011. Vol. 68. pp. 603–623.
9. Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Istigechev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S. Permafrost thaw and climate warming may decrease the CO₂, carbon, and metal concentration in peat soil waters of the Western Siberia Lowland // *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 634. pp. 1004–1023.

10. Manasypov R.M., Lim A.G., Krickov I.V., Raudina T.V., Kurashev D.G., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S. Colloids in thermokarst lakes along a permafrost and climate gradient of permafrost peatlands in Western Siberia using in situ dialysis procedure // Water. 2023. Vol. 15. Article number 1783.

УДК 556.314

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОСТАВА
ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ
ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ
(НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН)**

Р.Х. Мусин*¹, А.Р. Галиева¹, А.Д. Хамитов¹

¹Казанский федеральный университет, Казань, Россия, E-mail: Rustam.Musin@kpfu.ru

Аннотация

Рассмотрены характер и динамика изменения во времени (1960-2020 гг.) качественных показателей пресных подземных вод по 4 крупным площадям в пределах Татарстана. Показано, что в пределах сельскохозяйственных районов составы подземных вод не претерпели существенных изменений, даже намечается тенденция к улучшению их качественных показателей. В пределах Нижнекамской нефтехимической промзоны негативная трансформация состава грунтовых вод отмечается лишь в пределах и ближайших окрестностях промплощадок, шламонакопителей и полигонов захоронения промышленных отходов. Максимально негативно изменен состав подземных вод на площадях крупных длительно эксплуатируемых нефтяных месторождений. Выявлены и охарактеризованы основные факторы этих изменений.

Ключевые слова: минерализация, жесткость, загрязнение, буферные свойства геологической среды, самоочищение подземных вод

**SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY IN THE COMPOSITION
OF FRESH GROUNDWATER IN THE EASTERN PART
OF EUROPEAN RUSSIA
(BY THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN)**

R.Kh. Musin*¹, A.R. Galieva¹, A.D. Khamitov¹

¹Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation, E-mail: Rustam.Musin@kpfu.ru

Abstract

The nature and dynamics of changes in time (1960-2020) of qualitative indicators of fresh groundwater in 4 areas within Tatarstan are considered. The main factors of these changes are identified and characterized.

Key Words: mineralization, hardness, pollution, self-purification of groundwater

Введение

Проблемы пространственно-временной изменчивости качественного состояния природных вод являются на сегодняшний день одними из наиболее актуальных [2; 7 и др.]. В данной статье рассматриваются особенности состава пресных подземных вод (ПВ) в Республике Татарстан (РТ), а также характер и динамика их изменения во времени. Это рассмотрение базируется на обширном разновременном гидрогеохимическом материале по отдельным площадям, отличающимся типом и уровнем техногенной нагрузки. Татарстан является развитым в экономическом отношении. Здесь ведется активная разработка таких уникальных нефтяных месторождений, как Ромашкинское и Ново-Елховское. Нефтехимическая промышленность представлена такими гигантами, как ПАО «Нижнекамскнефтехим» и «Казаньоргсинтез». Машиностроительную отрасль возглавляет ПАО «КАМАЗ». Хорошо развит и аграрный сектор. Выявление характера и динамики изменения во времени качественных показателей пресных ПВ на площадях нефтегазразработок, в пределах нефтеперерабатывающих промзон, а также в областях интенсивного земледелия представляет актуальную задачу.

Методы исследований

Объектом исследования явилась верхняя часть разреза подземный гидросферы РТ. Татарстан расположен в восточной части Восточно-Европейской равнины и одноименной платформы. Его площадь – 68 000 км², население – 3,9 млн. человек. Территория РТ хорошо изучена в геологическом, гидрогеологическом и геоэкологическом отношениях. Государственная геологическая съемка масштаба 1:200000 проведена здесь в 1960–1970-х гг. В 1990–2000-х гг. большая часть территории была охвачена эколого-гидрогеологической съемкой масштаба 1:200000, а на локальных площадях проведены геологосъемочные работы масштаба 1:50000. В последние 20 лет непрерывно ведется мониторинг ПВ по довольно плотной сети скважин и крупных родников, а также осуществляются поисково-разведочные работы на ПВ разного целевого назначения и другого типа гидрогеологические исследования. Верхняя часть геологического разреза РТ сложена комплексами полигенных пермских, юрско-меловых и плиоцен-четвертичных отложений [8]. Пермские отложения отличаются резко выраженной фациальной зональностью и имеют сульфатно-карбонатно-терригенный состав. Пресные ПВ локализованы в средне- и верхнепермских отложениях, мощность которых может достигать 250 м. Юрско-меловые образования общей мощностью 390 м фиксируются лишь в юго-западной части Татарстана. Эта часть разреза на 90–95% представлена морскими сероцветными глинами. Плиоцен-четвертичные отложения максимальной мощности до 250 м достигают в речных долинах, где они представлены аллювиальными песчано-глинистыми породами. Пресные ПВ

формируют типичные платформенные междуречные и долинные потоки. Основными областями их питания являются водораздельные пространства, а областями разгрузки – речные долины. Эти воды отличаются широко варьирующим составом и минерализацией. Изучение особенностей состава пресных ПВ и их изменений во времени проведено по 4 площадям (Рис.1).



Рис.1 Расположение изученных площадей: 1 – контуры изученных районов и их номера, 2 – контуры крупных нефтяных месторождений.

Первые две отличаются сельскохозяйственной направленностью производственной деятельности. Здесь нет крупных населенных пунктов и промышленных предприятий. Третья площадь охватывает территорию Нижнекамской промышленной зоны. Она включает несколько крупных предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности (ПАО «Нижнекамскнефтехим» и др.). Первая продукция здесь была получена в 1967 г. Четвертая площадь охватывает область наиболее крупных нефтяных месторождений – Ромашкинского, Ново-Елховского и Бавлинского. Разработка первого началась в 1952 г. Максимальный объем добычи нефти был достигнут в 1970-х гг., когда он составлял 100–120 млн. т/год. Современный уровень добычи находится на уровне 25–30 млн. т/год [5]. Основным методом исследования явилось сопоставление разновременных химических анализов ПВ. При этом сопоставление было разноуровневым. Сравнивались анализы одних и тех же водопроявлений; данные, осредненные по определенной площади и определенным водоносным горизонтам и комплексам.

Результаты и их обсуждения

Первая изученная площадь представляет собой Предволжский регион РТ (площадь 9700 км²). Детально он изучен в 1996–2001 гг. в ходе эколого-гидрогеологической съемки масштаба 1:200000, а также в 2019–2020 гг. при мониторинге качественного состояния ПВ. Пресные ПВ в центральной и северной части региона локализованы в пермских и плиоцен-четвертичных отложениях, а в южной части региона – в мезозойских. Сопоставление разновременных

аналитических данных проведено как по одним и тем же водопунктам, так и отдельным водоносным комплексам, развитым в центральной и южной части региона (Табл. 1). Приведенные данные свидетельствуют о наметившейся тенденции улучшения качественных показателей ПВ в этом регионе.

Табл. 1 Сопоставление разновременных средних значений интегральных показателей состава ПВ.

Индекс	Тип водопунктов	Кол-во проб	Минерализация, мг/л	Жесткость, ммоль/л	Преобладающие типы воды
К	Родники	<u>44</u>	<u>617</u>	<u>6,66</u>	HCO ₃ /Ca и Mg-Ca
		8	584	5,56	
J	Родники	<u>113</u>	<u>684</u>	<u>7,54</u>	HCO ₃ / и SO ₄ -HCO ₃ /Mg-Ca
		5	609	6,89	
	Скваж.	<u>40</u>	<u>1234</u>	<u>7,55</u>	HCO ₃ и SO ₄ -HCO ₃ /Mg-Ca-Na
		1	839	7,38	
P _{3t}	Родники	<u>225</u>	<u>611</u>	<u>7,02</u>	HCO ₃ /Mg-Ca
		18	574	6,81	
	Скваж.	<u>33</u>	<u>773</u>	<u>7,28</u>	HCO ₃ /Mg-Ca и SO ₄ -HCO ₃ /Na-Mg-Ca
		7	748	5,99	
P _{2ur}	Родники	<u>201</u>	<u>590</u>	<u>6,70</u>	HCO ₃ /Mg-Ca
		33	601	7,46	
	Скваж.	<u>253</u>	<u>903</u>	<u>7,50</u>	HCO ₃ /Mg-Ca; SO ₄ -HCO ₃ /Na-Mg-Ca и Mg-Ca-Na
		48	744	6,51	
P _{2kz2}	Скваж.	<u>150</u>	<u>1755</u>	<u>20,60</u>	HCO ₃ , SO ₄ -HCO ₃ , HCO ₃ -SO ₄ , SO ₄ /Mg-Ca и Na-Mg-Ca
		23	1581	17,66	
P _{2kz1}	Скваж.	<u>29</u>	<u>2763</u>	<u>32,73</u>	HCO ₃ -SO ₄ , SO ₄ /Mg-Ca и Na-Mg-Ca
		4	2590	27,32	

Примечание. В числителе данные 1996–2001 гг., в знаменателе – 2019–2020 гг.

Вторая исследованная площадь (3600 км²) относится к Предкамскому региону Татарстана. Первый этап ее площадного изучения приходится на 1960-е гг., а второй – 2004–2006 гг. Пресные ПВ локализованы в толще пермских и плиоцен-четвертичных отложений. Сопоставлению подвергнуты составы как одних и те же родников, так и осредненные родниковые данные по отдельным водосборным бассейнам, ограниченными крупными водоразделами и речными долинами. Результаты этого сопоставления практически идентичны. Существенных изменений состава и качества пресных ПВ пермских отложений за 40 лет не произошло. Статистически значимые различия выявляются лишь для содержаний хлоридов. Их концентрации практически повсеместно возросли в 1,2–3,3 раза с преобладающих 7–10 мг/л до наиболее часто встречающихся 15–40 мг/л.

Третья изученная площадь соответствует Нижнекамской промзоне, расположенной в пределах залесенного водораздела, сложенного уржумскими и казанскими отложениями. Здесь развиты межпластовые ПВ, связанные нисходящим перетеканием. Одной из форм их разгрузки являются многочисленные нисходящие родники на отметках 60–190 м. Аналитические данные как минимум трехэтапного площадного опробования свидетельствуют о

практической неизменности состава родниковых вод, который определяется прежде всего природными факторами (Табл. 2). Более трансформированный состав ПВ отмечается непосредственно на промплощадках, а также в ближайшей окрестности шламонакопителей и полигонов захоронения промышленных отходов. При этом, загрязнение не распространяется далее, чем на 1,0–1,5 км по направлению тока подземных вод [3; 9].

Табл. 2 Особенности состава родниковых вод в окрестностях Нижнекамской промзоны.

Период времени	Кол-во проб	Минерализация, мг/л	Жёсткость, ммоль/л	Окисляемость, мгО ₂ /л	Преобладающий тип воды
1979-1980 гг.	9	<u>382-509,5</u> 448,9±50,1	<u>3,8-6,0</u> 5,12±0,68	<u>1,1-5,7</u> 3,3±1,79	НСО ₃ /Са, НСО ₃ /Mg-Са
1994-1999 гг.	27	<u>347,6-623,2</u> 489,9±60,8	<u>4,1-7,6</u> 5,44±0,77	<u>1,28-4,48</u> 2,28±1,0	НСО ₃ /Mg-Са
2018 г.	16	<u>417,3-587,0</u> 482,8±36,7	<u>3,02-6,33</u> 5,38±0,76	<u>0,48-4,08</u> 1,60±1,4	НСО ₃ /Са, НСО ₃ /Mg-Са

Примечание. В числителе – предельные значения, в знаменателе – среднее и стандартное отклонение.

Четвертая изученная площадь охватывает часть нефтяного региона РТ. Здесь наиболее продуктивным элементом разреза в отношении питьевых ПВ является нижеказанский водоносный комплекс. В природных ненарушенных условиях ПВ комплекса имели преимущественно НСО₃/Mg-Са и SO₄-НСО₃/Mg-Са составы с минерализацией до 0,8–1,0 г/л и жесткостью до 7–10 ммоль/л. В настоящее время на основной части площадей трех крупных нефтяных месторождений преимущественное развитие получили ПВ с долей хлоридов более 20%-моль. Их минерализация может достигать 10 г/л, а жесткость 70 ммоль/л. Преобладающим является загрязнение «сверху» за счет разливов и утечек на поверхности попутно добываемых рассолов [1]. Площадь территории с загрязнёнными ПВ составляет около 4 тыс. км². На основе градиентов изменения во времени минерализации и жесткости ПВ нижеказанского комплекса были выделены четыре степени трансформации их состава – «крайне слабая», «слабая», «средняя» и «высокая». Средняя и высокая степени изменения проявлены в пределах наиболее интенсивно осваиваемых нефтеносных площадей [4].

В сельскохозяйственных районах РТ состав пресных ПВ не претерпел существенных изменений во времени. При этом отмечается тенденция улучшения их качественных характеристик в Предволжском регионе. Это может быть связано со снижением техногенного пресса, обусловленного прогрессирующим снижением деловой активности и продолжающейся депопуляцией изученной территории. Видимо этот фактор является одним из основных в проявлении положительной динамики в изменении качественных показателей и поверхностных вод в разных областях России [2; 7]. Обогащение ПВ хлоридами в Предкамском регионе может быть вызвано деятельностью крупных химпредприятий в окрестностях г. Казани и г. Нижнекамска. Узколокальный характер развития загрязнения и негативной трансформации

состава пресных ПВ в Нижнекамской промзоне связан с двумя основными причинами. Это сам локальный характер интенсивного техногенного воздействия, а также значительные буферные свойства геологической среды [3]. Наиболее масштабно состав пресных ПВ трансформирован на площадях крупных нефтяных месторождений. Данная масштабность определяется площадным характером длительного воздействия на верхнюю часть подземной гидросферы, а также типом и объемами загрязняющих веществ.

Заключение

В Татарстане загрязнение пресных ПВ носит преимущественно локальный характер. В различной степени трансформирован состав ПВ в пределах населенных пунктов, производственных площадок, в районах полигонов различных отходов. При этом распространение загрязнения имеет отчетливо выраженный ограниченный характер. Можно считать, что за последние 60 лет (1960–2020 гг.) на основной части рассматриваемой территории пресные ПВ не претерпели сколь-нибудь значимых изменений, и их основной объем отличается природными условиями формирования химического состава. Совершенно иная гидрогеоэкологическая обстановка проявлена в пределах крупных длительно эксплуатируемых нефтяных месторождений. Результаты проведенных исследований необходимы для общего понимания характера и особенностей формирования гидрогеоэкологических условий на территории РТ. Это важно для принятия управленческих решений по её дальнейшему экономическому развитию.

Список литературы

1. Гидрогеоэкологические исследования в нефтедобывающих районах Республики Татарстан / Казань: Изд-во НПО "Репер", 2007. 300 с.
2. Джамалов Р.Г., Мироненко А.А., Мягкова К.Г., Решетняк О.С., Сафронова Т.И. Пространственно-временной анализ гидрохимического состава и загрязнения вод в бассейне Северной Двины // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 2. С. 149–160.
3. Мусин Р.Х., Галиева А.Р., Кудбанов Т.Г., Курлянов Н.А. Особенности влияния на гидросферу комплекса нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий в Нижнекамской промзоне Республики Татарстан // Нефтяное хозяйство. 2020. № 3. С. 108–112.
4. Мусин Р.Х., Калкаманова З.Г. Формирование состава подземных вод в верхней части гидролитосферы Восточно-Закамского региона Татарстана // Нефтяное хозяйство. 2016. № 2. С. 18–22.
5. Муслимов Р.Х., Абдулмизитов Р.Г., Хисамов Р.Б. и др. Нефтегазоносность Республики Татарстан: геология и разработка нефтяных месторождений. В 2 т. – Казань: Изд-во "Фэн" АН РТ, 2007.
6. Отраслевой стандарт. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре / М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. 12 с.

7. Решетняк О.С., Кондакова М.Ю., Даниленко А.О., Косменко Л.С., Минина Л.И. Пространственно-временная изменчивость степени загрязненности воды и состояния речных экосистем различных широтных зон Сибири // Вода: химия и экология. 2019. № 1–2 (118). С. 126–137.
8. Сводная геологическая карта доплейстоценовых отложений Республики Татарстан масштаба 1:200000. Пояснительная записка / Казань: Изд-во “Арника”, 1997. 118 с.
9. Musin R. Kh., Kurlyanov N. A., Kalkamanova Z. G., Korotchenko T. V. Environmental state and buffering properties of underground hydrosphere in waste landfill site of the largest petrochemical companies in Europe // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 33. 012019.

УДК 556

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГИДРОКСИДНЫХ ВОД

А.Ю. Озерский*¹

¹ОАО «Красноярская горно-геологическая компания», г. Красноярск, Российская Федерация.
E-mail: ozerski@krasgeo.ru

Аннотация

Характеризуется специфический гидрохимический гидроксидный тип вод, представляющий высоко щелочные бескарбонатные воды, которые образуются в природных и техногенных условиях. Рассматриваются источники и процессы происхождения высоких концентраций гидроксидных ионов

Ключевые слова: гидрохимия, тип воды, гидроксид, анионы, щелочность

ORIGIN AND DISTRIBUTION HYDROXIDE

A.Y. Ozerskiy*¹

¹JSC «Krasnoyarsk Mining and Geological Company», Krasnoyarsk, Russian Federation. E-mail: ozerski@krasgeo.ru

Abstract

A specific hydrochemical hydroxide type of water is characterized, representing highly alkaline carbonate-free waters that are formed in natural and man-made conditions. The sources and processes of origin of high concentrations of hydroxide ions are considered

Key Words: hydrochemistry, water type, hydroxide, anions, alkalinity

Введение

В классификациях химического состава природных вод, разработанных в первой половине двадцатого столетия, природные воды были подразделены по анионному составу на три класса по О.А. Алекину [1] или три типа по Н.И. Толстихину [4]: гидрокарбонатные, сульфатные и хлоридные. Такое подразделение обосновано тем, что анионы, в отличие от катионов, являются более стабильными компонентами природных вод и несут в себе информацию об их генезисе, условиях формирования и гидрогеохимической зональности. При этом наименования типам воды давались в том случае, если доля соответствующего аниона превышала 20 (или 25) процентов от общей эквивалентной массы анионов (%-экв), а ионы с такими высокими относительными концентрациями именовались главными.

Подразделение вод на три типа отвечало состоянию гидрохимических знаний в XX веке. Однако, с течением времени, усиливалось воздействие человека на природные воды, что

привело к внедрению в гидросферу новых химических веществ. Одновременно возрос уровень изученности, в том числе за счет совершенствования лабораторных методов исследования воды. В наши дни уже стало понятным, что наблюдаемое разнообразие природных вод уже не укладывается в три названных типа. Сейчас мы можем уверенно говорить о правомерности включения в число главных анионов гидроксида, нитрата и фторида и о наименовании соответствующих им типов природных вод. Если нитратные и фторидные воды уже хорошо известны и достаточно подробно освещены в работах Н. Т. Бондарука, Л. В. Заманы, С. Р. Крайнова, В. П. Закутина и др., то гидроксидные воды являются редким гидрохимическим феноменом. Тем не менее, в воде отдельных природных или техногенных водных объектов гидроксидный ион занимает доминирующее положение или же он входит в группу главных ионов наряду с другими известными анионами. Это дает все основания выделить специфический гидроксидный тип вод, характеристике которого посвящена эта статья.

Проблема обнаружения гидроксидных вод. Гидроксидные ионы обуславливают щёлочность воды. В большинстве случаев, относящихся к природным водам, основная масса ионов гидроксида обязана своим происхождением гидролизу угольной кислоты. Именно поэтому при химическом анализе воды на карбонаты и гидрокарбонаты анализируются общая щелочность и свободная щелочность, которые отечественными аналитиками относятся к гидрокарбонатному и к карбонатному ионам [3]. При этом авторы данного метода анализа совершенно справедливо указывают, что он достоверен в интервале рН от 4 до 9. Однако, в условиях работы обычных производственных лабораторий обычно вся обнаруженная свободная щелочность аналитиками записывается как CO_3^{2-} , а общая щелочность – как HCO_3^- . Это в общем приблизительно верно для околонейтральных вод, в которых концентрации OH^- и H^+ пренебрежимо малы. Методика данного анализа щелочности [3] пренебрегает не только концентрацией OH^- , но также и концентрациями других анионов, обуславливающих щелочность воды (H_3SiO_4^- , H_2BO_3^- , HS^- , органического аниона и др.).

Тем не менее, в методике анализа записано, что щелочность создается не только ионами HCO_3^- и CO_3^{2-} , но также ионами OH^- [3] и, чем выше щелочность, тем выше концентрация гидроксидов. В сильно щелочных водах концентрация гидроксидов достигает высоких значений (Рис. 1), а при рН более 9...10, гидроксидный ион может войти в число главных анионов, особенно в маломинерализованных водах.

Однако, в наши дни на практике зачастую ион OH^- ошибочно принимают за CO_3^{2-} и гидроксидные воды записываются в протоколы лабораторных испытаний как карбонатные, хотя в природе известны сильно щелочные бескарбонатные воды, в которых ион CO_3^{2-} отсутствует. Эта ошибка влечет за собой следующие. Во-первых, аналитики неверно рассчитывают минерализацию воды, так как эквивалентная масса гидроксида в 1,7 раза легче,

чем у карбонатного иона. Во-вторых, неверно понимаются геохимические условия формирования состава природных вод, так как химические свойства карбонатного и гидроксидного ионов сильно различаются. Впоследствии эта ошибка, по-видимому, переходит и в гидрохимические модели.

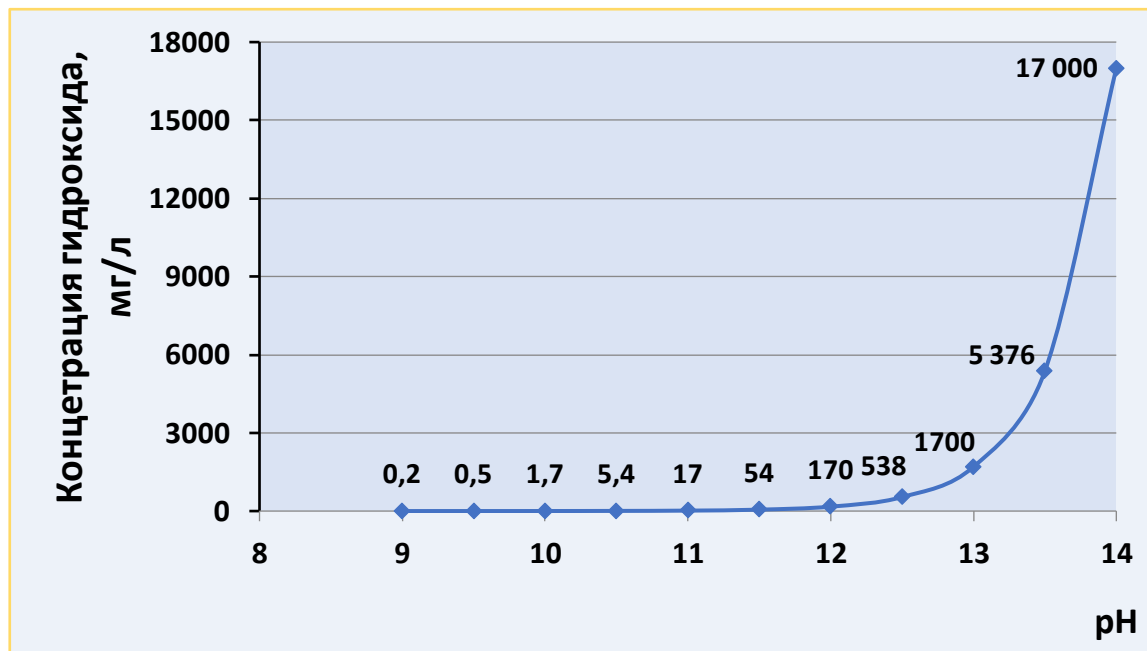


Рис. 1 Массовые концентрации гидроксидного иона в зависимости от pH.

В зарубежных лабораториях при анализах сильно щелочных вод концентрации гидроксида анализируются и приводятся в протоколах лабораторных испытаний, а также в гидрохимических публикациях [5; 6; 7]. Если при лабораторных испытаниях был выполнен анализ водородного показателя (pH), то молярная и массовая концентрации гидроксидного иона могут быть достаточно легко вычислены любым специалистом, знакомым со школьным курсом химии.

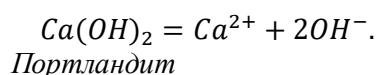
Однако, в силу субъективных обстоятельств, многие исследователи воспринимают водородный показатель в лучшем случае – как фактор карбонатной системы, а в худшем – как изолированную величину, никоим образом не связанную с другими компонентами химического состава вод.

По этой причине объективной (метод анализа) и субъективной (изолированное понимание величины pH) гидроксидные воды пока остаются неизвестными, поэтому гидроксидный ион лишен возможности получить статус главного, быть показанным в формуле солевого состава вод.

Источники происхождения и распространение гидроксидных вод. Гидроксидные воды образуются в поверхностных и подземных водных объектах в результате различных геохимических процессов: растворения гидроксидных минералов, гидролиза алюмосиликатов,

гидратации оксидов, гидролиза карбонатных солей, а также диссоциации молекул воды. Гидроксидные воды встречаются как в природных, так и в техногенных условиях.

1) Пример *растворения минералов класса гидроксидов* известен в Иордании, где были исследованы родники Макарин (Maqarin), выходящие из осадочных пород, содержащих *портландит* $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [7]. Растворение этого минерала (растворимость – 1,7 г/кг) приводит к формированию «гиперщелочных» [7] гидроксидных кальциевых вод с pH от 12,1 до 12,4:



Химический состав формирующихся вод характеризуется следующей формулой солевого состава (по М. Г. Курлову):

$$M_{1,2-1,9} \frac{\text{OH } 60-74 \text{ SO}_4 14-19}{\text{Ca } 88-94 \text{ Na } 5-9} \text{pH } 12,3 - 12,8$$

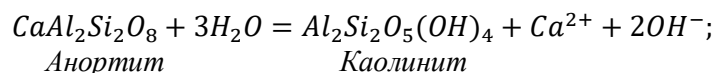
Несмотря на относительно низкую молярную массу гидроксида (17 г/моль) он составляет около 40 % от общей минерализации воды родников Макарин, а по абсолютным величинам уступает только кальцию (Табл. 1).

Табл.1 Химический состав гидроксидных вод, мг/л.

Водопункт	OH^-	CO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Мин.
Родники Макарин, Иордания [7]									
Родник М1	446	–	305	53	673	0,01	47	99	1623
Родник М2	274	–	273	136	429	0,01	51	15	1178
Родник М3	556	–	289	145	806	0,01	47	20	1862
Родники в офиолитовом поясе Северного Омана [6]									
Карку	102	–	5	343	76	0,3	265	11	801
Джебел-Аук	194	–	13	927	62	0,04	826	22	2043
Золоотвалы теплоэлектростанций*									
БГРЭС	576	8	170	48	554	5,4	71		1680
НГРЭС	607	34	38	31	162	14,4	277		1180
ТЭЦ-1	477	80	32	28	291	0,01	20	11	935
Nanticoke GS	193	36	950	28	450	0,1	67	16	1740
Дренаж из шламохранилища глиноземного производства									
Проба 4-03	1661	5130	1113	233	44	7	5680	1800	16436
Проба 5-07	490	3390	973	396	31	5	4460	915	11530

* Примечание: БГРЭС – Березовская ГРЭС, бассейн осветленной воды; НГРЭС – Назаровская ГРЭС, золошлаковый горизонт; ТЭЦ-1 – Красноярская ТЭЦ-1, сброс пульпы; Nanticoke GS – золоотвал теплоэлектростанции Нантикоук, Канада [5]

2) *Гидролиз алюмосиликатов*, происходящий в бескарбонатной среде, также приводит к формированию гидроксидных вод:

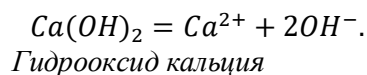


Этот процесс выявлен в родниках офиолитового пояса Семайл в Северном Омане, где, при гидролитическом разложении ультраосновных пород (гарцбургитов) обнаружены родники с бескарбонатными гидроксидно-хлоридными натриевыми водами [6]:

$$\text{M}_{0,8-2,0} \frac{\text{Cl } 61-69 \text{ OH } 30-38}{\text{Na } 74-91 \text{ Ca } 8-24} \text{ pH } 11,5 - 11,6$$

Родниковые воды стекают по руслам вади, в которых на пересыхающих участках обнаружены гидроксидные минералы, выпадающие из родниковых вод: *портландит* и *брусит* $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [6].

3) Формирование гидроксидных вод при *гидратации оксидов* известно в техногенных условиях, возникающих в золошлакоотвалах от сжигания бурых углей Канско-Ачинского угольного бассейна [2], а также некоторых других бурых и битуминозных углей [5]. При сжигании ископаемого угля, характеризующегося высоким содержанием кальция, в золе образуется свободный оксид кальция. Его гидратация, при гидравлическом удалении золошлаковых отходов, приводит к образованию гидроксида кальция и к формированию бескарбонатных гидроксидных кальциевых вод:

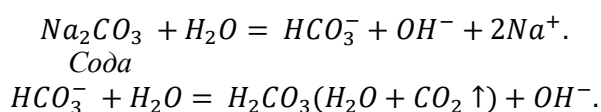


Например, средний состав пульпы системы гидрозолоудаления Красноярской ТЭЦ-1 имеет вид:

$$\text{M}_{0,9} \frac{\text{OH } 88}{\text{Ca } 93} \text{ pH } 12,2.$$

Примерно такой же состав имеют природные воды, циркулирующие в техногенном золошлаковом горизонте золоотвалов теплоэлектростанций, работающих на канско-ачинских и некоторых других бурых углях (Табл. 1). Массовая доля гидроксидных ионов в среднем составляет 30-50% от общей минерализации в водах золоотвалов из бурых углей и около 10% в золоотвалах из битуминозных углей.

4) *Гидролиз карбонатных солей* формирует гиперщелочные условия водной среды, которые обусловлены одновременно ионами карбоната и гидроксида:

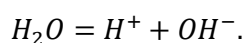


При этом доля высоких концентраций гидроксидных ионов несколько уступает карбонатам. Например, фильтрационные утечки из шламохранилища глиноземного комбината в подстилающий аллювиальный горизонт имеют следующий состав:

$$M_{11,5-16,4} \frac{CO_3 55-67 OH 15-31}{Na 83-88 K 10-15} pH 12,5 - 13.$$

В данном случае концентрации гидроксида были вычислены нами из величины рН, и только после включения OH^- в состав анионов, удалось уравнивать баланс катионов и анионов. Массовая доля гидроксидных ионов в шламовых водах составляет 5-10 %.

5) *Диссоциация молекул воды.* Принято считать, что основным источником гидроксид-иона является диссоциация воды:



Однако мы видим, что источником гидроксид-иона может быть не только вода. При растворении минералов гидроксидного класса ионы $[OH^-]$ поступают в воду из твердого минерального вещества. При гидратации оксидов и, возможно, гидролизе алюмосиликатов ионы $[OH^-]$ образуются как из воды, так и из твердого минерального вещества. В случае гидролиза простых солей источником ионов $[OH^-]$ является только вода.

Заключение.

Гидроксидные воды являются специфическим типом анионного состава вод, который встречается в природных и техногенных водных объектах. Проявления гидроксидных вод носят локальный характер. Для них характерна сильно щелочная реакция с водородным показателем, превышающим 9-11.

Гидроксидные воды формируются в результате растворения минералов класса гидроксидов, гидролиза минералов класса алюмосиликатов в бескарбонатной среде, гидратации оксидов, а также диссоциации молекул воды. В большинстве случаев гидроксидные воды являются бескарбонатными и не связаны с карбонатной системой.

Гидроксидный анион входит в состав общей минерализации воды, его концентрацию следует вычислять для сильно щелочных вод и отображать в протоколах лабораторных испытаний, в формулах солевого состава (по М. Г. Курлову), а также учитывать при наименовании типов вод.

Включение гидроксидного аниона в общую минерализацию может вызвать возражения, основанные на том, что ион OH^- возникает в результате диссоциации воды и что он представляет собой саму воду, а не минеральное вещество. Здесь надо учесть то обстоятельство, что доля диссоциированных молекул воды, по-видимому, невелика, а основную долю гидроксидов дает минеральное вещество. Кроме того, при естественном высыхании гидроксидных вод из них отлагаются минералы класса гидроксидов (портландит, брусит), что говорит о «минеральном»,

а не «водном» генезисе гидроксидов в воде. Наконец, самый распространенный в среде обитания человека анион, HCO_3^- , практически на треть состоит из воды и это ни у кого не вызывает возражений.

Мы полагаем, что в существующие гидрохимические классификации должны быть внесены изменения, учитывающие наличие гидроксидного типа вод.

Для выявления и описания гидроксидных (сильно щелочных бескарбонатных) вод необходимо совершенствование методов лабораторного анализа и методов обработки результатов аналитических работ.

Наличие гидроксидного бескарбонатного типа вод следует также учесть в программах гидрохимического моделирования, основанного на термодинамических свойствах карбонатной системы.

Список литературы

1. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1953. 296 с.
2. Гаврилин К. В., Озерский А. Ю. Канско-Ачинский угольный бассейн. М., Недра, 1996. 272 с.
3. ГОСТ 31957-2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартинформ, 2013. 25 с.
4. Толстихин Н. И. О типификации природных вод по химическому составу и их нумерации // Изв. Забайкальского филиала геогр. о-ва, т. 2, вып. 3, 1966. – С.13-27.
5. Dodd D. J. R. Coal-fired power generation in Ontario – a 60 year phenomenon. Coal ash disposal in Ontario – a 1000 year legacy // Water Sci. Technol., v. 15, 1983. P. 65-82
6. Neal C., Stranger G. Calcium and magnesium hydroxide precipitation from alkaline groundwaters in Oman, and their significance to the process of serpentinization // Mineralogical Magazine, Vol. 48, 1984. P. 237-241.
7. Steefel C. I., Lichtner P. C. Multicomponent reactive transport in discrete fracture II: Infiltration of hyperalkaline groundwater at Maqarin, Jordan, a natural analogue site // Journal of Hydrology, 08, 209(1), 1998. P. 200-224.

УДК 556.531.5

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КАК ИНДИКАТОР ПРОЦЕССОВ ПРОТЕКАЮЩИХ В НЕДРАХ НА ПРИМЕРЕ УГЛЕКИСЛЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ЗАБАЙКАЛЬЯ

А.М. Плюснин*^{1,2}, А.В. Украинцев¹

¹Геологический институт им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения РАН, г. Улан-Удэ, Россия,
E-mail: peryazeva75@mail.ru

²Восточно-Сибирский государственный технологический университет управления, г. Улан-Удэ, Россия,
E-mail: plyusnin-53@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования изотопного состава газов и химического состава воды углекислых месторождений Забайкалья. Показаны особенности распределения микроэлементов и растворенного органического вещества в составе вод. Рассмотрены процессы, в результате протекания которых формируется уникальный геохимический облик углекислых минеральных вод. Обосновано воздействие на химический состав вод потока флюида CO₂ от кристаллизующейся интрузии.

Ключевые слова: Углекислые воды, микроэлементы, изотопный состав углерода, азота, растворенное органическое вещество, флюид

WATER CHEMICAL COMPOSITION AS AN INDICATOR OF DEEP PROCESSES ON THE EXAMPLE OF TRANSBAIKAL CO₂-RICH MINERAL WATERS

A.M. Plyusnin*^{1,2}, A.V. Ukraintsev¹

¹Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation,
E-mail: peryazeva75@mail.ru

²East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russian Federation, E-mail: plyusnin-53@mail.ru

Abstract

The article presents the results of gases isotopic composition and water chemical composition studies from Transbaikalia CO₂-rich mineral water fields. The features of trace elements and dissolved organic matter distribution in the waters composition are shown. Processes are considered, as a result of which geochemically unique CO₂-rich mineral waters are formed. The effect of CO₂ fluid flow from a crystallizing intrusion on the chemical composition of waters is substantiated.

Keywords: CO₂-rich mineral waters, trace elements, isotopic composition of carbon and nitrogen, dissolved organic matter, fluid

Введение

Источники углекислых минеральных вод располагаются, в основном, в тектонически активных областях, на территориях подвергающихся коллизионным процессам, на окраинах континентов характеризующихся активной современной вулканической деятельностью [1]. Но, и в центральных частях континентов имеются области, где проявляется поток углекислого газа, и образуются минеральные воды. Одна из таких областей располагается на территории Забайкалья. Здесь установлено и в разной степени изучено более 280 проявлений холодных углекислых минеральных вод. Но до сих пор нет единой точки зрения на их образование, среди главных вопросов на который нет ответа – это генезис углекислого газа.

Методы исследований

Исследования на месторождениях углекислых минеральных вод Забайкалья проводились в 2019 и 2020 гг, были измерены физико-химические параметры вод, изливающихся из скважин, отобраны пробы воды и свободного газа для изучения их химического состава. Анализ макро и микрокомпонентного состава воды выполнен в сертифицированных лабораториях ГИН СО РАН (аналитик Д.И. Жамбалова) и ЛИН СО РАН (аналитик Е.П. Чебыкин). Состав свободного газа проанализирован методом газовой хроматографии в ООО Научно-производственная фирма «Сибэксервис» (г. Иркутск). Состав растворенных органических веществ определялся с помощью методики концентрирования методом твердофазной экстракции с газовым хромато-масс-спектрометрическим окончанием (аналитик Украинцев А.В.). Изотопный состав углерода определен в ЦКП ДВГИ ДВО РАН, изотопный состав азота в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (аналитик В.Ф.Посохов).

Результаты и их обсуждение

Химический состав вод месторождения Молоковка формируется в пределах гидрогеологического массива, сложенного интрузивными породами, минерализация составляет 0,35 г/л. На трех других месторождениях воды в межгорных впадинах при взаимодействии с осадочными породами континентального генезиса. Минерализация воды в Куке – 1,64 г/л, Дарасуне – 1,11 г/л, Шиванде – 1,72 г/л, рН во всех водах слабокислый 6,0; 6,2; 5,7 и 5,8 соответственно.

В анионном составе на всех месторождениях доминирует гидрокарбонат-ион (Рис. 1). Вторым по значимости анионом является сульфат-ион, который присутствует во всех обследованных водах в довольно высоких концентрациях. В катионном составе во всех исследованных водах на первом месте кальций, на втором магний и только на третьем натрий.

Наиболее высокие концентрации имеют: Li, Rb, Cs, Sr, Ba, Be, Fe, Mn, Zr, Cr, Co, Ni, As, Hg, Sc, РЗЭ, их содержание значительно превышает средние концентрации, установленные для вод зоны гипергенеза. Максимальные содержания микроэлементов установлены в воде месторождений Шиванда и Дарасун.

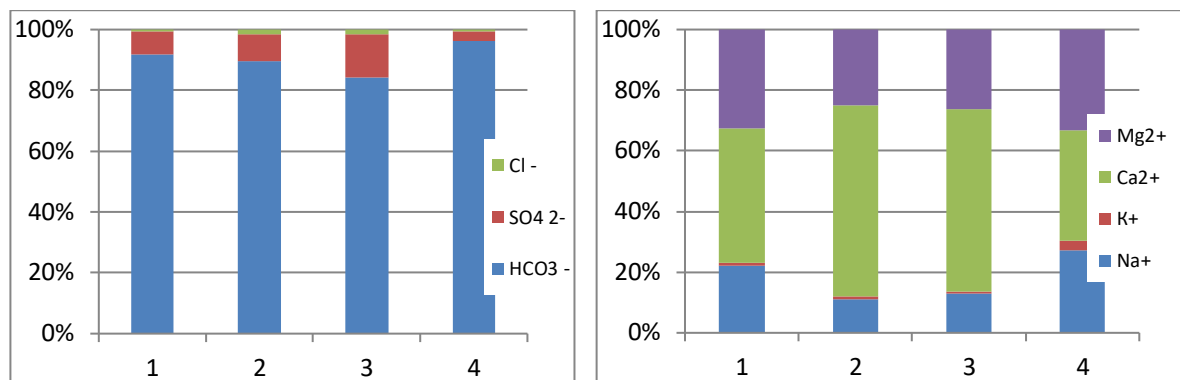


Рис. 1 Распределение макрокомпонентного состава вод в рассматриваемых месторождениях.

Условные обозначения: 1- Кука, 2 – Молоковка, 3- Дарасун, 4- Шиванда.

В газовом составе углекислых минеральных вод присутствуют неорганические и органические газы, генезис которых может быть связан с эндогенными и экзогенными процессами (Табл.1).

Табл. 1 Химический состав свободного газа в минеральных водах месторождений Забайкалья, об. %.

Месторождение	He	CO ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
Кука	0.007	93.68	5.40	0.011	3.9 10 ⁻⁵	1.1 10 ⁻⁵
Молоковка	0.018	22.57	74.79	1.86	< 10 ⁻⁷	2.3 10 ⁻⁴
Дарасун	<0,004	97.58	1.45	0.007	7.7 10 ⁻⁵	6.0 10 ⁻⁶
Шиванда	<0,004	95,94 _{испр}	2,19 _{испр}	0.008	4.3 10 ⁻⁵	4.0 10 ⁻⁶

Примечание: 95,94_{испр} – значение с вычетом примеси воздуха

На месторождениях углекислых минеральных вод, располагающихся в межгорных впадинах в свободном газе, доминирует углекислый газ. Наиболее высокая доля этого газа установлена на месторождении Дарасун. На месторождении Шиванда содержание углекислого газа, с учетом корректировки близки установленным на Дарасуне. На месторождении Кука в газовом составе доминирует углекислый газ, но и в значимых количествах присутствует азот, гелий, метан и пропан. На месторождении Молоковка, где разгрузка минеральных вод на поверхность происходит по разлому в пределах кристаллического массива, в свободном газе доминирует азот. Кроме него присутствуют гелий, метан и пропан. Содержание углекислого газа составляет всего 22 процента. Изотопный состав углерода в углекислом газе, выделяющемся из скважин на месторождениях, имеет мантийные изотопные метки ($\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰} = -5.5 \div -6.77$).

Изотопный состав азота в газовых эманациях N₂ на рассматриваемых месторождениях, приведенный относительно стандарта атмосферного воздуха ($\delta^{15}\text{N} = 0\text{‰ vs air N}_2$) имеет

следующие значения: Дарасун $\delta^{15}\text{N} = 1,6\text{‰}$, Кука = 3‰ , Молоковка = $0,5\text{‰}$. На основании полученных данных можно заключить, что азот в свободном газе на месторождении Дарасун и Кука имеет неатмосферное происхождение, его образование связано с биологическими процессами. А на месторождении Молоковка содержания тяжелого изотопа азота в свободном газе близки атмосферному.

Общее количество органических веществ в исследованных углекислых минеральных водах располагается в интервале 1,96-6,0 мг/л. В составе органических веществ определены: алканы, спирты, кислоты, эфиры и ароматические соединения. В пробах обнаружены нормальные алканы и изоалканы. Нормальные алканы имеют длину молекул от C_{14} до C_{18} . Обнаружены спирты с одной, двумя и тремя гидроксильными группами, с длиной углеродных цепей C_{17} , C_{18} , карбоновые кислоты с углеродными цепочками более 16. Всего было определено 156 органических соединений, которые объединены в 9 групп (Табл. 2).

Табл. 2 Качественный состав углеводородов, обнаруженных в углекислых минеральных водах, %.

	Общее $\text{C}_{\text{орг}}$, мг/л	Нормальные алканы	Разветвленные алканы	Алканы	Нормальные спирты	Разветвленные спирты	Спирты	Дикарбоновые кислоты	Ароматические соединения	эфиры	Не определенные
Кука	3,17	2,51	10,84	13,35	8,1	0,11	8,21	0,68	3,91	68,6	1,89
Молоковка	4,7	4,32	14,44	18,76	11,7	0,22	11,92	0,68	5,82	55,98	3,04
Дарасун	1,96	5,01	19,75	24,76	6,55	0,48	7,03	0,7	2,29	58,96	3,86
Шиванда	6,0	5,51	16,54	22,05	16,91	0,62	17,53	2,38	4,43	46,59	1,7

Газовый состав рассматриваемых месторождений формируется под воздействием нескольких факторов, при протекании различных процессов взаимодействия воды с породами. На месторождении Дарасун и Шиванда подавляющая часть газа имеет эндогенную природу. Метан на этих месторождениях присутствует в очень небольшом объеме, он может поступать из остывающей интрузии при ее температуре 900-500°C [2]. Присутствующий в газовом составе этан находится в положительной корреляционной зависимости с углекислым газом, он может поступать, также как и метан, из кристаллизующейся интрузии. Содержание пропана очень маленькое, этот газ может образовываться при биогенном разложении органического вещества. Низкие содержания этого газа указывают на незначительное влияние биологических факторов на формирование газового состава. Можно считать, что газовый состав на этих двух месторождений определяется эндогенными процессами, флюиды H_2O и CO_2 и др. газов могут формироваться в результате кристаллизации магматических расплавов на большой глубине.

На месторождении Кука на газовый состав кроме эндогенного потока углекислого газа, несомненно, воздействуют биологические процессы. Здесь присутствует значительная доля

биогенного метана, кроме того мы обнаруживаем и повышенное содержание пропана, который образуется при разложении органического вещества в приповерхностных условиях. Возможно, на этом месторождении в результате интенсивной откачки минеральной воды сформирована депрессионная воронка, которая заполняется грунтовыми и болотными водами, с которыми и привносится азот, метан, пропан.

На месторождении Молоковка в газовом составе доминирует азот, здесь в наибольшей степени проявляется воздействие биологических процессов, протекающих вблизи поверхности. Обнаружены наиболее высокие содержания метана и пропана биогенного происхождения. Вероятно, они поступают вместе с трещинными и трещинно-жильными водами, которые формируют ресурсы в пределах гидрогеологического массива юрских гранитоидов. Разломы, вероятно, дренируют грунтовые и поверхностные воды района. В трещинно-жильных водах в результате взаимодействия воды с горными породами и расходования воды как реагента в свободном виде накапливаются азот, гелий. Эндогенный поток углекислого газа поступает в эту систему по глубинному разлому в непосредственной близости от места разгрузки.

Формирование химического состава углекислых минеральных вод происходит в несколько этапов. Часть компонентов химического состава поступает при взаимодействии воды с вмещающими породами. Далее на ее состав оказывает влияние биотические процессы разложения растительных и животных остатков. На заключительном этапе в подземные воды привносятся компоненты потоком флюида углекислого газа из глубинного источника его генерации.

Анионный состав вод определяется потоком углекислого газа, так как в слабокислой среде часть растворенного углекислого газа превращается в гидрокарбонат-ион. Повышенные содержания сульфат-иона также могут быть связаны с приносом его в составе флюида углекислого газа. В поверхностных водах на окружающей территории его содержание значительно ниже. Известно, что при высоком давлении и температуры, которые господствуют при кристаллизации интрузии, происходит окисление сульфидной серы до сульфат-иона [3]. В катионном составе вод на всех месторождениях доминирует кальций, что соответствует представлениям о формировании химического состава вод в зоне гипергенеза. Содержание натрия объясняются условиями замедленного водообмена в межгорных впадинах, а высокие содержания магния, вероятно, связаны с эндогенным потоком флюида углекислого газа.

Высокие содержания микроэлементов, несомненно, также связаны с кристаллизацией интрузивных пород. На поздних стадиях дифференциации магматического расплава происходит его разделение на силикатную и карбонатную составляющую [4]. В это время происходит отделение летучих компонентов, которые находятся в форме флюидов и переносят в своем составе редкие щелочные, щелочноземельные, редкоземельные и др. элементы.

Длительное нахождение углекислого газа в форме флюида оказывает влияние и на поведение растворенного органического вещества (РОВ). Количество РОВ в водах рассматриваемых месторождений разное, что может быть связано и с условиями формирования ресурсов воды, и с различным количеством органических веществ во флюиде углекислого газа. Установленное аномально высокое содержание эфиров в водах месторождения Кука, может происходить при образовании сложных эфиров в приповерхностных условиях. Простые и сложные эфиры образуются при протекании различных химических реакций. Простые эфиры образуются при межмолекулярной дегидратации спиртов, а сложные эфиры при протекании реакции этирификации, в которой участвуют спирты и органические кислоты.

Высокие содержания простых эфиров обнаружены во всех обследованных минеральных водах. Это основная форма миграции органического вещества в углекислых минеральных водах. Вероятно, они также как и алканы, привносятся в минеральные воды потоком флюида углекислого газа. Их образование может быть связано с окислительным воздействием флюида углекислого газа и воды. Наибольший процент предельных углеводородов наблюдается в водах месторождения Дарасун. Особенностью вод этого месторождения является высокая насыщенность газом. Именно поступающая в большом количестве с глубины углекислота создает условия для накопления алканов различной структуры в водах Дарасуна.

О преобладающем источнике органического вещества может свидетельствовать индекс ОЕР (odd-even predominance). Значения индекса ОЕР, близкие к единице, говорят об абиогенном происхождении углеводородов, в свою очередь, значения, отличные от единицы в большую или меньшую сторону, говорят о доминирующем биогенном источнике органических веществ. ОЕР углеводородов растворенных в воде Молоковки, Шиванды и Дарасуна отклоняются от единицы на 0,06. Это говорит о том, что органическое вещество глубоко преобразовано, состав углеводородов сформировался без участия биогенных факторов. Состав растворенных углеводородов воды Кукинского месторождения характеризуется индексом ОЕР, равным 1,52. По всей видимости, в формировании углеводородов в этих водах оказывают воздействие факторы биогенной природы. В пользу этого предположения говорит то, что в водах Куки наименьший среди исследуемых вод процент алканов, как нормальных, так и разветвленных.

Заключение

Особенностью углекислых минеральных вод, расположенных в центральных частях континента является то, что они образуются под воздействием потока углекислого газа, отделяющегося от интрузии, которая кристаллизуется на большой глубине. Кристаллизация длительное время происходит в изохорических условиях. В силу этого углекислый газ длительное время находится в форме флюида. В этом состоянии он обладает повышенной растворяющей способностью. Из кристаллизующегося магматического расплава флюид углекислого газа извлекает ряд компонентов органической и неорганической природы, и затем,

при формировании проницаемых разрывных нарушений, переносит их в своем составе к поверхности.

Работа выполнена в рамках проекта ААА-А21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока.

Список литературы

1. Barnes, I., Irvin, W.P. and White, D.E. Global distribution of carbon dioxide discharges and major zones of seismicity. 1978. U.S. Geol. Surv., Water Resourc. Invest. 78/39, p.1- 12.
2. Рябчиков И.Д., Когарко Л.Н. Летучести кислорода в апатитоносной интрузии Хибинского комплекса // Геохимия, 2009, №12, с. 1235-1248.
3. Федяева О.Н., Востриков А.А. Превращение пирита и пирротина в сверхкритической воде. Сверхкритические флюиды. Теория и практика. 2016, №2, с. 28-38.
4. Владыкин Н.В. Петрология калиево-щелочных лампроит-карбонатитовых комплексов, их генезис и рудоносность. Геология и геофизика, 2009, т. 50, № 12, с. 1443-1455.

УДК 556.18 + 556.388

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЮЖНЫХ РАЙОНАХ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ

Е.Ю. Потапова*¹¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

E-mail: potapova081962@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются вопросы, связанные с качеством подземных вод в южных районах Калужской области. В ряде водозаборов имеют место превышения норм по содержанию стронция в подземных водах хозяйственно-питьевого назначения.

Содержание стронция в подземных водах связано со стронцийсодержащими породами, к которым приурочены подземные воды озерско-хованского водоносного комплекса. Основным результатом исследований – районирование территории по условиям содержания стронция в породах и связанного с ним стронция в подземных водах.

Ключевые слова: водоснабжение, стронций, закономерности, Калужская область, структурно-тектонический анализ

THE PROBLEM OF GROUNDWATER QUALITY IN THE SOUTHERN REGIONS OF THE KALUGA REGION

E.U. Potapova*¹¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: E-mail: potapova081962@mail.ru

Abstract

The issues related to the quality of groundwater in the southern regions of the Kaluga region are considered. In a number of water intakes, there are exceedances of the MPC standards for the content of fluorine and strontium in groundwater for economic and drinking purposes. The content of strontium in groundwater is associated with strontium-containing rocks, to which the groundwater of the Ozersk-Khovansky aquifer complex is confined. The main result of the research is the zoning of the territory according to the conditions of strontium content in rocks and associated strontium in groundwater.

Key Words: water supply, strontium, regularities, Kaluga region, structural and tectonic analysis

Введение

Водоснабжение городов, поселков и деревень за счет использования подземных вод в южных районах Калужской области находится в стадии упадка в связи с общим снижением производства, в том числе и сельскохозяйственного, отсутствием средств на замену насосного оборудования и оборудования для очистки воды. Решение проблем перевода потребителей на альтернативные источники водоснабжения потребует больших материальных затрат. Особенно дорогостоящим мероприятием является очистка подземных вод от стронция стабильного производственными установками и бытовыми фильтрами.

Водоснабжение южных районов Калужской области: Жиздринского, Ульяновского, Хвостовического, в основном, базируется на использовании подземных вод, интенсивная эксплуатация которых началась в семидесятых годах. Продуктивными водоносными горизонтами на исследуемой территории являются упинский водоносный горизонт и озерско-хованский водоносный комплексы [1].

В 1997 году были проведены исследования, связанные с изучением содержания стронция в подземных водах, используемых для хозяйственно-питьевых целей в населенных пунктах юга Калужской области. Содержание стронция в подземных водах зачастую существенно превышало предельные нормы (7 мг/дм^3).

Повышенное содержание стронция имеет место по всей площади работ, особенно высокие содержания стронция отмечались в Ульяновском районе.

Были выявлены площадные закономерности распространения стронция в подземных водах, установлены причины, обуславливающие наличие высокого содержания стронция.

На основании данных первичного и вторичного гидрохимического опробования и привлечения большого объема информации по геологии и геофизике района в первом приближении удалось сделать следующее:

- оценить источники загрязнения подземных вод общим стронцием;
- выявить тектонические структуры различного порядка и ориентировки, наличием которых, с нашей точки зрения, обусловлено высокое содержание стабильного стронция в породах и подземных водах;
- предложить пути решения проблемы водоснабжения населенных пунктов водой, удовлетворяющей кондиционным требованиям;
- наметить цели и пути дальнейших исследований.

Методы исследований

Подземные воды озерско-хованского водоносного комплекса содержат стабильный стронций, зачастую концентрация стронция в несколько раз превышает предельно допустимые

нормы. Из 100 проб воды, отобранных для определения стронция, повышенное содержание стронция отмечалось в 50 % проб.

Наибольшее количество проб с повышенным содержанием стронция отмечается в Хвастовическом районе (21 проба), где водоснабжение базируется преимущественно на озерско-хованском комплексе.

Поиск необходимого аппарата для районирования территории привел к необходимости использования комплекса методов: аэрокосмических, геофизических, геологических, гидрохимических, гидрогеологических [2; 4].

Только такой подход дает возможность объяснить более чем хаотическую картину распространения стронция в подземных водах. В двух соседних скважинах, находящихся на расстоянии не более 100 м друг от друга, так как содержание стронция в пробах воды, отобранных из них, отличается на порядок и более.

На первом этапе исследований было проведено структурно-тектоническое районирование территории с использованием аэрокосмических, геофизических (гравиметрии, магнитометрии), геологических (кроме материалов геолого-съёмочных работ, проведенных на исследуемой территории, использованы данные глубокого бурения, проведенного на смежных территориях) и других методов.

На втором этапе исследований была проведена переинтерпретация геолого-съёмочных материалов и построены карты поверхности кровли упинского водоносного горизонта и озерско-хованского водоносного комплекса.

Результаты и их обсуждения

Как показал комплекс исследований, территория южных районов Калужской области строго структурирована, а рельеф и гидросеть контролируются локальными площадными и региональными линейными структурами.

Все выделенные площадные структуры различаются особенностями геологического разреза верхней части осадочного чехла в комплексе с характером гравитационного поля и строения кристаллического фундамента.

На структурно-тектонической карте (Рис.) показано 5 локальных площадных тектонических структур и ряд пересекающихся региональных зон нарушений различной ориентации, пересекающих и площадные структуры.

Тектонические подвижки создали условия для накопления и образования стронцийсодержащих пород, в зонах тектонических нарушений [3]. Генезис образования стронцийсодержащих пород является темой отдельной работы.

Результаты опробования подземных вод на содержание стронция показало, что скважины с повышенным его содержанием приурочены к зонам тектонических нарушений

– линейных региональных, либо локальных дуговых. Повышенное содержание стронция в породах так же приурочено к зонам тектонических нарушений.

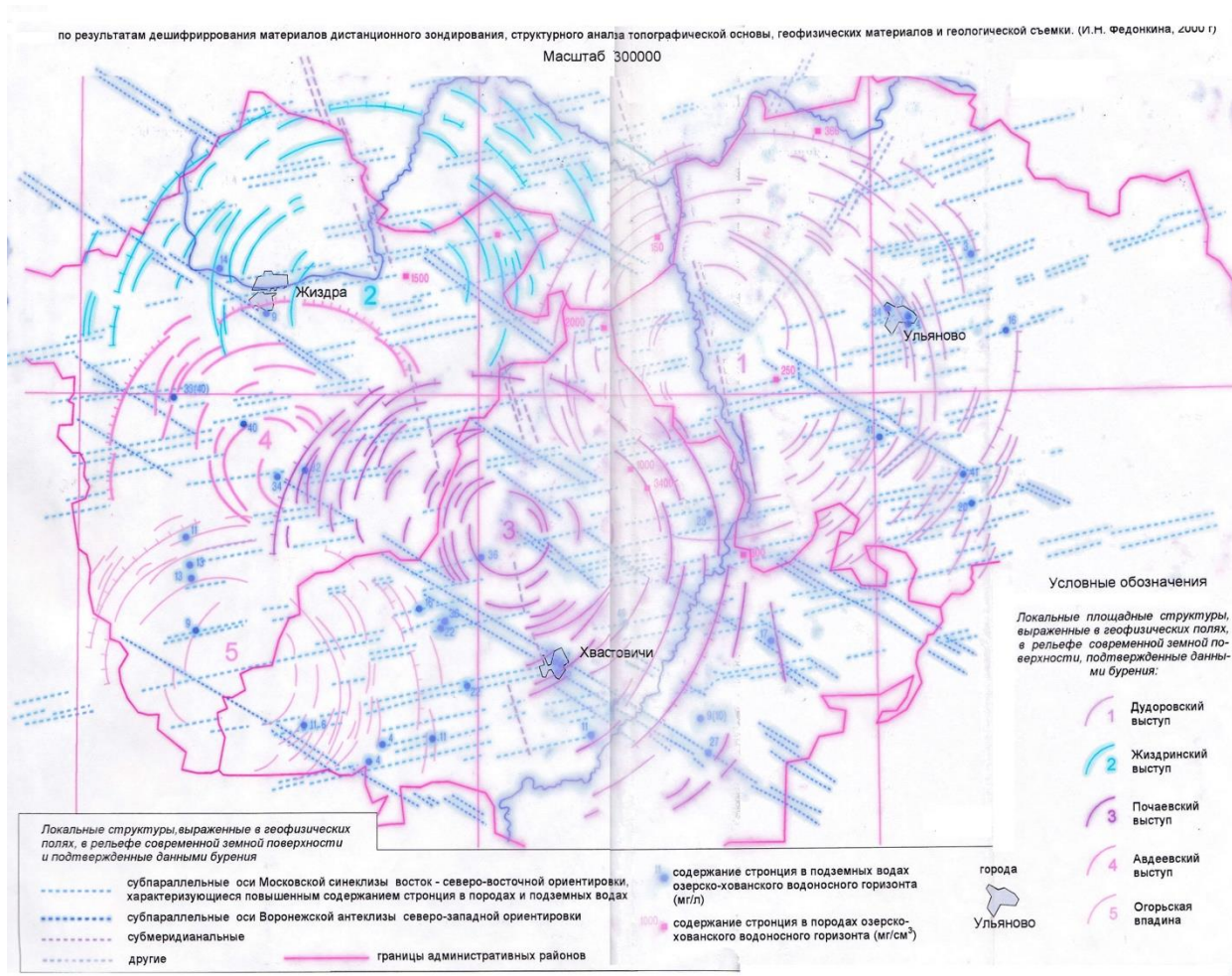


Рис. 1 Карта локальных тектонических структур южной части Калужской области.

На основании проведенных исследований можно сделать предварительные выводы о возможности использования действующих водозаборов и выборе альтернативных источников водоснабжения в каждом конкретном случае.

Заключение

Подземные воды озерско-хованского водоносного комплекса с повышенной концентрацией стронция не имеют сплошного распространения, а развиты в пределах отдельных локальных структур (Дудоровской и Почаевской). На остальной территории повышенное содержание стронция в воде отмечается в скважинах, расположенных в зонах нарушений.

Повышенное содержание стронция в подземных водах упинского водоносного горизонта наблюдается там, где существует тесная гидравлическая связь упинского водоносного горизонта и озерско-хованского водоносного комплекса (отсутствуют малевские глины,

разделяющие горизонты) и скважины расположены в зонах тектонических нарушений.

Бортовая часть Московской синеклизы и Воронежской антиклизы в пределах изучаемой площади осложнена локальными площадными структурами и линейными региональными зонами нарушений. Диаметры площадных структур составляют 10, 25, 35 км.

Структурно-тектоническое строение территории показывает, что не рекомендуется располагать скважины в зонах тектонических нарушений, где возможно наличие гидравлической связи с нижележащими подземными водами.

Использование для водоснабжения подземных вод озерско-хованского водоносного комплекса ограничено из-за стронция. Поэтому к использованию этого комплекса необходимо подходить с учетом выявленных закономерностей распространения стронция в подземных водах.

Наблюдается корреляция структур, ярко проявляющихся в рельефе земной поверхности, с особенностями гравитационного поля, с данными сейсморазведки ТЗ КМПВ.

Структуры отчетливо выражены в геологическом строении верхней части осадочного чехла, которое представлено по фактическим данным геологического бурения.

В рельефе земной поверхности структуры контролируют особенности гидро- и орографической сети, расчлененность территории, направление и особенности развития экзогенных геологических процессов.

При геологических и гидрогеологических исследованиях площадных и линейных структур на базе комплекса методов (аэрокосмических, геофизических, геологических, гидрогеологических, гидрохимических и др.) является обязательным условием для определения закономерностей геологического строения территории, гидрогеологических закономерностей и условий водопользования.

Более детальные исследования должны проводиться с учетом оценки региональных и локальных структур с привлечением крупномасштабных материалов.

Список литературы

1. Игнатович Н.К. Зональность, формирование и деятельность подземных вод в связи с развитием геоструктур. Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии, сб.15. Изд.МГУ, 1950.
2. Макаров В.И., Бабак В.И., Макарова Н.В., Федонкина И.Н. Внутриплатформенная неотектоника и негативные процессы на примере Русской плиты Сборник: Неотектоника и современная геодинамика континентов и океанов. Материалы XIX Тектонического совещания, 1996.
3. Николаев Н. И. Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР (Вопросы региональной и теоретической неотектоники). Госгеолтехиздат, 1962.
4. Фотиади Э.Э. Геологическое строение Русской платформы по данным региональных геофизических исследований и опорного бурения. Тр. ВНИИГеофизика, вып.4, 1958.

УДК 550:552.52(571.1)

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ В ОБРАЗЦАХ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

И.А. Родькина*¹, Е.С. Казак^{1,2}

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

E-mail: irina-rodkina2007@yandex.ru

²ООО «Фарватер», Москва, Россия, E-mail: Kanigu@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается применения гигрометрического метода для определения связанной воды в породах баженовской свиты. Представлены первые результаты определения содержания разных видов связанной воды гигрометрическим методом. Все полученные изотермы сорбции воды имеют хорошо выраженную S-образную форму, что позволяет определить максимально возможное количество связанной воды различного типа (моно-, поли- и капиллярной конденсации) как в образцах естественного сложения, так и после экстракции углеводородов. Точки перегиба изотерм экстрагированных образцов полностью соответствуют точкам перегиба изотерм образцов в естественном сложении. По полученным результатам может быть оценена площадь удельной поверхности, коэффициент гидрофобности и параметры связанной нефтенасыщенности.

Ключевые слова: связанная вода, баженовская свита, гигрометрический метод, изотермы сорбции

THE EXPERIENCE OF STUDYING BOUND WATER IN ROCK SAMPLES OF THE BAZHENOV FORMATION OF THE CENTRAL PART OF WESTERN SIBERIA

I.A. Rodkina*¹, E.S. Kazak²

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: irina-rodkina2007@yandex.ru

²LLC «Fairwater», Moscow, Russian Federation, E-mail: Kanigu@mail.ru

Abstract

The abstract considers the application of the hygrometric method for the determination of bound water in the rocks of the Bazhenov formation. The first results of determination of the content of different types of bound water by the hygrometric method are presented. All the obtained isotherms of water sorption have a well-defined S-shape, which makes it possible to determine the maximum

possible amount of bound water of various types (mono-, poly- and capillary condensation) in rock samples of natural addition and after extraction of hydrocarbons. The inflection points of the isotherms of the extracted rock samples fully correspond to the inflection points of the isotherms of the samples in natural addition. Based on the results obtained, it is possible to estimate the specific surface area of the samples, the hydrophobicity coefficient and the parameters of the associated oil saturation.

Key Words: Bound Water, Bazhenov Formation, Hygrometric Method, Sorption Isotherms

Введение

Баженовская свита (БС) распространена на площади более 1 млн. км² практически на всей территории Западной Сибири. По данным агентства Energy Information Administration (EIA, США) БС обладает наибольшим объёмом технически извлекаемых ресурсов нефти в мире [2]. Соответственно, исследования, направленные на повышение эффективности использования её огромного потенциала, бесспорно актуальны.

Одной из главных отличительных особенностей пород БС большинство ученых считают гидрофобность (75-80 %). Однако, данные последних исследований показали, что породы БС содержат как свободную, так физически и химически связанную воду [4; 5]. При этом содержание остаточной поровой воды, т.е. свободной и части связанной воды, находящейся в поровом пространстве породы и снижающей ее проницаемость для нефти, составляет 0,42-3,65 масс.% [4]. Присутствие в поровом пространстве отложений БС воды различных видов (моно-, поли- и капиллярносвязанной) значительно влияет прежде всего на процесс адсорбции углеводородов, а также на их движение при вытеснении водой из пласта в процессе разработки. Таким образом, в поровом пространстве пород БС могут быть как гидрофобные, так и гидрофильные участки поверхностей минералов, что в свою очередь будет определять смачиваемость отложений БС и влиять на поведение флюидов в пласте [5].

Гигрометрический метод – один из наиболее точных и в то же время не требующих специального дорогостоящего оборудования метод определения связанной воды в породах. Именно поэтому он был выбран авторами для экспериментальных исследований пород БС.

Методы исследований

Гигрометрический метод определения позволяет определить максимально возможное содержание связанной воды в породе, при этом возможно определить водосодержание мономолекулярносвязанной, полимолекулярносвязанной воды и воды капиллярной конденсации. Для этого в лабораторных условиях получают изотермы адсорбции паров воды W от равновесного давления P или относительного давления P/P_s пара при постоянной температуре (где P — давление паров воды, находящихся в равновесии с горной породой при данной температуре; P_s — давление насыщенных паров воды при той же температуре).

Величина P/P_s меняется в пределах от 0 (для абсолютно сухого воздуха) до 1 (для предельно водонасыщенного воздуха) [6; 3]. Изотерма адсорбции горной породы воды обычно строится в координатах $W=f(P/P_s)$ при $T=\text{const}$ и имеет характерную S образную форму. На кривых адсорбции исследователи выделяли различные области [6; 8; 3].

На начальном этапе роста P/P_s (примерно до 0,05) количество адсорбированного водяного пара горной породой увеличивается практически линейно. На следующем этапе линейность нарушается, и в интервале $0,05 < P/P_s < 0,35$ кривая выпукла относительно оси P/P_s . Считается, что при достижении горизонтального участка содержание адсорбированной воды, соответствует монослою (W_m). Выделить этот участок относительно сложно, так как он не приурочен к какому-либо конкретному граничному (пороговому) значению P/P_s , и определяется или же по графику, если пик очевиден, или же математическим расчётом (исходя из правила нахождения точек перегиба графика функции). Таким образом, диапазон значений P/P_s от 0,05 до 0,35 это область формирования мономолекулярной плёнки воды по внутренней и внешней поверхностям горной породы. При дальнейшем повышении P/P_s в области давлений паров воды от $0,3 \div 0,4$ до $0,6 \div 0,9$ следует второй линейный участок (иногда его называют второй областью Генри) соответствующей области полимолекулярной адсорбции. В этом режиме формируется полимолекулярная плёнка воды, сначала по внутренней поверхности (поры, каналы, трещины), а затем по внешней (скелет породы). Когда внутреннее пространство (пор, каналов, трещин) уже заполнено, проникновение молекул воды в него весьма затруднено, и сорбирующиеся молекулы воды формируют второй и последующие слои связанной воды, окончательно «закрывая» поверхность твёрдой фазы от газовой. Водосодержание горной породы при этом соответствует содержанию адсорбированной воды [6; 7; 9; 3; 1].

В диапазоне значений $P/P_s=0,6 \div 0,9$ кривая относительно резко растёт: при небольшом увеличении относительного давления паров водосодержание горной породы начинает очень быстро увеличиваться. Завершается процесс адсорбции влаги и начинает интенсивно развиваться уже другой процесс — капиллярная конденсация. Области адсорбции капиллярной конденсации разделяются по количеству выделенного тепла. Сначала в процессе адсорбции тепло выделяется за счёт понижения энергии молекул воды при их адсорбции на поверхности [6; 7; 3].

По мере развития процесса капиллярной конденсации заметного количества тепла уже не выделяется. Окончанию процесса адсорбции соответствует максимальная адсорбционная влагоёмкость $W_{\text{мав}}$ [9; 3].

Подробно методика экспериментальных исследований описана в [5]. Здесь же хотелось отметить, что все эксперименты были проведены на образцах пород БС до экстракции углеводов и после экстракции в аппарате Закса [3]. Образцы до и после экстракции являются дублёрами (двойниками), отображенными в непосредственной близости друг от друга.

Таким образом, образец до экстракции и образец после экстракции — это два физически разных образца. Все эксперименты проводились с 3-кратной повторностью, разница полученных данных на одном и том же образце при одном и том же значении P/P_s составила менее 3 отн. %.

Результаты и их обсуждение

Из всего многообразия полученных изотерм на образцах до экстракции было выделено четыре группы [5]. Выделение групп происходило на основании формы полученных изотерм, минерального состава образцов и содержания воды каждого вида (моно-, полисорбционной и капиллярной конденсации). Образцы, не вошедшие ни в одну из групп, анализировались каждый по отдельности.

Следует отметить, что точки перегиба в образцах, объединённых в группы, после экстракции, фиксируются при тех же значениях P/P_s , что и в соответствующих образцах до экстракции, что является дополнительным подтверждением выделения групп.

Содержание всех видов воды (моно-, полимолекулярной адсорбции и капиллярной конденсации) в образцах I группы после экстракции по отношению к соответствующим образцам до экстракции возросло в 2 раза и составило 0,65 масс.%, 2,08 масс.% и 2,94 масс.% соответственно.

Водосодержание моно- и полимолекулярной адсорбции в II группы после экстракции по отношению к аналогичному образцу до экстракции возросло также в 2 раза и составило 0,98 масс.% и 3,50 масс.% соответственно. Общее содержание всех видов воды (моно-, поли- и воды капиллярной конденсации) возросло от 2,85 масс.% для образца до экстракции до 7,58 масс.% для образца после экстракции.

Суммарное водосодержание в образцах группы III после экстракции более чем в 2,5 раза превышает водосодержание в образце до экстракции.

Образцы группы IV после экстракции не были предоставлены для исследования по причине недостатка кернового материала.

В рамках предыдущих работ по теме [5] были выделены образцы с наименьшим (0,15 масс.%) и наибольшим (3,90 масс.%) содержанием всех видов воды (моно-, поли- и воды капиллярной конденсации), определённым по методу адсорбции.

Однако экстрагированный дублёр с наименьшим содержанием сорбированной воды по результатам до экстракции не был предоставлен для исследования (по причине недостатка кернового материала).

Образец с наибольшим содержанием всех видов воды, как до экстракции, так и после экстракции углеводов отличается максимальным содержанием всех видов воды (моно-, поли- и воды капиллярной конденсации) (Рис. 1). Минеральный состав этого образца принципиально не отличается от состава образцов, относящихся к группе II, за исключением

наличия КПШ [5]. Изотермы адсорбции имеют S образный вид, с точками перегиба при $P/P_s=0,32$ и $0,9$. Водосодержание моно-, поли- и капиллярной конденсации в образцах после экстракции практически в 2 раза больше (7,3 масс.%), чем образцах до экстракции (4 масс.%).

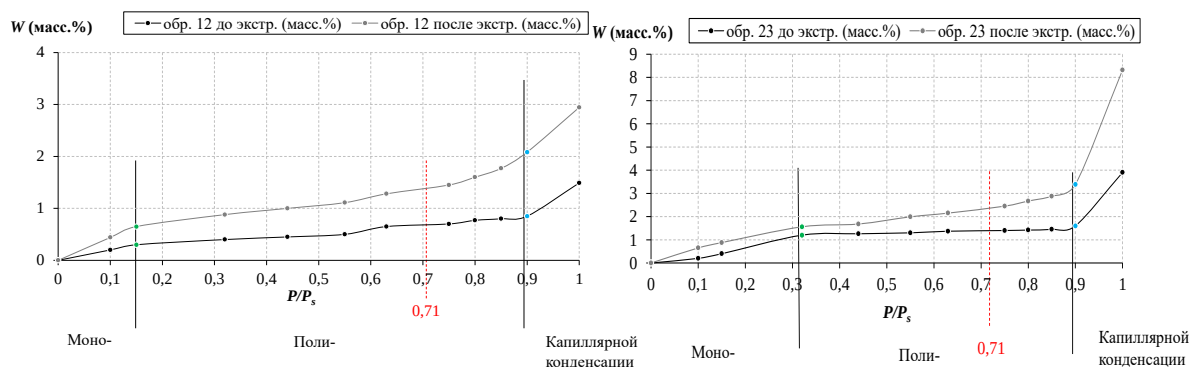


Рис. 1 Изотермы адсорбции паров воды на поверхности образцов пород БС: точки перегиба отмечены цветом; вертикальными чёрными линиями выделены области различных механизмов накопления воды в пустотном пространстве; красным цветом выделено P/P_s при неснижаемой водонасыщенности.

Данные, полученные для образцов, не объединённых в группы, не представляется возможным как-либо систематизировать. Однако все изотермы имеют выраженную S образную форму с первой точкой перегиба в диапазоне P/P_s от 0,15 до 0,23 (определяется по графику или математически) и второй точкой перегиба практически во всех образцах при $P/P_s=0,9$.

Таким образом, во всех исследованных образцах после экстракции, так же, как и в образцах до экстракции, можно выделить водосодержание мономолекулярной адсорбции, полимолекулярной адсорбции и воды капиллярной конденсации, при этом наблюдается увеличение содержания всех видов воды в образцах после экстракции.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований позволили количественно оценить водосодержание различных видов связанной воды в образцах пород БС до экстракции и после экстракции. По полученным изотермам сорбции удалось выделить различные механизмы взаимодействия водяного пара и поверхности образцов пород БС, а также по форме изотерм адсорбции и минеральному составу некоторые образцы были объединены в группы.

Необходимо отметить, что гигрометрический метод представляется перспективным для определения различных типов воды в породах БС. В результате исследований впервые получены изотермы адсорбции паров воды для образцов пород БС после экстракции углеводов в аппарате Закса и до экстракции. Исходя из того, что каждая из экспериментальных точек получена по 3-м параллельным образцам, различным по геометрии и весу, но отобраным в непосредственной близости друг к другу, а результаты определения отличаются не более 3 отн.%, можно судить о том, что сорбция водяного пара идет по всей внутренней и всей

внешней поверхности равномерно. Соответственно в дальнейшем для сланцевых пород эксперименты можно проводить на кусочках образцов, не растирая их в порошок.

Список литературы

1. Борисенко С.А. [и др.] Оценка лиофильности пород баженовской свиты методами адсорбции и ядерной магнитной релаксометрии [Журнал]. - [б.м.] : Нефтяное хозяйство, 2017 г.. - стр. 12-17.
2. Выгон Г. [и др.] Нетрадиционная нефть: станет ли бажен вторым баккеном? [Книга]. - Москва : [б.н.], 2013. - стр. 72.
3. Гудок Н.С., Богданович Н.Н. и Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтесодержащих пород [Книга]. - Москва : Недра, 2007. - стр. 616.
4. Казак Е.С., Казак А.В. и Спасенных М.Ю. Определение остаточного водосодержания в нетрадиционных низкопроницаемых нефтяных сланцах (на примере баженовской свиты) [Журнал] // EAGE/SPE Joint Workshop on Shale Science 2019: Prospecting and Development. - Москва : [б.н.], 2019 г.
5. Родькина И. А. и Казак Е. С. Количественное определение связанной воды в породах баженовской свиты [Журнал] // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. - Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2019 г
6. Chenevert Martin E. Shale Alteration by Water Adsorption [Journal] // Journal of Petroleum Technology. - 1970. - pp. 9-22.
7. Osisanya Samuel Olusola Experimental Studies of Wellbore Stability in Shale Formations [Book]. - 1991. - p. 191.
8. Poupon A. and Leveaux J Evaluation of Water Saturation in Shaly Formations [Journal] // The Log Analyst. - 12 1971.
9. Sokolowska Z [et al.] Adsorption of water vapor by soils: Investigation of the influence of organic matter, iron, and aluminum on energetic heterogenetty of soil clays [Article] // Clays and Clay Minerals. - 1993. - Vol. Vol. 4.

УДК 550.461

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОД ИСТОРИЧЕСКОГО РУДНИКА «ГЕРБЕРТЦ» (ЮЖНАЯ КАРЕЛИЯ)

Е.С. Сидкина^{*1}, А.С. Торопов^{1,2}, А.А. Конышев^{1,3}

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия, E-mail: SidkinaES@yandex.ru

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: torop990@gmail.com

³Институт геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, Россия, E-mail: icelopa@gmail.com

Аннотация

Получены первые данные о химическом составе вод исторического рудника «Гербертц», расположенного в Питкярантском районе (Северное Приладожье). Всего изучено 5 проб воды, отобранных из западного и восточного стволов шахты «Гербертц-I» с поверхности и с глубины (2-3 м), и из шахты «Гербертц-II» с поверхности. Для определения химического состава воды были использованы современные аналитические методы: ICP-AES, ICP-MS, ионная хроматография, потенциометрическое титрование. Содержание растворенного кислорода и углекислоты, температуру, pH и Eh определяли на точке отбора. Результаты измерений показали снижение температуры, величины Eh, а также содержания растворенного кислорода с глубиной. Изученные воды являются гидрокарбонатными или гидрокарбонатно-сульфатными кальциевыми или кальциево-магниевыми. При низких значениях минерализации (62 – 94 мг/л) в изучаемых водах отмечены достаточно высокие содержания микроэлементов (Fe, Zn, Cu, Pb, U, Th, Al, V, Cr, Co, As, Rb, Sr и Mo), превышающие значения геохимического фона. Наиболее высокие содержания имеют элементы рудной специализации: в первую очередь Fe, Zn и Cu, источником которых являются сульфидные минералы (пирит, сфалерит, халькопирит), содержащиеся в породах рудника.

Ключевые слова: Северное Приладожье, коэффициент концентрирования, рудная специализация

GEOCHEMICAL FEATURES OF THE WATERS OF THE HISTORICAL MINE "HERBERTZ" (SOUTH KARELIA)

E.S. Sidkina^{*1}, A.S. Toropov^{1,2}, A.A. Konyshov^{1,3}

¹Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, E-mail: SidkinaES@yandex.ru

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: torop990@gmail.com

³Institute of Geology, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation, E-mail: icelopa@gmail.com

Abstract

The first data on the chemical composition of the waters of the historical mine "Herberz" located in the Pitkäranta area (Northern Ladoga region) have been obtained. Water samples were taken from the western and eastern shafts of the «Herberz-I» mine from the surface and from a depth (2-3 m), and from the «Herberz-II» mine from the surface. Current analytical methods were used to measure the chemical composition of water: ICP-AES, ICP-MS, ion chromatography, potentiometric titration. The content of dissolved oxygen and carbon dioxide, temperature, pH and Eh were measured at the sampling point. The results showed a decrease in temperature and Eh, as well as in the content of dissolved oxygen with depth. The studied waters are HCO_3 or $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ Ca or Ca-Mg. Low salinity values (62 – 94 mg/l) and at the same time high contents of trace elements (Fe, Zn, Cu, Pb, U, Th, Al, V, Cr, Co, As, Rb, Sr and Mo) exceeding the values of the geochemical backgrounds were noted in the studied waters. The elements of ore specialization have the highest contents. First of all, this concerns Fe, Zn and Cu, the source of which is sulfide minerals (pyrite, sphalerite, chalcopyrite) contained in the rocks.

Key Words: Northern Ladoga region, concentration factor, ore

Введение

Рудник «Гербертц» - один из наиболее хорошо сохранившихся объектов добычи магнетитовой руды конца XIX – начала XX века в Северном Приладожье. Рудник получил свое название от одного из владельцев АО «Ладога» Б. Гербертца и состоит из двух объектов «Гербертц-I» (два шахтных ствола – Западный и Восточный) и «Гербертц-II» (один ствол). Оба эти объекта относятся к Новому рудному полю, расположенному в 1,5 – 2 км от г. Питкяранта. Кроме рудника «Гербертц» на Новом рудном поле также разрабатывалась шахта «Валкеалампи», в настоящее время обрушенная и поэтому недоступная для опробования.

На руднике «Гербертц-I» добыча велась с 1896 по 1903 годы. Всего было добыто 31 300 т магнетитовой руды. На расстоянии 33 м друг от друга было пройдено два вертикальных шахтных ствола глубиной 36 м (Западный) и 57 м (Восточный). Первые 15–16 м выработки шли по рыхлым четвертичным отложениям, а ниже – по кристаллическим породам. Рудное тело мощностью 0,5–1,5 м было вскрыто на глубине соответственно 28 м и 43 м в западном и восточном стволе соответственно. Добыча руды в шахте осуществлялась тремя уровнями штреков, пройденными на глубине 18 м, 25 м и 30 м в обе стороны от Восточного ствола по простиранию рудного тела [1; 2].

На территории рудника сохранились отвалы, которые привлекают внимание геологов своим минеральным разнообразием. В настоящее время рудник «Гербертц-I» является памятником историко-культурного наследия Карелии, на нем проводят экскурсии для школьников и студентов.

Рудник «Гербертц-II» располагается в 550 м от «Гербертц-I». Всего было добыто 619 т магнетитовой руды в период с 1899 по 1900 годы. Глубина шахтного ствола составила 25 м, первая треть пройдена в рыхлых породах. Сохранился небольшой отвал [1; 2].

В настоящее время шахты затоплены. В стволах рудника «Гербертц-I» вода стоит на уровне пятого от поверхности сохранившегося венца. Над укрепленной частью стволов имеются воронки обрушения, сползание рыхлого грунта. Несмотря на связанные с этим сложности нам удалось провести опробование вод с целью изучения их химического состава.

Методы исследований

Пробоотбор природных вод затопленных рудников проходил в 2021 и 2022 г. Всего было отобрано 5 проб воды: 22-01 и 22-02 отобраны из шахты «Гербертц-I» (западный ствол) с глубин 0,5 и 3 м соответственно, 22-03 – из шахты «Гербертц-II», П1 и П2 – с глубины 2 м и с поверхности из шахты «Гербертц-I» (восточный ствол).

При пробоотборе анализировались показатели pH, Eh, электропроводность (HM Digital, Южная Корея), содержание растворенного кислорода (оксиметр WaterLiner WDO-64) и температура воды на разных глубинах. Также на точке определяли содержание растворенной CO₂ титриметрией. Пробы для элементного анализа на точке опробования фильтровали через полиэфирсульфоновые мембраны с размером пор 0,45 мкм в чистые пробирки типа Фалькон объемом 15 мл. Для ионной хроматографии пробы были отобраны в отдельные пробирки объемом 15 мл с аналогичной процедурой фильтрации.

Для анализа компонентов карбонатной системы пробы отобраны в бутылки объемом 300 мл, предварительно трижды промытые исследуемой водой.

Содержания Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, S определяли методом ICP-AES с помощью плазменного спектрометра iCAP 6500 DUO (Thermo Scientific), содержания микроэлементов определены методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре X-series 2 (Thermo Scientific). Анионный состав определен методом ионной хроматографии (Dionex ICS-6000). Содержание HCO₃⁻ определено методом потенциометрического титрования с использованием высокоточного анализатора Эксперт-001 (ООО Эконикс-Эксперт) по методике ГОСТ 31957-2012.

Результаты и их обсуждение

Рассматриваемые воды имеют низкую величину минерализации – от 62 до 94 мг/л (Табл. 1). По величине pH рассматриваемые воды являются слабокислыми и нейтральными, значения водородного показателя варьировали в узком интервале (от 6,33 до 6,96).

Во всех шахтах с глубиной заметно уменьшение Eh, что вероятно в первую очередь связано с уменьшением количества растворенного кислорода, который является главным потенциалзадающим компонентом поверхностных природных вод.

Изучаемые воды схожи по макрокомпонентному составу. Вода, отобранная из восточного ствола «Гербертц-I», является $\text{HCO}_3 \text{ Ca-Mg}$, из западного ствола – $\text{HCO}_3 \text{ Ca}$, а из шахты «Гербертц-II» – $\text{HCO}_3\text{-SO}_4 \text{ Ca}$.

Табл. 1 Химический состав вод рудника «Гербертц».

Компоненты и показатели	Ед. изм.	Гербертц-I восточная		Гербертц-I западная		Гербертц-II	Значение геохим. фона [3]
		отобрана с поверхности П2	отобрана с глубины 2м П1	отобрана с поверхности 22-01	отобрана с глубины 3м 22-02	отобрана с поверхности 22-03	
Температура	°C	10,2	4,8	11,2	7,6	9,9	
pH	ед.	6,47	6,96	6,58	6,33	6,75	
Eh	мВ	42	-40	-102	-172	-92	
O ₂	мг/л	4	1,9	3,34	2,6	2,75	
CO ₂		нд	нд	50,4	54,6	31,5	
M		66	94	75	79	62	
Ca ²⁺		9,82	13	12,06	12,76	10,91	2,32
Mg ²⁺		3,39	4,38	2,85	3,00	2,33	0,77
Na ⁺		3,62	5,62	4,54	4,42	3,57	1,04
K ⁺		2,06	1,43	1,51	1,20	0,79	0,34
HCO ₃ ⁻		51	66,4	52,7	54,7	33,7	
SO ₄ ²⁻		7,5	6,82	4,05	5,36	13,77	
Cl ⁻		1,4	1,7	1,19	1,15	0,87	
Al		0,36	0,35	0,36	0,38	0,19	0,034
Fe		0,89	4,75	2,85	3,22	2,21	0,07
Si		4,70	9,50	8,57	9,03	4,58	
Li		4,14	8,69	6,06	7,22	0,39	
Ti		1,75	2,89	6,62	6,71	6,42	
V	мкг/л	0,53	2,16	2,17	2,47	1,40	0,19
Cr		0,59	0,58	0,13	0,13	<ПО	0,28
Mn		66,2	192,2	112,4	115,4	105,1	
Co		0,16	0,21	0,71	0,66	0,30	0,03
Ni		0,83	<ПО	2,40	2,00	0,71	0,28
Cu		8,04	1,62	4,11	2,59	3,58	0,53
Zn		54,69	16,94	34,60	16,80	13,40	0,96
As		1,00	1,25	1,11	1,32	0,63	0,08
Rb		5,02	2,11	3,82	2,59	2,89	0,54
Sr		28,23	43,27	40,46	37,69	42,13	14,70
Y		11,54	19,28	15,51	19,51	1,61	
Mo		0,50	0,35	0,09	0,17	0,40	0,11
Ba		8,01	8,70	11,95	10,42	11,51	
W		0,17	0,70	0,10	0,62	0,23	
Pb		<ПО	1,25	2,08	2,57	0,15	0,08
Th		0,52	1,65	1,25	1,51	0,13	0,01
U		0,43	0,98	0,87	1,03	0,08	0,01

Примечание: нд – нет данных; М – минерализация дана как сумма основных ионов; жирным выделены значения, превышающие геохимический фон

В микрокомпонентном составе ярко выделяются химические элементы рудной специализации. В первую очередь – это Fe, Zn и Cu. При этом содержание Fe в пробах, отобранных на глубине выше, чем в поверхностных, а Zn и Cu наоборот. Наиболее вероятно,

что Fe, Zn и Cu поступают в природные воды при окислительном растворении сульфидных минералов (пирит, сфалерит, халькопирит), содержащихся в породах рудника. Некоторое увеличение концентраций также отмечено для Pb, U и Th. Кроме вышеперечисленных химических элементов отмечены превышения значений геохимического фона для Al, V, Cr, Co, As, Rb, Sr и Mo. За значения геохимического фона приняты данные по поверхностным водам Северо-Западного федерального округа России, а также сопредельных территорий Финляндии и Норвегии [3].

Для оценки степени концентрирования химических элементов в изучаемых водах был рассчитан коэффициент K_x , предложенный А.И. Перельманом [4]:

$$K_x = (m_x \times 100) / (a \times n_x),$$

где m_x – содержание химического элемента x в воде (мг/л); a – сумма минеральных веществ, растворенных в воде (мг/л); n_x – содержание элемента x в породе (%). За состав пород приняты средние содержания химических элементов в верхней части континентальной коры [5].

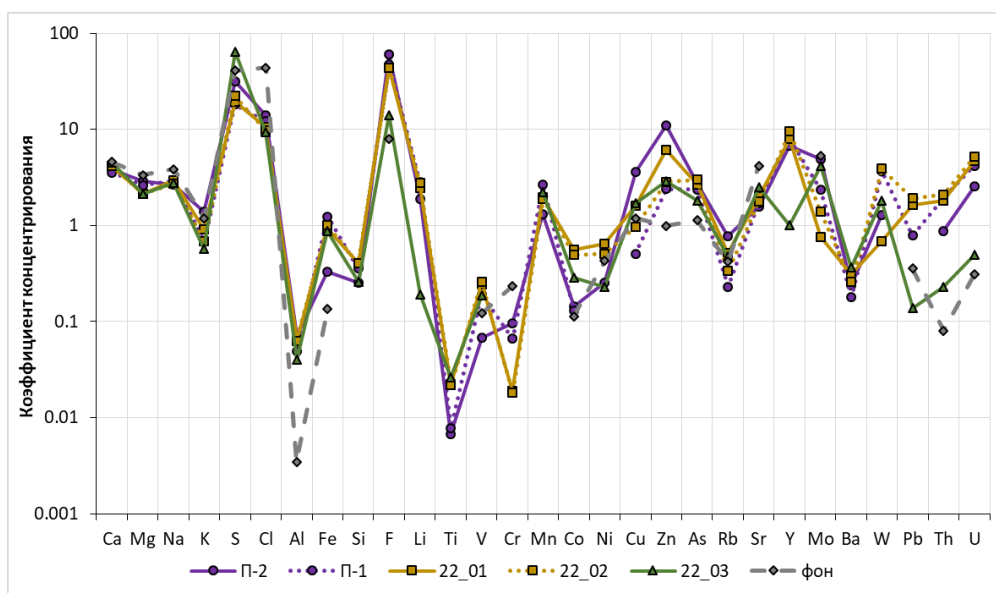


Рис. 1 Коэффициенты концентрирования некоторых элементов в водах исторического рудника Гербертц.

Согласно расчетам большая часть рассматриваемых элементов относится к группе элементов среднего концентрирования, к группе сильного концентрирования можно отнести только S, а к группе слабого рассеяния – Pb, Ba, Co, No, Ti, V, Cr, Si, Al. На Рис 1. видно, что профиль элементов точки 22-03 отличается от других рассматриваемых вод в точках значений F, Li, Y, Pb, U и Th. Эта проба была отобрана из шахты «Гербертц-II», находящейся на удалении от рудника «Гербертц-I», и вероятно эти различия связаны с отличиями в составах пород, с которыми происходит взаимодействие.

Элементный профиль точки 22-03 указывает на отсутствие дренирования либо его незначительное проявление для пород, обогащенных Li, Pb, Th и U, которые являются источниками данных элементов в воде других стволов изучаемых шахт, либо отсутствие подтока подземных вод с таким элементным профилем. Также отмечается более высокая концентрация сульфат-ионов в этой точке.

Величины коэффициентов концентрирования, рассчитанные для фоновых значений, в точках макроэлементов как правило несколько выше величин, рассчитанных для вод рудников, а в точках микроэлементов наоборот ниже. Наиболее хорошо это проявилось для Al, Fe, Zn, U и Th, но также заметно для Co и As. Высокие значения коэффициентов концентрирования для Cu и Ni в фоновых значениях обусловлены высокими концентрациями этих металлов в природных водах районов комбинатов «Североникель», «Печенганикель», входящий в территорию расчета фона.

Заключение

Для вод исторических рудников можно отметить следующие геохимические особенности:

- в шахтах с глубиной отмечено снижение температуры, величины Eh, а также содержания растворенного кислорода;
- при низкой величине минерализации в изученных водах содержится относительно высокое содержание микроэлементов, особенно это касается элементов рудной специализации;
- содержание Fe, Zn, Cu, Pb, U, Th, Al, V, Cr, Co, As, Rb, Sr и Mo в изученных природных водах превышает значения геохимического фона;
- согласно расчету коэффициентов концентрирования Fe, Li, Mn, Cu, Zn, As, Sr, Y, Mo, W, Pb, Th, U относятся к группе со средней степенью концентрирования, S – к группе сильного концентрирования, а Pb, Ba, Co, No, Ti, V, Cr, Si, Al – к группе слабой степени рассеяния.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №22-77-10011.

Список литературы

1. Дорога горных промыслов (Ответственный редактор В. А. Шеков) / Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 362 с.
2. Trüstedt, O. Die Erzlagerstätten von Pitkäranta am Ladoga-See. Bull. la Comm. Géologique Finlande, 1907, 333 p.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-(35), 36 – Мурманск. Объяснительная записка / СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007, 281 с.

4. Перельман А.И. Геохимия природных вод / М.: Наука, 1982. – 152 с.
5. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры / Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 383 с.

УДК 556.332.52(571.1)

ГИДРОГЕОХИМИЯ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ГРАНИТНЫХ КАРЬЕРОВ НОВОСИБИРСКОЙ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

А.Ф. Сухорукова^{*1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия, E-mail
SukhorukovaAF@sbras.ipgg.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация

Получены первые детальные геохимические данные (включая информацию о радионуклидах, концентрации радона) по дренажным водам разрабатываемых и затопленных гранитных карьеров Новосибирской городской агломерации. Цель исследования – выявление особенностей химического состава дренажных вод (широкого спектра химических элементов от Li до U) и оценка влияния сброса дренажных вод на окружающую среду, в первую очередь степень их радиологической опасности. Изучены дренажные воды шести карьеров, которые заложены в гранитах Новосибирского и Колыванского гранитоидного массива.

Ключевые слова: гидрогеохимия, дренажные воды, радионуклиды, гранитный карьер, Новосибирск, Западная Сибирь

HYDROGEOCHEMISTRY OF DRAINAGE WATER OF GRANITE QUARRY IN THE NOVOSIBIRSK CITY AGGLOMERATION

A.F. Sukhorukova^{*1,2}

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics A.A. Trofimuk SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation, E-mail
SukhorukovaAF@sbras.ipgg.nsc.ru

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The first detailed geochemical data (including information on radionuclides, radon concentrations) on drainage waters from mined and flooded granite quarries in the Novosibirsk urban agglomeration have been obtained. The purpose of the study is to identify the features of the chemical composition of drainage water (a wide range of chemical elements from Li to U) and assess the impact of drainage water discharge on the environment, primarily the degree of their radiological hazard. The drainage waters of six quarries, which are laid in the granites of the Novosibirsk and Kolyvan granitoid massifs, have been studied.

Key Words: geochemistry, drainage waters, radionuclides, granite quarries, Novosibirsk, Western Siberia

Введение

Новосибирск является единственным крупным городом в Западной Сибири и даже в целом России, который в силу исторических причин, был заложен на гранитном массиве и в окрестностях которого открыто урановое месторождение «Пригородное». В связи с этим присутствие радионуклидов в подземных водах носит природный характер. Их повышенные содержания обусловлены наличием рассеянных акцессорных радиоактивных минералов в гранитоидах крупного Новосибирского массива. В 1980-90-е годы в Новосибирской области были выявлены более десяти месторождений радоновых вод. В пределах Новосибирской городской агломерации и в ее окрестностях в настоящее время разрабатывается несколько гранитных карьеров разной степени обводненности – Борок, Мочище, Скала и Новобибеево. Известны затопленные карьеры, которые в настоящее время используются в городском хозяйстве в рекреационных целях – Горский и Тулинский. Несмотря на длительное время их эксплуатации до настоящего времени практически не проводились исследования химического состава дренажных вод, в том числе распределения в них радионуклидов. Результаты исследований по природным водам города Новосибирска и их радионуклидному составу приведены в последние годы в работах лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН [1-4].

В мировой научной литературе наибольшее число исследований посвящено изучению геологических, гидрогеологических и геохимических факторов, влияющих на распределение природных радионуклидов в водах различного изотопно-гидрогеохимического облика [5-7]. В России на протяжении длительного времени ведутся исследования, направленные на изучение различных аспектов радиохимии природных вод и моделирования геохимических процессов в водных средах. Среди последних работ в данной области следует отметить [8; 9].

Методы исследований

Непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 , HCO_3^- с помощью оборудования (Hanna HI9125, кислородомер АКПМ-1-02Л) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Измерение содержаний ^{222}Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН. Последующее изучение химического состава проб воды методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП), проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ.

Результаты и их обсуждения

Изучаемые гранитные карьеры на территории Новосибирской области, представлены действующими: Борок, Новобибеевский, Скалинский; и затопленными Тулинским, Каменским и Горским (Рис.).

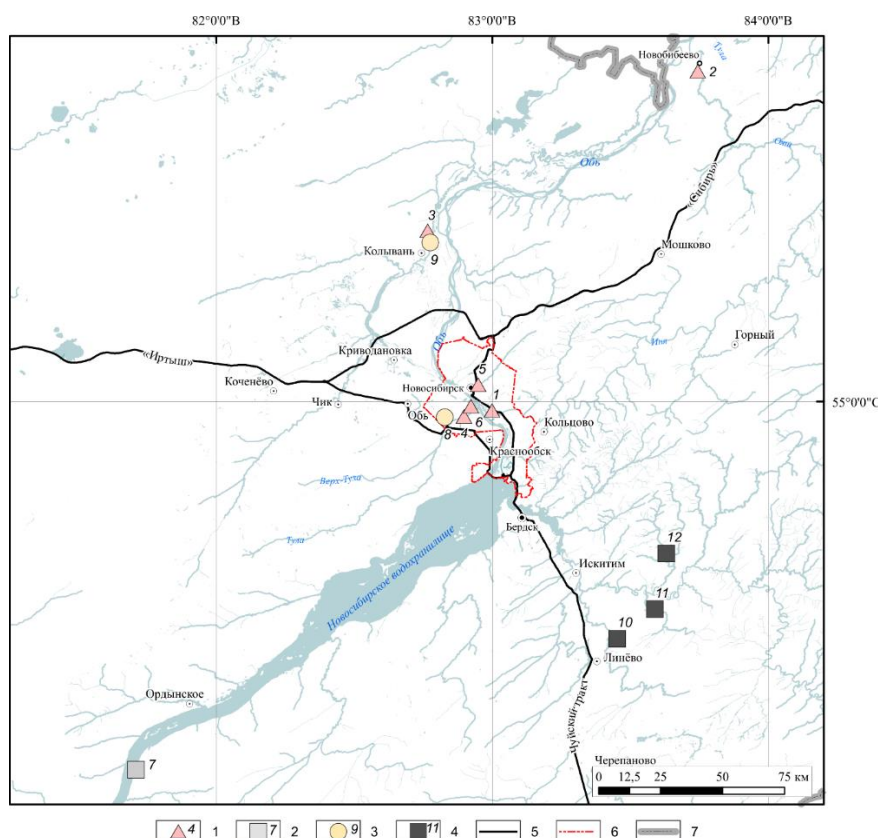


Рис. 1 Местоположение изученных объектов.

1 – 4 – карьеры: 1 – гранитные; 2 – мраморный; 3 – песчаные; 4 – угольные; 5 – федеральные трассы; 6 – граница г. Новосибирск; 7 – граница Новосибирской области. 1 – 3; 10 – 12 – действующие карьеры: 1 – Борок; 2 – Новобибеевский; 3 – Скалинский; 4 – 9 – затопленные: 4 – Тулинский; 5 – Каменский; 6 – Горский; 7 – Абрашинский; 8 – Кировский; 9 – Подгорный; 10 – Ургунский; 11 – Горловский.

Карьеры Борок, Тулинский, Каменский и Горский заложены в гранитах Новосибирского гранитоидного массива, Новобибеевский – Обского массива. Оба этих массива принадлежат Приобскому монцодиорит-граносиенит-гранитному мезоабиссальному комплексу (Рз–Т_{1р}). Скалинский карьер ведет добычу гранитов из Колыванского гранитоидного массива, принадлежащего Барлакскому гранит-лейкогранитовому мезоабиссальному комплексу (Т_{1–2б}) [10].

Геохимические особенности

В работе были изучены дренажные воды карьеров Борок, Каменский, Тулинский и Горский. Так воды карьера *Борок* характеризуются $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Na-Mg-Ca, Cl- $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Mg-Na-Ca и Cl- $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Na-Mg-Ca составом с величиной общей минерализации 583 – 697 мг/дм³ и содержанием кремния 0,89 – 10,53 мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +150,2 – +261,0 мВ, pH 7,6 – 8,5 и содержанием $\text{O}_{2\text{раств.}}$ 3,43 – 11,43 мг/дм³.

Воды *Каменского* карьера отличаются $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$ Ca-Na составом с величиной общей минерализации 166 – 349 мг/дм³ и содержанием кремния 1,87 – 4,21 мг/дм³. Воды отличаются слабощелочным pH 7,6 – 8,5 и содержанием $\text{O}_{2\text{раств.}}$ 4,00 мг/дм³. Воды *Тулинского* карьера Cl- $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Na-Ca-Mg и $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$ Ca-Mg-Na состава с величиной общей минерализации 454 – 541 мг/дм³ и содержанием кремния 0,32 – 0,78 мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +131,3 – +250,0 мВ, pH 8,7 – 8,8 и содержанием $\text{O}_{2\text{раств.}}$ 8,58 – 11,30 мг/дм³. Воды *Горского* карьера отличаются Cl- $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Na-Mg-Ca и $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$ Na-Mg-Ca составом с величиной общей минерализации 403 мг/дм³ и содержанием кремния 0,25 – 0,40 мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +139,3 – +250,0 мВ, pH 8,5 – 8,7 и содержанием $\text{O}_{2\text{раств.}}$ 8,20 – 16,59 мг/дм³.

Воды карьера *Новобибеевский* дренируют гранитоиды Обского массива и характеризуются $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Na-Mg-Ca составом с величиной общей минерализации 385 – 461 мг/дм³ и содержанием кремния 5,02 – 9,60 мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +107,8 – +145,6 мВ, pH 7,8 – 8,6 и содержанием $\text{O}_{2\text{раств.}}$ 6,50 – 14,38 мг/дм³. Воды *Скалинского* карьера соотносятся с Барлакским гранит-лейкогранитовым мезоабиссальным комплексом. Они относятся к $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ Na-Mg-Ca и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Na-Mg-Ca типам с величиной общей минерализации 279 – 787 мг/дм³ и содержанием кремния 8,22 – 10,21 мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +84,6 – +167,0 мВ, pH 6,9 – 7,0 и содержанием $\text{O}_{2\text{раств.}}$ 3,75 – 4,60 мг/дм³.

Радионуклидная типизация

В настоящее время в водах карьера *Борок* природные радионуклиды содержатся в водах в следующих пределах (мг/дм³): ^{238}U от 0,009 до 0,213 и ^{232}Th от $1,00 \cdot 10^{-6}$ до $9,62 \cdot 10^{-5}$. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение в водах варьирует в интервале от $9,71 \cdot 10^{-5}$ до $1,49 \cdot 10^{-3}$. Активность ^{222}Rn варьирует в диапазоне от 1 до 89 Бк/дм³, что позволяет отнести их к классу очень слаборадоновых (по классификации Н.И. Толстихина). В водах *Тулинского* карьера содержания природных радионуклидов меняются в диапазоне (мг/дм³): ^{238}U от 0,0121 до 0,0123 и ^{232}Th от $3,20 \cdot 10^{-6}$ до $7,08 \cdot 10^{-6}$. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение в водах варьирует в интервале от $2,4 \cdot 10^{-4}$ до $5,77 \cdot 10^{-4}$ и активность ^{222}Rn не превышает 2 Бк/дм³. Содержания природных радионуклидов в водах *Горского* карьера

варьируют (мг/дм³): ²³⁸U от 0,010 до 0,012 и ²³²Th от $1,00 \cdot 10^{-5}$ до $1,15 \cdot 10^{-5}$. ²³²Th/²³⁸U отношение в водах варьирует в интервале от $9,30 \cdot 10^{-4}$ до $1,02 \cdot 10^{-3}$.

В водах *Новобибеевского* карьера природные радионуклиды содержатся в водах в следующих пределах (мг/дм³): ²³⁸U от 0,010 до 0,012 и ²³²Th от $2,60 \cdot 10^{-6}$ до $3,10 \cdot 10^{-5}$. ²³²Th/²³⁸U отношение в водах варьирует в интервале от $2,43 \cdot 10^{-4}$ до $2,69 \cdot 10^{-3}$. Активность ²²²Rn варьирует в диапазоне от 2 до 39 Бк/дм³, что позволяет отнести их к классу очень слаборадоновых. В водах *Скалинского* карьера природные радионуклиды содержатся в водах в следующих пределах (мг/дм³): ²³⁸U от 0,940 до 1,400 и ²³²Th от $3,93 \cdot 10^{-5}$ до $2,16 \cdot 10^{-5}$. ²³²Th/²³⁸U отношение в водах варьирует в интервале от $4,20 \cdot 10^{-5}$ до $1,78 \cdot 10^{-3}$. Активность ²²²Rn варьирует в диапазоне от 154 до 573 Бк/дм³, что позволяет отнести их к классам слаборадоновым и умеренно радоновым.

Заключение

Геологические и гидрогеологические условия изученных вод контролируют геохимические параметры среды. Установлены высокие концентрации радионуклидов в водах гранитных массивов, где содержания урана достигают 1,40 мг/дм³ и тория – $2,16 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, что вполне логично, так как их породы аккумулируют в себе некогерентные элементы.

Более детально оценены объемы урана и тория, выносимых водами действующего карьера Борок, который расположен в черте города. Ежегодно в р. Иня и далее в р. Обь сбрасывается в среднем 2,3 млн м³ дренажных вод. В настоящее время в водах карьера Борок природные радионуклиды содержатся в следующих пределах (мг/дм³): ²³⁸U от 0,009 до 0,213 и ²³²Th от $1,00 \cdot 10^{-6}$ до $9,62 \cdot 10^{-5}$, средние концентрации урана составляют $6,58 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³ и тория – $2,67 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³. Годовые объемы выносимого урана и тория составляют 151,4 и 61,4 килограмма соответственно. При этом следует отметить, что загрязнения радиоактивными элементами реки Иня, куда идет сброс, не наблюдается. За счет процессов смешения речных вод с дренажными, концентрации (мг/дм³): ²³⁸U варьируют от $2,32 \cdot 10^{-3}$ до $2,40 \cdot 10^{-3}$, а ²³²Th от $3,08 \cdot 10^{-6}$ до $1,39 \cdot 10^{-5}$. Подобные оценки выполнены для рек Ояш, Чаус, в которые идет сброс дренажных вод из карьеров Новобибеевский, Скалинский.

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что разработка месторождений твердых полезных ископаемых не несет в себе опасности для окружающей среды. Сброс дренажных вод в речную систему восточных районов Новосибирской области не сказывается на качестве поверхностных вод.

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ NoNo FWZZ-2022-0014, FSWW-2023-0008, аналитические работы по исследованию изотопного состава водорода, кислорода вод и DIC –при поддержке проекта No 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Список литературы

1. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В., Каменова-Тоцева Р.М., Максимова А.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод "Каменское" (г. Новосибирск). Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021; том 332; № 4: 192-208. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/4/3162>
2. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод "Инские источники" (юг Западной Сибири). Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021; том 332; № 3: 135-145. DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3108
3. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. Groundwater for Sustainable Development. 2021; том 15: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100674>
4. Сухорукова А.Ф. Гидрогеологические условия разработки и гидрогеохимия дренажных вод гранитного карьера Борок Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022, том 333 – № 5 <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3507>
5. El-Mezayen A.M., Ibrahim E.M., El-Feky M.G., Omar S.M., El-Shabasy A.M., Taalab S.A. Physico-chemical conditions controlling the radionuclides mobilisation in various granitic environments. International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2020; PP. 1-17. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1729758>
6. Zhao C., Zhang P., Li X., Ning Y., Tan L., Edwards R.L., Yao X., Cheng H. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Uranium Isotopes in Saline Lake Waters in the Northeast of Qaidam Basin. Minerals. 2020; v. 10: 74. doi:10.3390/min10010074
7. Krall L., Auqué-Sanz L., Garcia-Orellana J., Trezzi G., Tullborg E.-L., Suksi J., Porcelli D., Andersson P. Radium isotopes to trace uranium redox anomalies in anoxic Groundwater. Chemical Geology. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119296>
8. Иванов А.Ю., Арбузов С.И. Геохимия урана и тория в донных отложениях малых искусственных водоемов и озер на территории юга Томской области. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019; т. 330; № 4: 136–146. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/233
9. Исупов В.П., Колпакова М.Н., Борзенко С.В., Шацкая С.С., Шварцев С.Л., Долгушин А.П., Арзамасова Г.М., Ляхов Н.З. Уран в минерализованных озерах алтайского края. Доклады академии наук. 2016; т. 470; № 5: 566–569. DOI: 10.7868/S086956521629020X
10. Бабин Г.А., Черных А.И., Головина А.Г., Жигалов С.В., Долгушин С.С., Ветров Е.В., Кораблева Т.В., Бодина Н.А., Светлова Н.А., Федосеев Г.С., Хилько А.П., Епифанов В.А., Лоскутов Ю.И., Лоскутов И.Ю., Михаревич М.В., Пихутин Е.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕ-ГЕИ; 2015. 392 с. + 4 вкл.

УДК 551.24.01 + 556.3.01

**ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМАЛЬНЫХ
ВОД КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАССИВОВ ГОРНОСКЛАДЧАТЫХ
ОБЛАСТЕЙ****Н.А. Харитонов*¹, Г.А. Челноков², Е.И. Барановская¹, В.Ю. Лаврушин²,
И.В. Брагин³, Д.Д. Луканов¹**¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: tchenat@mail.ru²Геологический институт РАН, Москва, Россия, E-mail: geowater@mail.ru³Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия, E-mail: bragin_ivan@mail.ru**Аннотация**

Различные типы термальных вод широко применяются в медицине при заболеваниях сердечно-сосудистой системы, опорно-двигательного аппарата, периферической нервной системы и т.д. Геологическое и тектоническое строение территорий распространения термоминеральных вод, а также условия загрузки и циркуляции во многом определяют их геохимический облик. В работе представлены результаты исследования химического и изотопного состава водной ($\delta^{18}\text{O}$, δD , ^3H), солевой ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{TIC}}$) и газовой ($^3\text{He}/^4\text{He}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) фаз термальных вод четырех месторождений (Кульдур, Чистоводное, Ходжи-Оби-Гарм и Джеты-Огуз), формирующихся в кристаллических массивах из различных регионов Евразии. Новые изотопно-геохимические данные, а также детальное исследование геологических условий и гидрогеологических особенностей территорий циркуляции данных терм, позволили сделать вывод об условиях их формирования.

Ключевые слова: термальные воды, кристаллические массивы, Евразия**ISOTOPIC AND GEOCHEMICAL FEATURES OF THERMAL
WATERS WITHIN CRYSTALLINE MASSIFS IN FOLDED AREAS****N.A. Kharitonova*¹, G.A. Chelnokov², E.I. Baranovskaya¹, V.Y. Lavrushin²,
I.V. Bragin³, D.D. Lukanov¹**¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: tchenat@mail.ru²Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, E-mail: geowater@mail.ru³Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation, E-mail: bragin_ivan@mail.ru

Abstract

Various types of thermal waters are widely used in healthcare for the therapy of cardiovascular system, musculoskeletal system, peripheral nervous system, etc. The geological and tectonic setting of the areas where the thermal waters circulated mainly determine their geochemical features. Here we present new chemical and isotopic data of water ($\delta^{18}\text{O}$, δD , ^3H), solute ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{TIC}}$) and gas ($^3\text{He}/^4\text{He}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$) phases of thermal waters in four spas (Kuldur, Chistovodnoe, Khoja-Obi Garm and Djety-Oguz) located within the crystalline massifs of different Eurasian regions. Obtained data together with a detailed study of the geological conditions and hydrogeological features of the localization allowed us to specify the conditions of their origin.

Key Words: thermal waters, crystalline massifs, Eurasia

Введение

Термальные воды широко распространены по всему земному шару и активно используются во многих государствах в качестве бальнеоресурса. На базе термальных источников построено огромное количество санаториев, в которых данные воды применяются при заболеваниях сердечно-сосудистой системы, опорно-двигательного аппарата, периферической нервной системы и т.д.

Термальные воды в России активно изучаются вот уже более 100 лет, однако до сих пор многие аспекты их генезиса остаются дискуссионными. Наибольшее количество вопросов возникает при определении источника газа и растворенных солей [3]. Основной целью работы являлось определение источника формирования газовой и соленой фаз термальных вод циркулирующих в массивах кристаллических толщ на основе изотопно-геохимических маркеров. В качестве объектов исследования были выбраны месторождения расположенные в различных областях Евразии: Кульдур (Еврейская АО), Чистоводное (Приморский край), Ходжи-Оби-Гарм (Таджикистан) и Джеты-Огуз (Киргизия).

Методы исследований

В основу работы были положены гидрохимические и изотопные данные, полученные во время полевых работ 2015-2022 гг. Нестабильные параметры (pH, Eh, электропроводность, минерализация, температура и содержание HCO_3^-) измерялись в полевых условиях, непосредственно на месте отбора воды. Пробы воды для определения ^3H , $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ не фильтровались и отбирались в стеклянные бутылки.

Макрокомпонентный состав определялся методом жидкостной ионной хроматографии (HPLC-10AVp, SHIMADZU). Концентрации микрокомпонентов установлены методом ICP-MS на приборе Agilent 7700 в ДВГИ ДВО РАН. Определение стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}_{\text{вода}}$), водорода ($\delta^2\text{H}_{\text{вода}}$) и серы ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$) проводилось там же в лаборатории стабильных изотопов. Для сравнительных оценок использовано соотношение $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ относительно водного стандарта SMOW. Содержания ^3H определялись в ТОИ ДВО РАН.

Химический состав свободного газа исследовался на газовом хроматографе a Crystal-2000M в ГИН РАН. Изотопный состав газовой фазы $\delta^{13}\text{C}$ в CO_2 и CH_4 был определен в МГУ им. М.В. Ломоносова, $\delta^{15}\text{N}_{\text{газ}}$ – в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) на масс-спектрометрическом комплексе. Ошибка измерения $\delta^{15}\text{N}$ составляла $\sim 0.3\text{‰}$.

Результаты и их обсуждения

Газовая фаза. По газовому составу все изученные термальные воды являются слабогазирующими, азотными. Содержание N_2 варьирует в зависимости от месторождения: его максимальное значение (97,4 об.%), наблюдается на месторождении Кульдур, а минимальное (77 об.%) на месторождении Ходжа-Оби-Гарм. На месторождении Джеты-Огуз содержание азота находится в диапазоне значений 86–87 об.%. Содержание метана, углекислого газа и кислорода в водах незначительное. Особенностью термальных вод месторождения Джеты-Огуз является высокое содержание гелия (до 7,7 об.%).

Значение $\text{Ar}/\text{N}_2 \cdot 100$ в исследованных водах превышает характерное значение (1,3) для азотных терм [1]. Минимальный коэффициент фиксируется в наиболее холодных водах месторождения Чистоводное, а наибольший (3,1) – в высокотемпературных водах месторождения Ходжи-Оби-Гарм. Такая характерная для термальных вод закономерность проявляется вследствие различной растворимости газов при изменяющихся Р-Т условиях.

На классификационной диаграмме $\text{N}_2\text{-CO}_2/100\text{-Ar} \cdot 100$ газы всех месторождений попадают в поле воздушного аргона, и соответственно, с высокой долей вероятности можно утверждать что азот, аргон и кислород имеют атмогенное происхождение. Значения $\delta^{15}\text{N}_{\text{газ}}$ значительно варьируют в зависимости от месторождения и находятся в диапазоне 0,1 – 4,4‰. Максимальные значения характерны для месторождения Джеты-Огуз (4,4‰). Вероятно, что указывает на преимущественно атмогенный генезис N_2 , в водах месторождений Чистоводное, Кульдур и Ходжи-Оби-Гарм с незначительной примесью корового азота. В водах же месторождения Джеты-Огуз азот, скорее всего, формируется исключительно за счет коровых источников – азота кристаллических пород. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{газ}}$ близки и составляют $-18,1 \div -2,3 \text{‰}$ свидетельствуя о биогенном источнике CO_2 .

Изотопное исследование инертных газов показало, что значения $^3\text{He}/^4\text{He}_{\text{кор}}$ низкие, варьируют от $0,03 \times 10^{-6}$ до $0,41 \times 10^{-6}$. Расчет соотношения атмогенного, корового и мантийного

гелия показывает, что гелий преимущественно представлен коровой составляющей (90-98%). Количество атмосферного (2-7%) и мантийного гелия (0.5-3%) незначительно.

Водная фаза. Полученные данные по содержанию $\delta^{18}\text{O}_{\text{вода}}$ и $\delta\text{D}_{\text{вода}}$ свидетельствуют, что в водном балансе изученных термальных вод доминирует метеорная водная компонента, так как все значения ложатся достаточно близко к глобальной линии метеорных вод. Во всех изученных термах не фиксируется «положительный кислородный сдвиг» несмотря на высокие температуры воды (до 98 °C) на изливе, что свидетельствует о слабом взаимодействии воды и водовмещающей породы. Однако в ряде месторождений, как например Ходжа-Оби-Гарм и Джеты-Огуз, наблюдается значительное отклонение в сторону облегчения изотопного состава кислорода (до $\Delta\delta^{18}\text{O} \approx 1\text{‰}$) и водорода (до $\Delta\delta\text{D} \approx 7\text{‰}$). Значения трития в водах месторождений очень низкие и составляют менее 1,0 ТЕ, что указывает на их достаточно долгий период водообмена, и на отсутствии смешивания с поверхностными горизонтами грунтовых вод.

В водном балансе терм месторождения Кульдур преобладает инфильтрационное питание (весенне-летнее), что подтверждается почти пятилетним мониторингом. Содержание трития в поверхностных водах реки Кульдур (18,5 ТЕ) характерно для поверхностных вод региона, в то время как в термальных водах значения ^3H весьма низкие 0,2–0,7 ТЕ.

В термах месторождения Чистоводное $\delta^{18}\text{O}$ варьирует от -1,1 до -10,4‰, а δD лежит в диапазоне значений -69,6 ÷ -73,8‰. Облегченный изотопный состав воды указывает на относительно высокое положение зоны питания данных вод, которое составляет 500-1160 м. Наблюдается значимая корреляция между высотой локализации области питания термальных вод и значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$. Наши данные показывают, что питание этих терм осуществляется преимущественно за счет метеорных вод, на высоте 500 – 1160 м. Значимые содержание трития (2,3 ТЕ) указывают на незначительное разбавление термальных вод месторождения пресными аллювиальными водами.

Солевая фаза. Одним из наиболее дискуссионных вопросов при формировании азотных терм является вопрос об источниках поступления серы. Преобладающей точкой зрения является происхождение SO_4^{2-} при взаимодействии термальных вод с водовмещающими толщами, однако, существуют взгляды, согласно которым сера привносится глубинными флюидами. Нами впервые установлено содержание изотопов $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ в исследованных термах. Полученные значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ находятся в интервале +6,1 ÷ 8,2‰ и свидетельствуют о поступлении серы при растворении сульфидов. Более высокие значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ в сравнении с сульфидами магматических образований [2] вероятно обусловлено фракционированием элемента в процессе бактериальной сульфатредукции.

Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{ТС}}$ всех исследованных азотных терм близки (-18,1 ÷ -22,3‰) однозначно указывая на биогенный источник углерода в воде. Увеличение содержания карбонатных ионов

происходит вследствие окисления Сорг. почвенных и подпочвенных горизонтов зон аэрации, либо в процессе разложения органических остатков водовмещающей толщи.

Ионы Si и Na поступают в воду при растворении основного минерала интрузивных массивов – полевого шпата. В условиях повышенных Т и Р наименее устойчивым в горных породах в присутствии воды является кремнезем, а его растворимость увеличивается с повышением Р-Т условий. Содержание F⁻ в термах коррелирует с карбонатными ионами, кремнием и температурой, что однозначно свидетельствует об их едином источнике. Высокие концентрации F⁻ в исследованных водах, по нашему мнению, обусловлены его извлечением из водовмещающих толщ, содержащих значительное количество фтор-содержащих минералов (апатита и (или) биотита). И чем более интенсивно взаимодействуют вода и порода, тем больше фтора аккумулируется в водном растворе, при отсутствии геохимических барьеров.

Заключение

Выявлено, что источником водной фазы изучаемых терм являются метеорные воды, а основной газовый компонент N₂ имеет полигенетический генезис, и может поступать либо из водовмещающих толщ, либо из атмосферы. Химический состав терм формируется в результате преобразования вещества вмещающих пород и микробиологических процессов. Низкая минерализация терм обусловлена плохой растворимостью кристаллических массивов в связи с отсутствием значимых количеств агрессивных сопутствующих газов (потока глубинного CO₂, H₂S, Cl и др.) которые бы способствовали более активному переходу в раствор элементов.

Финансирование.

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ 23-27-00119 «Генезис и условия циркуляции термальных вод кристаллических массивов горноскладчатых областей».

Список литературы

1. Барабанов Л.Н., Дислер В.Н. Азотные термы СССР / Отв. ред. В.В. Иванов. – М.: Геоминвод ЦНИИ КиФ, 1968. –120 с.
2. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир. –1989. – 590 с.
3. Харитонов Н. А., Лямина Л. А., Челноков Г. А., Брагин И. В., Карабцов А. А., Тарасенко И. А., Накамура Х., Иватори Х.. Химический и изотопный состав азотных термальных вод месторождения Кульдур (ЕАО, Россия). *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*, (5):77–91, 2020.

УДК 556.314

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА ПОРОВЫХ ВОД ДОННЫХ ОСАДКОВ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА НА ПРИМЕРЕ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

Н.Е. Шиндина*¹, Е.С. Казак¹, П.В. Гуткович¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: shindina-98@mail.ru

Аннотация

Исследование химического состава поровых вод донных осадков Баренцева и Карского морей является большим шагом к пониманию процессов арктического седиментогенеза и поиску залежей углеводородов на шельфах Арктики. Поведение элементов в современных морских осадках и содержащихся в них поровых водах подчиняется определенным закономерностям, позволяющим выделить области «фоновых» концентраций, содержащих седиментогенные воды, и «аномальных», содержащих воды, преобразованные различными дигенетическими процессами. В рамках работы были выявлены области с активно протекающим процессом сульфатредукции, где наблюдалось снижения сульфат-иона и кальция с глубиной и закономерное увеличение гидрокарбонатов. Кроме того, в некоторых колонках было зафиксировано общее снижение концентраций всех основных компонентов с глубиной, связанное, вероятно, с частичным разбавлением захороненных поровых вод пресными рыхлосвязанными водами глинистых минералов при уплотнении осадка, либо с незавершившимся процессом выравнивания концентраций путем диффузии после отступления ледника и осолонения морского бассейна.

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, поровые воды, донные отложения, макрокомпонентный состав, сульфатредукция

PORE WATER COMPOSITION OF ARCTIC SHELF BOTTOM SEDIMENTS STUDY ON THE EXAMPLE OF THE BARENTS AND KARA SEAS

N.E. Shindina*¹, E.S.Kazak¹, P.V. Gutkovich¹

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: shindina-98@mail.ru

Abstract

The chemical composition study of bottom sediments' pore waters of the Barents and Kara Seas is a big step towards understanding the processes of Arctic sedimentogenesis and searching for hydrocarbon deposits on the Arctic shelves. The behavior of elements in modern marine sediments and

pore waters contained in them obeys certain regularities that allow us to distinguish areas of "background" concentrations containing sedimentogenic waters and "anomalous" ones containing waters transformed by various diagenetic processes. We identified areas with an active sulfate-reduction process, where a decrease in sulfate ion and calcium with depth and a regular increase in hydrocarbonates were observed. In addition, a general decrease in the concentrations of all major components with depth was recorded in some columns, which is probably related to partial dilution of buried pore waters by fresh, loosely bound waters of clay minerals during sediment compaction or to the incomplete process of concentration equalization by diffusion after glacier retreat and salinization of the sea basin.

Key Words: Barents Sea, Kara Sea, pore waters, bottom sediments, macrocomponent composition, sulfate reduction.

Введение

Изучение гидрогеохимии поровых вод шельфовых морских осадков может быть использовано при оценке перспектив нефтегазоносности [1], при этом каждый гидрогеологический бассейн уникален и характеризуется своим комплексом гидрогеологических показателей.

Целью данной работы является исследование химического состава поровых вод донных отложений слабоизученных районов Арктики, в частности северной части шельфа Карского моря. Основное внимание направлено на изучение особенностей состава проб поровых вод на участках с предполагаемыми геохимическими аномалиями, а также на ряде фоновых станций для общей характеристики изменчивости их состава по полигону исследований.

Материалы для исследования (образцы донных осадков, пробы придонных и выделенных поровых вод) были отобраны в ходе экспериментальных полевых работ в рамках 19 и 21 экспедиций TTR (Training-through-Research) в северо-западной части Баренцева и северной части Карского морей (Рис. 1).

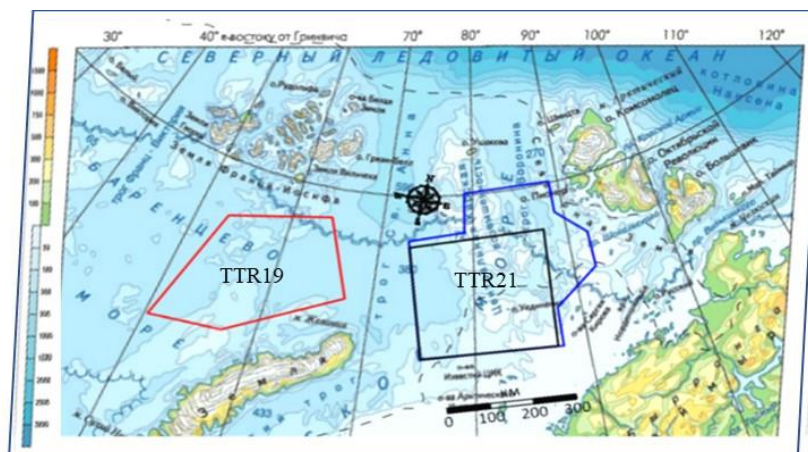


Рис. 1 Положение границ полигонов исследования рейсов TTR19-21.

Методы исследований

Исследование керна донных отложений включали в себя измерения величин pH, Eh, естественной влажности отложений, а также извлечение поровых вод для анализа.

Величины окислительно-восстановительного потенциала и щелочно-кислотных условий природной системы «донные отложения-поровые воды» определялись непосредственно после отбора керна, а также перед извлечением поровых вод (в случаях, когда извлечение вод проводилось не сразу), чтобы удостовериться в сохранности образца и оценить физико-химические преобразования компонентов системы в процессе транспортировки и хранения образцов. Показатели pH ($\pm 0,1$ ед.) и Eh (± 12 мВ) определялись в каждом случае в течение ~ 5 минут с помощью прибора Эксперт-001 с тремя стеклянными электродами.

Извлечение поровых вод для анализа производилось двумя альтернативными способами (Рис. 2). В первом случае непосредственно на борту осуществлялся отбор поровых вод с помощью специальных пробоотборников «Rhizon», состоящих из стандартного шприца с капиллярной ПВХ трубкой и специального мембранного наконечника-фильтра длиной 10 см. Создание градиента давления путём вытягивания поршня шприца, позволило получить порядка 4-10 мл жидкости за 20 минут для каждого образца. Во втором случае извлечение поровой воды проводилось после окончания рейса методом центрифугирования на центрифуге «ОПН-16» на скорости 4000 оборотов/мин в течении 15 минут, что позволяло получить порядка 5-15 мл иловой воды для исследования. В последнем случае также требовалось фильтрование отжатой воды перед определением содержания катионов и анионов.



Рис. 2 Методика извлечения и анализа поровых вод донных осадков Баренцева и Карского морей.

Изучение компонентного состава всех выделенных поровых вод донных отложений выполнялось в гидрогеохимической лаборатории кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Содержание гидрокарбонат-иона (± 8 отн.%) было определено методом объемного титрования. Содержания остальных макрокомпонентов (ионов кальция, магния, натрия, калия, хлоридов и сульфатов), а также некоторых микрокомпонентов (аммония, йода, брома и др.) определялись методом капиллярного электрофореза (± 5 отн.%) на приборе «Капель-104Т», либо методом жидкостной хроматографии (± 5 отн.%).

Для определения гигроскопической влажности пробы высушивались в сушильном шкафу при температуре $100-105^{\circ}\text{C}$ в течение 5 часов и по потере в весе проводились вычисления.

Результаты и их обсуждения

В рамках работы для большинства станций пробоботбора установлен характерный морскому генезису хлоридно-натриевый состав иловых вод на всем полигоне исследований. Минерализация в пробах поровых вод изменяется в пределах от 31,1 до 41,3 г/л в среднем составляет 36,7 г/л и формируется в основном за счет ионов Cl^- , Na^+ и в меньшей степени сульфат-иона и Mg^{2+} .

Как видно из диаграммы М.Г. Валяшко (Рис. 3), все исследованные образцы поровых вод попадают в область сульфатного типа, магниевого подтипа, что характерно для вод морского генезиса, не претерпевшим больших преобразований. Однако на диаграмме видна некоторая вытянутость облака точек левее и ниже точки, характеризующей усредненный состав поверхностной морской воды на участках исследования.

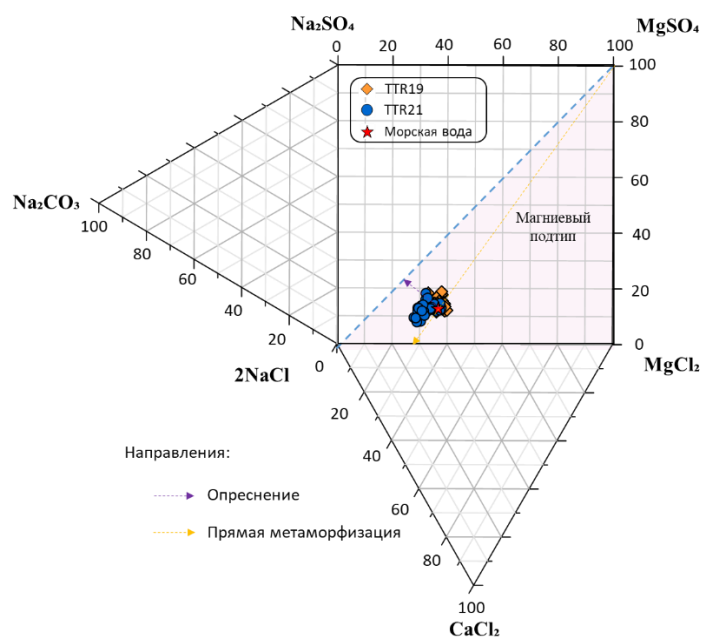


Рис. 3 Диаграмма М.Г. Валяшко для поровых вод рейсов TTR19-20.

Сдвиг области точек вниз свидетельствует о начале процессов прямой метаморфизации. В таких колонках донных отложений наблюдается незначительное снижение содержания сульфат-иона с глубиной, сопровождающееся уменьшением концентраций кальция и магния, а также увеличением содержания гидрокарбонат-иона, что говорит о развитии процессов сульфат редукции (Рис. 4). Впрочем, такая тенденция в большей степени наблюдается для станций, отобранных в северной части полигона исследований, выше предполагаемой границы распространения последнего неоплейстоценового оледенения. Кроме того, в местах отбора таких станций установлена разгрузка термогенных газов.

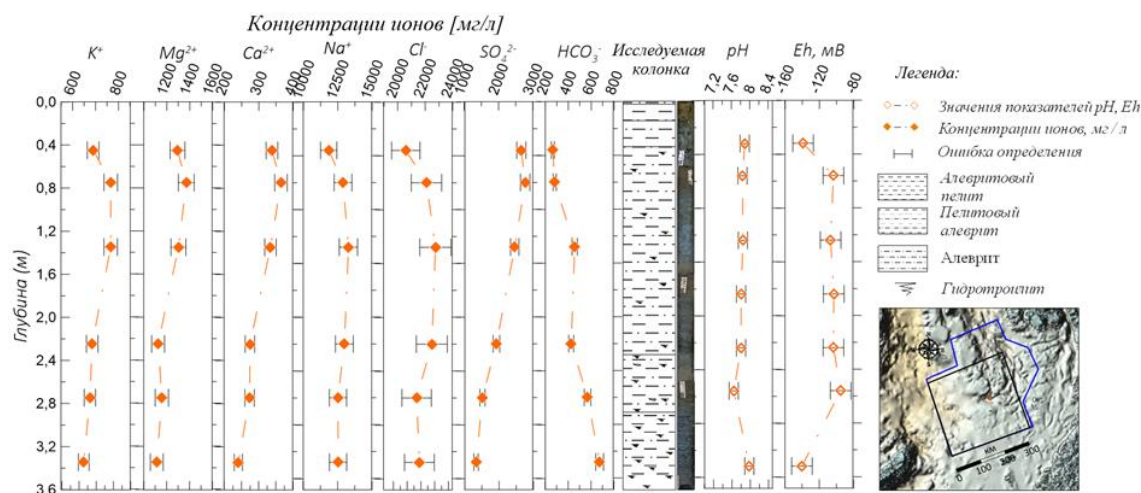


Рис. 4 Распределение компонентов химического состава по глубине станции с протекающим процессом сульфатредукции.

В ряде колонок установлено снижение общей минерализации в глубоких плотных образцах с низкой влажностью за счет уменьшения содержания всех основных макрокомпонентов. Одной из возможных причин такого распределения может быть частичное разбавление захороненных поровых вод пресными рыхлосвязанными водами глинистых минералов при уплотнении осадка. По другой версии опреснение поровых вод в нижних частях колонки может быть связано с незавершившимся процессом выравнивания концентраций путем диффузии после отступления ледника и осолонения бассейна. Такие образцы на диаграмме Рис. сдвинуты левее точки морской воды.

Содержания компонентов в пробах, полученных методом центрифугирования и с помощью пробоотборников «Rhizon» сходятся в пределах ошибки определения (± 5 отн.%), за исключением ионов калия, которые в пробах в первом случае завышены по сравнению со вторым. Тем не менее, в пределах ошибки определения также наблюдаются некоторые закономерности распределения элементов. Концентрации Na^+ и Cl^- были больше в поровых растворах, извлеченных с использованием метода центрифугирования, по сравнению с теми, которые были извлечены с использованием метода отбора образцов «Rhizon». Концентрации Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} в свою очередь, чаще были выше в растворах, извлеченных с использованием

ризонов, чем центрифугированием (Рис. 5). При этом тренды изменения концентраций компонентов по глубине сохраняются при использовании обоих способов извлечения порового раствора. Полученные данные согласуются с выводами Штейнера и соавторов [2], где авторы получили в пробах, отобранных с помощью «Rhizon» концентрации кальция, магния и сульфата выше, чем в образцах, подвергнутых центрифугированию, особенно если первые используются без предварительного замачивания в дистиллированной воде.

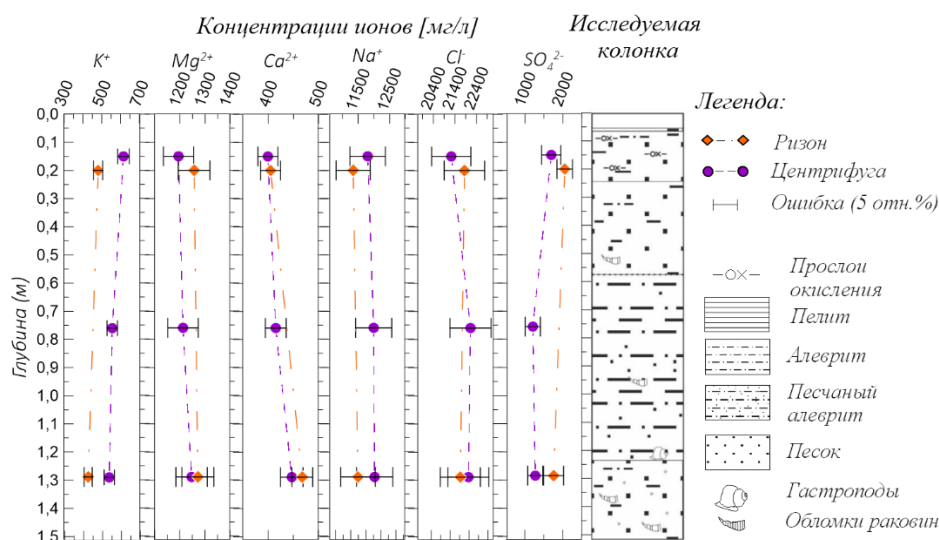


Рис. 5 Сравнение результатов анализа поровых вод, извлеченных разными методами.

Закключение

Таким образом, установлено, что химический состав поровых вод, отобранных в северной части Баренцева и Карского морей, близок к составу поверхностных морских вод. В некоторых станциях было выявлено изменение химического состава в направлении прямой метаморфизации, что может быть вызвано, в том числе, поступлением глубинных углеводородных флюидов. В ряде колонок установлено снижение общей минерализации в глубоких плотных образцах с низкой влажностью за счет уменьшения содержания всех основных макрокомпонентов.

Оба метода извлечения поровых вод являются валидными для изучения химического состава поровых вод донных осадков и дают сопоставимые результаты. Однако важно понимать, что процедура отбора проб может изменить результат, когда интерес представляют небольшие вариации абсолютных концентраций.

Список литературы

1. Каналин В. Г. Справочник геолога нефтегазоразведки: нефтегазопромысловая геология и гидрогеология. – М.:Инфра-Инженерия, 2016. – 416 с.
2. Steiner Z., Lazar B., Erez J., Turchyn A.V. Comparing Rhizon samplers and centrifugation for pore-water separation in studies of the marine carbonate system in sediments // Limnology and Oceanography: Methods. - 2018. - 16. - pp. 828-839.

ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЯ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОГЕНЕЗА

УДК 556.3

ПРИМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ ВОДНОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА К ВОПРОСАМ ИЗУЧЕНИЯ И ДОБЫЧИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В.Л. Воронин*¹¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: v_voronin@list.ru

Аннотация

Изучение и добыча подземных вод в соответствии с Водным кодексом РФ являются частью водных отношений. Ряд вопросов, касающихся использования подземных вод отнесен Водным кодексом в сферу регулирования других отраслей законодательства, однако базовые принципы водного законодательства, сформулированные в Водном кодексе, распространяются и на вопросы, связанные с подземными водами. В работе рассмотрено применение основных принципов водного законодательства по отношению к подземным водам, реализация этих принципов в других нормативно-правовых актах и их применение на практике.

Ключевые слова: подземные воды, водные объекты, законодательство

APPLICATION OF THE BASIC PRINCIPLES OF WATER LEGISLATION TO EXPLORATION AND EXPLOITATION OF GROUNDWATER

V.I. Voronin*¹¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: v_voronin@mail.ru

Abstract

Exploration and exploitation of groundwater resources in accordance with the Water Code of the Russian Federation are part of water relations. A number of issues related to the use of groundwater are referred by the Water Code to the sphere of regulation of other branches of legislation, however, the basic principles of water legislation formulated in the Water Code also apply to issues related to groundwater. The paper considers the application of the basic principles of water legislation in relation to groundwater, the implementation of these principles in other normative legal acts and their application in practice.

Key Words: groundwater, water objects, legislation

Подземные воды в водном законодательстве

Водный кодекс Российской Федерации (далее — ВК) относит подземные воды (конкретно водоносные горизонты и артезианские бассейны, ст. 5 п. 5) к подземным водным объектам, и на них распространяется действие водного законодательства, за исключением тех вопросов, регулирование которых прямо не отнесено в ВК к иным сферам законодательства. В частности, предоставление подземных водных объектов в пользование (ст. 9, п. 3) и прекращение пользования (ст. 10, п. 2) осуществляется в соответствии с правилами, установленными законодательством о недрах. Также к области, регулируемой законодательством о недрах, в ВК отнесено определение границ подземных водных объектов (ст. 5, п. 6), форм собственности на эти объекты (ст. 8, п. 6), сбор и хранение сведений о них (ст. 31, п. 5), а также порядок использования подземных водных объектов (ст. 43, п. 3) для целей питьевого водоснабжения. Установление зон санитарной охраны и определение режима этих зон отнесено к сфере регулирования законодательства о санитарно-эпидемиологическом благополучии населения (ст. 43, п. 1). Установление округов горно-санитарной охраны источников минеральных вод отнесено к сфере регулирования законодательства о природных лечебных ресурсах (ст. 64). Иные вопросы, в частности вопросы охраны подземных вод, должны регулироваться водным законодательством.

К регулированию изучения и использования подземных вод в полной мере относятся основные принципы водного законодательства, сформулированные в ст. 3 ВК. Рассмотрим, как основные принципы водного законодательства реализуются применительно к вопросам изучения и использования подземных вод.

Приоритет охраны водных объектов перед их использованием

Этот важнейший принцип должен применяться ко всем водным объектам, и подземные водные объекты не являются исключением. Задача сохранения водных объектов не является абсолютной, в отдельных случаях и подземные и поверхностные водные объекты уничтожаются или преобразуются, однако при проектировании таких действий в отношении поверхностных водных объектов, их необходимость и обоснованность рассматриваются в проектной документации, которая проходит экспертизу. В случае подземных водных объектов их сохранение не рассматривается обычно как самостоятельная задача, за исключением тех водоносных горизонтов, которые используются для водоснабжения. Например, если при строительстве какого-либо объекта предусматривается дренирование существующего локально распространённого водоносного горизонта, то есть фактически ликвидация подземного водного объекта, эта задача рассматривается в проектной документации без какого-либо анализа необходимости такого действия. В лучшем случае при проектировании дренажных мероприятий оценивается ущерб питанию поверхностных вод.

Существующие нормативно-правовые акты не рассматривают подземные водные объекты, как объекты, имеющие самостоятельную ценность. Так, действующая в настоящее время методика по исчислению размера ущерба от загрязнения подземных вод [2] позволяет оценить ущерб подземным водам только в тех случаях, когда они используются для водоснабжения, или когда загрязнение подземных вод приводит к загрязнению поверхностных. Ущерб от загрязнения подземных водных как таковых действующей методикой не рассматривается.

Подземные воды являются неотъемлемым компонентом окружающей природной среды (ст. 1 ФЗ «Об охране окружающей среды»), и то, что они не имеют собственной ценности, закреплённой в законодательстве, которую необходимо рассматривать при воздействии на них, противоречит принципу приоритета сохранения водных объектов перед их использованием.

Приоритет использования водных объектов для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения перед иными целями их использования

ВК не содержит прямых запретов на использование водных объектов, пригодных для организации источников питьевого водоснабжения, для иных целей. При этом в части 4 ст. 43 указывается, что: *«На территориях, на которых отсутствуют поверхностные водные объекты, но имеются достаточные ресурсы подземных вод, пригодных для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, в соответствии с законодательством о недрах допускается в исключительных случаях использование подземных вод для целей, не связанных с питьевым и хозяйственно-бытовым водоснабжением»*. Требования статьи 43 ВК усиливают общий принцип, действующий в отношении всех водных объектов, для объектов подземных, заменяя приоритет их использования для питьевого водоснабжения исключительностью такого использования. Допустимость использования подземных вод для других целей требует специального обоснования и невозможна при наличии доступных ресурсов поверхностных вод. Это требование распространяется фактически на все подземные воды зоны активного водообмена, ставя под вопрос саму возможность использования пресных подземных вод для водоснабжения промышленности даже на тех территориях, где ресурсы подземных вод достаточны для удовлетворения всех потребностей.

Норма о приоритетном использовании подземных вод в качестве источника питьевого водоснабжения имеет глубокие исторические корни. До 1996 года, когда с принятием СанПиН 2.1.4.559-96 перечень компонентов, нормируемых в воде систем централизованного водоснабжения, был существенно расширен, подземные воды, добываемые на многих водозаборах, удовлетворяли требованиям санитарных нормативов без дополнительной водоподготовки. Подземные воды рассматривались как источник готовой питьевой воды. В настоящее время водозаборные скважины, пригодные для подачи воды для питьевого

водоснабжения без водоподготовки, являются исключительной редкостью. Преимущество подземных вод как «бесплатного» источника питьевой воды исчезло. Да, подземные воды лучше защищены от загрязнения, чем поверхностные. При этом необходимость дополнительных затрат при подготовке поверхностных вод компенсируется большей простотой организации поверхностных водозаборов; и возможностью отбора на одном водозаборе большего количества воды. Опыт крупнейших городов России, включая Москву и Санкт-Петербург, говорит о том, что организация водоснабжения на базе поверхностных источников экономически более эффективна и достаточно безопасна. Показательно, что крупнейшая в России экологическая катастрофа, связанная с загрязнением питьевой воды в г. Уфе в 1990 г., произошла при использовании подземного источника водоснабжения.

Требование об исключительном использовании поверхностных источников для водоснабжения промышленных объектов создаёт препятствия для развития экономики. Одно из преимуществ подземных источников водоснабжения заключается в том, что водозабор может быть организован непосредственно на территории предприятия. Требования об использовании поверхностных источников водоснабжения влечёт за собой необходимость выделения больших участков земли под водозаборные сооружения и водопроводные сети. При высокой стоимости земли эти затраты снижают экономическую эффективность инвестиций в строительство новых промышленных предприятий.

Органы, регулирующие недропользование, по-разному относятся к требованию об использовании подземных вод преимущественно для питьевого водоснабжения. Так, на территории Московской области разрешения (лицензии) на добычу подземных вод выдают два органа государственной власти. В соответствии со ст. 2.3 Федерального закона «О недрах» участки, на которых располагаются водозаборы производительностью менее 500 м³/сутки, относятся к участкам недр местного значения и лицензии на них выдают региональные органы власти — Министерство экологии и природопользования Московской области. Лицензии на крупные водозаборы выдаёт территориальное управление Федерального агентства Роснедра по Центральному федеральному округу (Центрнедра). Министерство экологии Московской области предъявляют чрезвычайно высокие требования к обоснованию необходимости добычи подземных вод для производственного водоснабжения, фактически лицензии выдаются только для водоснабжения пищевых и подобных производств. Это приводит к тому, что промышленные предприятия завышают свою потребность в воде и получают лицензии в Центрнедра. Завышение потребности в воде ведёт к завышению величины запасов подземных вод, прикрепляемых к конкретному водозабору, и препятствует рациональному управлению ресурсами подземных вод.

Положение ВК о возможности использования пресных подземных вод в исключительных случаях при отсутствии доступных ресурсов поверхностных вод является

необоснованно жёстким и препятствует экономическому развитию на территориях с достаточными ресурсами подземных вод. Это положение должно быть переформулировано.

Участие граждан, общественных объединений в решении вопросов, касающихся прав на водные объекты, а также их обязанностей по охране водных объектов

Этот принцип практически не реализуется в отношении подземных вод. Решения о предоставлении участков недр для добычи подземных вод принимаются уполномоченными органами государственной власти (ФА Роснедра и органы власти субъектов федерации). Участие представителей общественности при принятии таких решений не предусматривается соответствующими административными регламентами. Также не предусматривается участие общественности при решении вопросов об утверждении запасов подземных вод и согласовании технических проектов освоения месторождений подземных вод.

Равный доступ физических лиц, юридических лиц к приобретению права пользования водными объектами

Вопросы предоставления права пользования подземными водными объектами отнесены к сфере регулирования законодательства о недрах. В законодательстве о недрах пользование недрами (включая добычу подземных вод) рассматривается как коммерческая деятельность, что закреплено в ст. 9 Федерального закона «О недрах», где указано, что пользователями недр могут быть только юридические лица и индивидуальные предприниматели. Существует исключение, сформулированное в ст. 19: *«Собственники земельных участков ... имеют право осуществлять в границах данных земельных участков ... использование для собственных нужд ... подземных вод, объем извлечения которых должен составлять не более 100 кубических метров в сутки, из водоносных горизонтов, не являющихся источниками централизованного водоснабжения и расположенных над водоносными горизонтами, являющимися источниками централизованного водоснабжения»*. Таким образом, использование водоносных горизонтов для централизованного водоснабжения полностью перекрывает возможность использовать их (и нижележащие водоносные горизонты) частным лицам для собственных нужд, что очевидно противоречит принципу равного доступа физических и юридических лиц к водным объектам. На практике, бурение скважин на водоносные горизонты, являющиеся источниками централизованного водоснабжения, широко распространено, причём такое бурение ведётся без контроля государственных органов и без соблюдения каких-либо требований по охране подземных вод. Урегулировать эту проблему, могло бы разрешение бурения таких скважин при условии их регистрации и соблюдения необходимых правил, направленных на охрану подземных вод.

Регулирование водных отношений в границах бассейновых округов (бассейновый подход)

Для подземных вод этот принцип не соблюдается. Регулирование водных отношений осуществляется территориальными органами ФА Роснедра, действующими в границах федеральных округов и региональными органами власти, действующими в границах субъектов федерации.

Гласность осуществления водопользования

Полная информация о предоставленных для добычи подземных вод участках недр (выданных лицензиях), о проведении работ по геологическому изучению подземных вод и результатах этих работ, а также результаты ведения государственного мониторинга подземных вод доступны гражданам через систему федерального и территориальных фондов геологической информации. Большой массив информации доступен в электронном виде через сеть Интернет.

Комплексное использование водных объектов

Комплексное использование подземных вод должно быть базовым принципом управления их использованием. В законодательстве о недрах этот принцип реализован слабо. Регулирование распределения ресурсов подземных вод производится на основе запасов подземных вод, которые привязываются к конкретным водозаборам.

Запасы подземных вод определяются перспективной потребностью водопользователя и закрепляются за ним на длительный срок. Учитывая высокую стоимость работ по оценке запасов подземных вод, пользователи традиционно завышают потребность в воде. Это приводит к тому, что в ряде регионов количество оцененных запасов подземных вод приближается к величине их ресурсов, что должно препятствовать выдаче новых лицензий на добычу подземных вод [1]. При этом величина фактической добычи подземных вод существенно ниже величины оцененных запасов. Эта ситуация могла бы быть разрешена введением платы за величину утверждаемых запасов подземных вод, причём размер такой платы должен быть сопоставим с расходами на переоценку запасов подземных вод. Такая мера могла бы стимулировать владельцев водозаборов ограничить оцениваемые запасы величиной реальной потребности.

Величина ~~ресурсов~~ запасов подземных вод зависит от способа их добычи. При принятии решения о предоставлении права добычи подземных вод государство должно отдавать предпочтение оптимально расположенным водозаборам, имеющим оптимальную структуру. В условиях, когда решение о разрешении добычи подземных вод принимается на основании материалов оценки их запасов, проведённой по одиночным водозаборам, государство лишено возможности стимулировать добычу подземных вод рациональными водозаборными сооружениями.

Большой ущерб реализации принципа комплексного использования подземных вод нанесло внесение изменений в закон «О недрах», в котором участки недр с водозаборами малой производительности были отнесены к участкам недр местного значения. Сложилась ситуация, когда водозаборы, эксплуатирующие одни и те же водоносные горизонты и расположенные на одной территории, контролируются разными органами государственной власти, которые действуют зачастую неkoordinированно. Положительным примером здесь может служить г. Москва, на территории которого лицензии на пользование недрами с целью изучения и добычи подземных вод выдаются правительством Москвы вне зависимости от их производительности. Это происходит на основе соглашения между ФА Роснедра и правительством Москвы. При разработке Стратегии развития Кузбасса была дана рекомендация по заключению аналогичных соглашений [3]. Возможность заключения таких соглашений определена в ст. 3.1 закона «О недрах».

Платность использования водных объектов

Лица, добывающие подземные воды, являются плательщиками водного налога. Принцип платности водопользования должен стимулировать пользователей сокращать водопотребление. Низкий размер водного налога делает это регулирование неэффективным. Так, величина платы за поставку питьевой воды частным потребителям составляет в Московском регионе 40 – 60 рублей за 1 м³, в то время как размер водного налога составляет 36 копеек за 1 м³, то есть менее 1 % от цены конечного продукта.

От уплаты водного налога освобождаются пользователи при извлечении подземных вод для целей дренажа и шахтного водопонижения. Такой подход к налогообложению не стимулирует водопользователей к сокращению воздействия на подземные воды и противоречит принципу приоритета сохранения водных объектов перед их использованием.

ВК рассматривает водопользование как любое использование водных объектов, в том числе и без их добычи. Водопользованием является движение судов по акватории водных объектов, использование водных объектов для купания, строительство в акватории водных объектов. С этой точки зрения, строительство подземных сооружений в интервале залегания подземных вод также является использованием подземных вод, при этом в нормативно-правовых актах такое использование подземных вод никак не рассматривается, практически не контролируется, за исключением случаев, когда воздействию подвергаются водоносные горизонты, используемые для водоснабжения, и не оплачивается.

Экономическое стимулирование охраны водных объектов

Экономическое стимулирование охраны водных объектов реализуется через взимание платы за их загрязнение и сокращение такой платы при реализации мероприятий, направленных на предотвращение загрязнения. В отношении подземных вод такая плата взимается только в

тех случаях, когда их загрязнение приводит к невозможности их использования для водоснабжения или к загрязнению поверхностных вод. Можно констатировать, что существующие сейчас механизмы не стимулируют охрану подземных вод как таковых.

Заключение

Подземные воды являются водным объектом и как остальные водные объекты должны охраняться от негативных воздействий. Анализ основных принципов водного законодательства, определённых в ст. 3 Водного кодекса РФ, показывает, что в отношении подземных вод эти принципы не сформулированы в нормативно-правовых актах и не реализуются на практике. Во многих случаях это приводит к тому, что подземные воды оказываются законодательно незащищенными.

Список литературы

1. Воронин В.Л. Проблемы рационального использования подземных вод, вызванные несовершенством законодательства. // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник трудов XXIII Международной научно-практической конференции. М.: РУДН, 2022. Т. 2. С. 82–87.
2. Методика исчисления размера ущерба от загрязнения подземных вод. [Электронный ресурс]. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=33847> (дата обращения 01.07.2023)
3. Шимко Т.Г., Воронин В.Л., Царев М.А., Брель О.А. Стратегическое управление водными ресурсами Кузбасса. // Экономика промышленности, 2020, № 13, с. 366-374.

УДК 550.8.052

ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВОВ НА СОСТОЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Э.М. Горбунова^{*1}, С.М. Петухова¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия.

E-mail: emgorbunova@bk.ru

Аннотация

В статье представлены результаты наблюдений за вариациями уровня подземных вод, зарегистрированными при подземных взрывах на Семипалатинском испытательном полигоне и промышленных взрывах, производимых при разработке железорудных месторождений Курской магнитной аномалии. Выделены основные закономерности формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод. Установлено подобие гидрогеологических эффектов, отмеченных на макро- и мезоуровнях. После проведения взрывов прослежено скачкообразное и постепенное снижение уровня подземных вод, связанное с заполнением зон техногенной трещиноватости. Определена степенная зависимость максимального снижения уровня подземных вод от приведенного расстояния. Отклонения от установленной зависимости могут быть связаны с влиянием геолого-структурных и гидрогеологических факторов, которые выделены по материалам комплексных исследований, выполненных на отдельных участках Семипалатинского полигона. Полученные экспериментальные данные планируется использовать для анализа возможных изменений гидрогеологической ситуации в пределах железорудных месторождений, разрабатываемых с использованием взрывных технологий.

Ключевые слова: гидрогеологический мониторинг, крупномасштабные и промышленные взрывы, постсейсмическое снижение уровня, геолого-структурные факторы, водонасыщенный коллектор

EXPLOSIONS IMPACT ON WATER-SATURATED RESERVOIRS

E.M. Gorbunova^{*1}, S.M. Petukhova¹

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, E-mail:

emgorbunova@bk.ru

Abstract

The results of observations of groundwater level variations recorded during underground explosions at the Semipalatinsk Test Site and industrial explosions of iron ore deposits of Kursk Magnetic Anomaly are presented in this article. The main patterns of the formation of a technogenically

disturbed groundwater regime are identified. The similarity between hydrogeological effects recorded at the macro- and meso-scales has been established. Abrupt and gradual decrease of groundwater level was noted after the explosions; it is associated with the filling of the fractured zones. The power dependence relation of the maximum groundwater level decrease and reduced distance was determined. Deviations from the established relation may be associated with the influence of structural and hydrogeological factors, which are distinguished in the materials of complex studies carried out in certain areas of the Semipalatinsk Test Site. Obtained experimental data is planned to be used to analyze possible changes of the hydrogeological condition within iron ore deposits which are developed with using of explosive technologies.

Key Words: hydrogeological monitoring, large-scale and industrial explosions, postseismic level decrease, structural and hydrogeological factors, water-saturated reservoir

Введение

Основное направление гидрогеологического мониторинга, проводимого в процессе эксплуатации железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (КМА), – контроль за изменениями уровня водоносных горизонтов в наблюдательных скважинах, водопритоками в горные выработки и химическим составом подземных вод. Данные режимных измерений учитываются при работе дренажных сооружений для уменьшения риска подтопления шахт и карьеров, исключения негативных последствий сработки уровней и техногенного загрязнения водоносных горизонтов. Проблемы, связанные с возможными изменениями фильтрационных свойств водовмещающих пород при разработке месторождений с использованием взрывных технологий, не достаточно изучены. Вместе с тем архивные материалы геолого-геофизических исследований и пробных откачек, выполненных в два этапа – до и после проведения крупномасштабных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП), подтверждают необратимые изменения физико-механических и фильтрационных свойств массива горных пород на разных эпицентральных расстояниях. По результатам первых систематических измерений в течение года после крупномасштабного взрыва было установлено снижение уровня подземных вод на 0.7-1.3 м [1]. Последующие наблюдения за техногенно-нарушенным режимом свидетельствуют о формировании депрессионных воронок в эпицентральной зоне взрыва, которые характеризуются различной продолжительностью [2].

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при анализе изменений гидрогеологической ситуации, связанной с разработкой железорудных месторождений КМА.

Методы исследований

Исследование влияния взрывов на состояние водонасыщенных коллекторов основано на актуализации результатов полевых работ, выполненных на отдельных участках СИП; обработке данных высокоточного гидрогеологического мониторинга, проводимого в пределах железорудных месторождений КМА, и сравнительном анализе экспериментальных данных, полученных на территории СИП и в районе КМА.

На отдельных участках СИП режимные наблюдения за вариациями уровня подземных вод выполнялись ежедекадно в скважинах глубиной от 70 до 200 м с использованием стандартных электроуровнемеров, хлопушек. При крупномасштабных взрывах периодичность ручных измерений уровня подземных вод увеличивалась до 2-3 раз в сутки. Полученные данные использовались при составлении схем гидроизогипс и определения области формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод [2].

В наблюдательных скважинах, расположенных в двух пунктах наблюдений, в зоне горного отвода недр железорудных месторождений КМА, установлены высокоточные датчики Keller PR-36XW на глубине 3 м ниже уровня воды. На приустьевых площадках скважин находится датчик атмосферного давления Keller PAA-33X, сейсмометры СПВ-3К, 6-ти каналные регистраторы. Частота опроса составляет 200 Гц/канал [3].

Для сопоставления экспериментальных данных, полученных на разных участках СИП и КМА, выполнена оценка приведенного расстояния ($\bar{R}$), как:

$$\bar{R} = R/\sqrt[3]{Q}, \quad (1)$$

где R – эпицентральное расстояние от эпицентра взрыва до наблюдательной скважины, м; Q – масса ВВ, кг.

Краткая характеристика объектов исследований

Рассматриваемые объекты исследований расположены в разных структурно-формационных зонах. Площадка «Заречье» СИП находится на юго-западной окраине Зайсанского мегасинклинория Казахстанской складчатой системы и ограничена с юга региональным Калба-Чингизским разломом [4]. В геологическом разрезе выделены два структурных этажа: палеозойский и мезо-кайнозойский. На уровне палеозойского фундамента преимущественно развиты вулканогенно-осадочные образования нижнего карбона, на юго-западе ограничено распространены породы среднего кембрия. К разломам разного ранга приурочены массивы гранитов, интрузии гранодиоритов, порфиритов. Кровля пород фундамента осложнена палеодолиной реки Чаган, протягивающейся в субширотном

направлении. Мощность рыхлых отложений изменяется от первых метров в южной части до 70 м в центре и на северо-западе.

Территория разрабатываемых железорудных месторождений КМА приурочена к южному склону Воронежской антеклизы. Кристаллический фундамент представлен метаморфизованными породами архея и нижнего протерозоя, прорванными интрузивными образованиями. Породы фундамента подвержены метаморфизму, дислоцированы, смяты в линейные складки и перекрыты осадочно-терригенными отложениями общей мощностью до 100-120 м [5].

Подземные воды трещинно-пластового типа напорные, приурочены к зонам экзогенного выветривания пород фундамента и тектонической трещиноватости. Верхним водоупором являются глинистые отложения мезо-кайнозоя, нижним – плотные породы скального массива. На площадке «Заречье» безнапорный водоносный горизонт развит вдоль южной границы и частично распространен в пределах локальных выступов палеорельефа. На территории КМА архей-протерозойский водоносный комплекс сдренирован по периметру Лебединского карьера. Режим подземных вод техногенно-нарушенный, осложнен формированием локальных депрессионных воронок.

Результаты исследования и их обсуждение

Стационарные наблюдения за вариациями уровня подземных вод на участках СИП позволили выделить основные закономерности реакции водонасыщенных коллекторов на проведение крупномасштабных взрывов. Установлено три этапа. На первом этапе зарегистрирован кратковременный подъем уровня подземных вод (в единичных случаях – фонтанирование скважин). На втором – отмечено скачкообразное или постепенное снижение уровня до первоначального положения и ниже (реже – сработка напора и осушение кровли водоносного горизонта). В течение третьего этапа происходит постепенное восстановление уровня подземных вод [2]. Подобные закономерности изменения гидрогеологической ситуации прослежены в процессе разработки железорудных месторождений КМА по данным высокоточного мониторинга.

За период измерений декабрь 2020 г. – июнь 2022 г. постсейсмическое снижение уровня подземных вод установлено при проведении 9 промышленных взрывов в камерах шахты Коробковского месторождения и 13 взрывов блоков Лебединского карьера [3]. Максимальное снижение уровня архей-протерозойского водоносного комплекса на 15 см зарегистрировано в наблюдательной скважине глубиной 140 м, расположенной выше по направлению подземного потока от рабочей камеры на приведенном расстоянии $70 \text{ м/кг}^{1/3}$ (Рис. 1). Минимальное снижение уровня архей-протерозойского водоносного комплекса на 2-5 мм отмечено в этой же

скважине при промышленных взрывах в трех камерах, которые находятся выше по направлению подземного потока на приведенных расстояниях 22-40 м/кг^{1/3} [6].

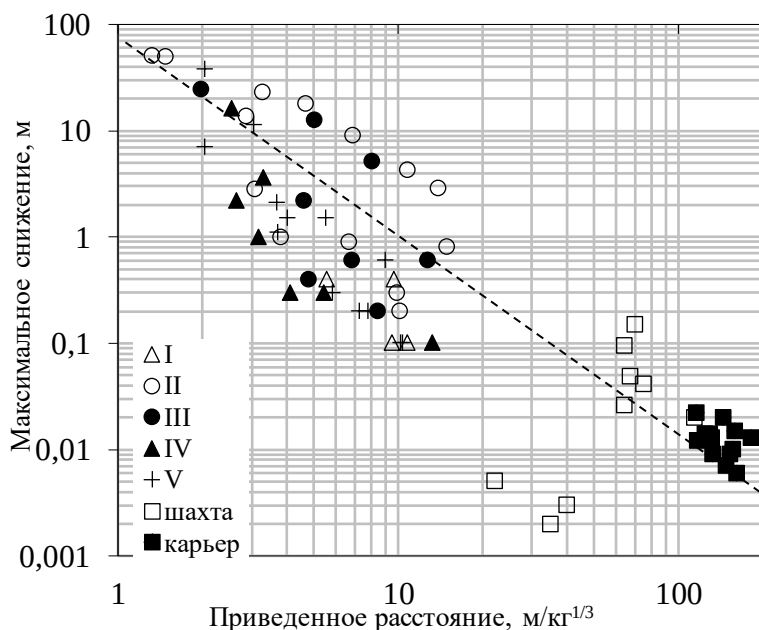


Рис. 1 Зависимость максимального снижения уровня подземных вод при крупномасштабных и промышленных взрывах от приведенного расстояния (пунктир – линия тренда).

Для выделения основных факторов, влияющих на условия формирования постсейсмического снижения уровня подземных вод, привлечены данные измерений, полученные в 29 скважинах, расположенных на площадке «Заречье», при проведении 5 крупномасштабных взрывов. Боевые скважины I-II и IV-V пройдены в вулканогенно-осадочных отложениях нижнего карбона, скважина III – в интрузивном массиве. Значения максимального снижения уровня подземных вод (S_{max}), полученные на участках СИП и КМА, описываются степенной зависимостью от приведенного расстояния ($\bar{R}$) с высоким коэффициентом детерминации: $S_{max} = 153.6 \bar{R}^{-1.76}$.

На площадке «Заречье» после крупномасштабного взрыва I в скважине, характеризующейся наиболее высоким гипсометрическим положением уровня подземных вод, но удаленной на расстояние 9,6 м/кг^{1/3}, зафиксировано снижение уровня на 0,4 м, сопоставимое с данными, полученными в скважине, расположенной на расстоянии 5,6 м/кг^{1/3}. После взрывов II и III максимальное снижение пьезометрической поверхности прослежено вдоль палеодолины. Меньшие значения снижения уровня подземных вод зарегистрированы на участке выклинивания регионального водоупора, в пределах которого трещинно-пластовые воды гидравлически взаимосвязаны с грунтовыми водами, спорадически развитыми в четвертичных отложениях. Незначительное снижение пьезометрической поверхности проявилось в

скважинах, расположенных за пределами основного блока и в вулканогенно-метаморфизованных отложениях среднего кембрия.

После взрыва IV при одном и том же приведенном расстоянии $2,6 \text{ м/кг}^{1/3}$ меньшее снижение на 2,2 м установлено в скважине, вскрывающей безнапорный водоносный горизонт трещинно-пластовых вод. При сопоставимых приведенных расстояниях $3,2\text{--}3,3 \text{ м/кг}^{1/3}$ большее снижение пьезометрической поверхности прослежено при высоком гипсометрическом залегании кровли водоносного горизонта. После взрыва V максимальное снижение уровня подземных вод установлено в скважинах, расположенных выше по направлению подземного потока в пределах осевой зоны регионального разлома.

Основные параметры и условия формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод зависят от выделенных геолого-структурных и гидрогеологических факторов.

Заключение

Для оценки возможных изменений гидрогеологической ситуации в пределах Коробковского месторождения КМА привлечены результаты геолого-геофизических и гидрогеологических работ, проводимых на отдельных участках СИП. Архивные данные по реакции подземных вод на крупномасштабные взрывы использованы для определения условий формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод. К ведущим геолого-структурным и гидрогеологическим факторам отнесены: палеорельеф обводненной зоны экзогенной и тектонической трещиноватости скальных пород; структурные (разломы) и стратиграфические границы; соотношение между направлением подземного потока, положением эпицентра взрыва и наблюдательными скважинами. Отмеченные факторы планируется учитывать при анализе постсейсмического снижения уровня подземных вод, прослеженного после проведения промышленных взрывов в шахте и карьере.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00469, <https://rscf.ru/project/23-27-00469/>

Список литературы

1. Израэль Ю.А., Петров В.Н., Прессман А.Я., Ровинский Ф.Я., Стукин Е.Д., Тер-Сааков А.А. Радиоактивное загрязнение подземных сред при подземных ядерных взрывах и методы прогнозирования. Л.: Гидромет, 1970. 68 с.
2. Горбунова Э.М., Спивак А.А. Изменение режима подземных вод при подземных ядерных взрывах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1997. № 6. С. 29–37.
3. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М. Постсейсмические эффекты массовых взрывов, выделенные при разработке железорудных месторождений КМА // Динамические процессы в геосферах. 2022. № 1. С. 51–68. DOI: 10.26006/22228535_2022_14_1_51
4. Субботин С.Б., Лукашенко С.Н., Романенко В.В., Каширский В.В., Пестов Е.Ю., Горбунова Э.М., Кузеванов К.И. Выявление путей миграции техногенных радионуклидов за пределы испытательной

площадки «Балапан» // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана (сб. трудов НЯЦ РК за 2011 г.). Павлодар: Дом печати, 2011. С. 161–232.

5. Железные руды КМА. М.: Геоинформмарк, 2001. 616 с.
6. Gorbunova E., Besedina A., Petukhova S., Pavlov D. Reaction of the Underground Water to Seismic Impact from Industrial Explosions // Water. 2023. 15 (1358). <https://doi.org/10.3390/w15071358>

УДК 556

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПРИРОДНЫХ ВОД И ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С МЕТАЛЛАМИ

О.Ю. Дроздова*¹, С.А. Лапицкий¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: drozdova@geol.msu.ru

Аннотация

Взаимодействие растворенных органических веществ (РОВ) с ионами металлов играет ключевую роль в их миграции в водных экосистемах и формировании качества природных вод. Исследования проводились с пробами водных объектов экосистемы Мещёрской низменности (Владимирская область), различающихся объемом, динамикой, содержанием органических веществ и степенью их трансформации (болота, реки и озера). Проведено сравнение количества и свойств органических соединений объектов исследования. Показано, что исследованные объекты различаются не только содержанием, но и природой РОВ: в водах болот и рек преобладает гидрофобная часть органического вещества, в основном, аллохтонного происхождения, а воды озер характеризуются доминированием гидрофильной части при увеличении содержания автохтонных соединений. Получены данные по формам нахождения металлов (Fe, Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) в изучаемых пресноводных экосистемах (фракционный состав соединений металлов и их количества связанные с органическими лигандами).

Ключевые слова: растворенные органические вещества, металлы, комплексы, поверхностные воды

ORGANIC MATTER OF NATURAL WATERS AND ITS INTERACTION WITH METALS

O.Yu. Drozdova*, S.A. Lapitskiy

Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: drozdova@geol.msu.ru

Abstract

The interaction of dissolved organic substances (DOM) with metal ions plays a key role in their migration in aquatic ecosystems and the formation of natural water quality. The studies were carried out with samples of water bodies of the ecosystem of the Meshcherskaya lowland (Vladimir region), which differ in volume, dynamics, content of organic substances and the degree of their transformation (swamps, rivers and lakes). The quantity and properties of organic compounds of the objects of study are compared. It is shown that the studied objects differ not only in the content, but also in the nature of DOM: in the waters of swamps and rivers, the hydrophobic part of organic matter, mainly of

allochthonous origin, prevails, in the waters of lakes, the hydrophilic part dominates with an increase in the content of autochthonous compounds. Data were obtained on the forms of occurrence of metals (Fe, Cu, Ni, Zn, Cd, Pb) in the studied freshwater ecosystems (fractional composition of metal compounds and their amounts associated with organic ligands).

Key Words: dissolved organic substances, metals, complexes, surface waters

Введение

Попадание загрязняющих веществ в водную экосистему может изменить характеристики окружающей среды и, следовательно, изменить условия существования водных организмов [1]. Проведенные ранее исследования показали, что между общей концентрацией металла в поверхностных водах и их токсичностью нет однозначной зависимости [2], таким образом биологическая доступность и степень токсичности металлов зависит от форм их нахождения в природных водах [3]. Однако оценка форм нахождения металлов в водах представляет собой сложную задачу [4].

В данной работе были исследованы образцы вод болот, рек и озер, расположенных на территории Мещёрской низменности (Владимирская область). Все исследованные объекты отдалены от каких-либо прямых источников загрязнения. Данный район относится к бореальной зоне, литохимический состав подпочвенного субстрата представлен флювиогляциальными отложениями Q_{IV} . Формирование химического состава почв данного района, определяется несколькими факторами, к которым относятся почвообразующие породы легкого механического состава, замедленный биологический круговорот веществ и контрастные окислительно-восстановительные условия. Данные факторы обуславливают интенсивную миграцию элементов в экосистемах, в том числе вымывание их из почв в поверхностные воды.

Методы исследований

In-situ выполнялись измерения электропроводности, величины pH и щелочности. В лаборатории были определены содержания неорганических анионов (на ионном хроматографе Dionex ICS-2000), общее содержание органического углерода и азота в пробах (на жидкостном анализаторе LiquiTOC trace, Elementar), спектры поглощения (на спектрофотометре 511 UV/Vis Portlab), содержания гуминовых веществ (по реакции их связывания с красителем Толуидиновый синий), содержание металлов (с использованием ИСП-ОЭС Agilent 5110 и ИСП-МС Element-2).

Для определения форм металлов в пробах получены распределения их соединений по размерным фракциям с использованием фильтрационных установок Amicon и фильтров Millipore с размером пор - 0,4 мкм, 100, 10 и 1 кДа. Определение содержаний анионных, катионных и нейтральных соединений металлов проводили хроматографическим методом с

использованием ионообменных смол: катионита (Dowex 50 WX 8, 200-400, Serva) и анионита (ДЭАЭ-целлюлоза, Sigma Aidrich).

С учетом всех полученных гидрохимических характеристик были проведены расчеты форм металлов в объектах исследования с использованием программы Visual MINTEQ версия 3.1 [5] в сочетании с базой данных и моделями привязки гуминовых веществ NICA-Donnan [6].

Результаты и их обсуждения

По классификации О.А. Алекина [7] воды всех исследуемых рек и озер относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы, а воды болот – хлоридному классу кальциевой группы. Значения удельной электропроводности (κ) исследуемых природных вод находятся в диапазоне от 23 до 93 мкСм/см. Воды болот характеризуются слабокислой реакцией среды, а значения pH вод рек и озер находятся в диапазоне 6,4 – 6,7 (Табл. 1). Содержания основных неорганических анионов и катионов во всех объектах невысокие.

Табл. 1 Основные характеристики исследуемых вод.

Показатель		Болота (n = 3)	Реки (n = 3)	Озера (n = 3)
pH	ед.	4,3	6,4	6,7
κ	мкСм/см	89,5	49,5	30,0
K	мг/л	0,6	0,7	1,8
Na		1,3	2,0	4,3
Ca		4,2	12,0	10,9
Mg		0,8	3,0	3,7
HCO ₃ ⁻		1,8	6,5	37,4
Cl ⁻		4,6	1,4	2,6
SO ₄ ²⁻		4,2	0,8	7,8
NO ₃ ⁻		0,2	0,2	0,2
POY		98,8	38,4	21,2
ГВ		81	19	15
C/N	ед.	83	36	28
SUVA ₂₅₄	л/мг*м	5,0	4,4	3,5
E ₂₅₄ /E ₄₃₆	ед.	35,2	24,1	14,5

Болотные воды характеризуются наибольшим содержанием растворенного органического углерода (POY) и гуминовых веществ (Табл. 1). В водах рек содержание POY составляет 35 – 41, а в водах исследованных озер – 17 – 28 мг/л. Вместе со снижением содержания POY и гуминовых веществ в ряду болота – реки – озера происходит изменение его качественного состава, о чем свидетельствуют снижение величин C/N, SUVA₂₅₄ и увеличение отношения E₂₅₄/E₄₃₆. Полученные значения этих показателей говорит о том, что в водах болот и рек, в отличие от вод озер, преобладает гидрофобная часть органического вещества (SUVA₂₅₄ >4), в основном, аллохтонного происхождения (более высокие значения C/N и E₂₅₄/E₄₃₆) [8].

Изучение распределения органического вещества в природных водах по размерным фракциям свидетельствует о преобладании в озерах низкомолекулярного органического вещества – доля фракции РОУ меньше 1 кДа составляет 69 – 92%. В водах рек доминирует ОБ больших размеров, 34% органического углерода представлено фракцией 10 – 100 кДа. В болотных водах большая часть органического углерода представлена фракцией 100 кДа – 0,4 мкм (в среднем 40%), доля фракции <1 кДа РОУ составила 17,5 %.

Содержание микроэлементов в исследованных природных водах приведено в табл. 2. Наибольшие содержания всех изученных металлов (Fe, Cu, Zn, Cd, Ni, Pb) найдены в болотных водах. Во всех отобранных пробах наблюдается большое количество Fe, что является закономерностью для данной территории.

Табл. 2 Содержания металлов в исследованных природных водах (мкг/л).

	Болота	Реки	Озера
Fe	5950	4300	2180
Cu	1,30	1,31	1,35
Zn	9,05	3,60	3,27
Cd	0,07	0,05	0,03
Ni	3,65	2,00	1,40
Pb	1,65	1,00	0,27

Получено, что Fe присутствует во фракциях различного размера во всех исследуемых водах: в водах всех болот преобладающей фракцией является 1 – 100 кДа, которая составила 74%. Наибольшее количество железа (70%) находится преимущественно во фракции 0,4 – 100 мкм в водах рек. В то время как в водах озер большая часть железа представлено соединениями <1 кДа (73 %). Для всех исследованных вод найдены достоверные корреляции содержаний Fe и РОУ по фильтратам ($R = 0,78 - 0,98$).

В природных водах богатых органическим веществом и железом при миграции в результате полимеризации Fe(III) под воздействием различных факторов (например, инсоляции) могут образовываться крупные частицы гидроксида ($> 0,22$ мкм), что может приводить к тому, что в водах рек железо находится в более крупных фракциях, чем в водах болот [9].

Получено, что в водах рек и озер для Pb, Ni, Cu, Zn и Cd преобладающими являются соединения <1 кДа ($> 38\%$). В водах болот преобладающей фракцией является <1 кДа для Ni, 1 – 10 кДа для Zn и Cd, 10 – 100 кДа для Pb и 10 кДа – 0,4 мкм для Cu. Распределение металлов по различным фракциям коррелируют с распределением Fe в исследуемых водных объектах ($R_{\text{Me-Fe}} = 0,86 - 0,99$), как и с РОУ, хотя эта зависимость выражена слабее ($R_{\text{Me-POУ}} = 0,78 - 0,98$).

При определении количества катионных, анионных и нейтральных соединений металлов было получено, что Cu, Cd, Fe и Pb находятся в исследованных водах преимущественно в

анионной форме (57-85%). В то же время для Ni и Zn преобладающей формой является катионная (77-91%).

Проведенные расчеты с использованием программы Visual MINTEQ показали, что большая часть Fe, Cd, Cu и Pb во всех объектах исследования представлена комплексами с органическими лигандами (84-100%). Для Ni и Zn в водах рек и озер преобладающей формой является неорганическая (51-89%). Результаты физико-химического моделирования в целом согласуются с экспериментальными данными по формам металлов.

Заключение

Показано, что в исследуемых водах Владимирской Мещеры в ряду болота – реки – озера происходит не только снижение содержания РОУ и гуминовых веществ, но и изменение качественного состава органического вещества.

Полученные экспериментальные и расчетные данные показали, что большая часть Fe, Cu, Cd и Pb находится в виде комплексов с органическими веществами (которые преимущественно представлены их отрицательно заряженными соединениями с органическими веществами) в водах исследованных болот и рек. В водах озер основной формой нахождения Ni и Zn являются неорганические соединения или катионные комплексы с органическими лигандами, вероятнее всего, с продуктами метаболизма водных организмов.

Финансирование. Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 21-77-10028.

Список литературы

1. Schmeller D. S., Loyau A., Bao K., Brack W., Chatzinotas A., De Vleeschouwer F., Friesen J., Gandois L., Hansson S.V., Haver M., Le Roux G., Shen J., Teisserenc R., Vredenburg, V.T. People, pollution and pathogens – Global change impacts in mountain freshwater ecosystems // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 622–623. P. 756–763.
2. Будников Г. К. Тяжелые металлы в экологическом мониторинге водных систем // *Соросовский образовательный журнал*. 1998. Т. 4. № 5. С. 23-29.
3. Жулидов А. В. Физико-химическое и химическое состояние металлов в природных водах: токсичность для пресноводных организмов // *Экологическое нормирование и моделирование антропогенного воздействия на водные экосистемы*. 1988. № 1. С. 78-82.
4. Adams W., Blust R., Dwyer R., Mount D., Nordheim E., Rodriguez P.H., Spry D. Bioavailability assessment of metals in freshwater environments: a historical review // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2019. Vol. 39, N 1. P. 48–59.
5. Gustafsson J.P. Visual MINTEQ ver. 3.1. 2013. URL: <http://vminteq.lwr.kth.se> [Дата обращения: 03.05.2023]
6. Milne C.J., Kinniburgh D.G., van Riemsdijk W.H., Tipping E. Generic NICA-Donnan model parameters for metal-ion binding by humic substances // *Environmental Science & Technology*. 2003. 37, 958-971.
7. Алекин О.А. Основы гидрохимии / Л.: Из-во Гидрометеиздат, 1970. 413 с.

8. Ilina S.M., Drozdova O.Yu., Lapitskiy S.A. Alekhin Yu.V., Demin V.V., Zavgorodnyaya Yu.A., Shirokova L.S., Viers J., Pokrovsky O.S. Size fractionation and optical properties of dissolved organic matter in the continuum soil solution-mire-river and terminal lake of a boreal watershed // Organic Geochemistry. 2014. Vol. 66. P. 14-24.
9. Drozdova O.Yu., Aleshina A.R., Tikhonov V.V., Lapitskiy S.A., Pokrovsky O.S. Coagulation of organo-mineral colloids and formation of low molecular weight organic and metal complexes in boreal humic river water under UV-irradiation // Chemosphere. 2020. Vol. 250. P. 26216.

УДК 624.131

ОЦЕНКА ДОЛГОСРОЧНОГО ВЛИЯНИЯ СВАЛКИ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

И.А. Костикова¹, И.А. Позднякова¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Москва, Россия, E-mail: kostiran@yandex.ru,
irina_pozd58@mail.ru

Аннотация

В настоящее время в Московском регионе закрыты более 40 полигонов ТКО, значительная часть из них находится в процессе рекультивации. Исследования на полигонах «Дубна Правобережная», «Щербинка», «Ядрово» и других показали, что почвы, породы зоны аэрации и подземные воды в районе полигонов загрязнены органическими соединениями, соединениями азота, хлорид-ионом, нефтепродуктами, тяжелыми металлами. На примере полигона ТКО «Дубна Правобережная» показано, как долго после рекультивации свалочное тело и породы зоны аэрации могут быть источником поступления в подземные воды загрязняющих веществ, в частности нефтепродуктов. Прогноз миграции нефтепродуктов в зоне аэрации и свалочном теле выполнен при помощи численных расчетов влаго- и массопереноса в ненасыщенной зоне с использованием HELP и UnSat-Suite-VS2D/T.

Ключевые слова: полигоны ТКО, подземные воды, зона аэрации, загрязнение, нефтепродукты.

ASSESSMENT OF THE LONG-TERM IMPACT OF LANDFILLS ON GROUNDWATER CONTAMINATION

I.A. Kostikova¹, I.A. Pozdniakova¹

¹Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS), Moscow, Russian Federation, E-mail: kostiran@yandex.ru,
irina_pozd58@mail.ru

Abstract

Currently, more than 40 landfills in the Moscow region are closed, a significant part of them is in the process of recultivation. Studies at the landfills "Dubna Pravoberezhnaya", "Shcherbinka", "Yadrovo" and others have shown that soils, rocks of the aeration zone and groundwater in the area of landfills are contaminated with organic, nitrogen, chloride, oil, heavy metals. On the example of landfill "Dubna Pravoberezhnaya" it is shown how long after recultivation the landfill body and unsaturated zone can be a source of groundwater contamination by oil. Forecast of oil transport in the unsaturated zone and the landfill body was made by numerical calculations of moisture and mass transport in the unsaturated zone using HELP and UnSat-Suite-VS2D/T.

Key Words: landfill, groundwater, unsaturated zone, contamination, petrochemicals.

Введение

Полигон ТКО «Дубна Правобережная» находится в городском округе Дубна на северо-западе Московской области. В непосредственной близости от полигона находится садовое товарищество. За 30 лет функционирования полигона на площади 42000 м² складировано около 400000 т отходов. С 2016 по 2020 гг. полигон проходил рекультивацию. Инженерно-геологические и геоэкологические исследования, проводившиеся для разработки проекта рекультивации полигона, показали, что мощность свалочного тела изменяется от 19 в центре свалки до 3–5 и 1 м на краях. С поверхности свалочное тело перекрыто песчано-глинистым грунтом мощностью 0.6 м. Свалочное тело представляет собой чередование отходов (пластика, стекла, металла, древесины, текстиля, бумаги, пищевых отходов) и суглинка мощностью 5 и 0.5–0.6 м соответственно. Зона аэрации за пределами полигона небольшой мощности и сложена коричневым тугопластичным опесчаненным моренным суглинком мощностью до 2 м.

Анализ данных о свойствах и составе фильтрата и концентрации загрязняющих веществ в нем и подземных водах указывает на преобладание восстановительных условий в свалочном теле и подземных водах, которые тем более сохранятся после рекультивации [1]. В условиях недостатка кислорода биохимические трансформации иона аммония и биохимическое разложение нефтепродуктов затруднены, и их миграция в подземных водах сдерживается только сорбцией. Для оценки долгосрочного влияния полигона ТКО на загрязнение подземных вод были выбраны нефтепродукты, так как они не присутствуют в естественных условиях в подземных водах региона и являются одним из индикаторов техногенного воздействия.

Нефтепродукты присутствуют во всех пробах воды и грунта. Концентрация нефтепродуктов в фильтрате составила 8,4, в подземных водах в скважине, находящейся в центре полигона, 0,66, в колодце садового товарищества 0,06, что меньше 0,3 мг/л (ПДК по СанПиН 1.2.3685–21). Содержание нефтепродуктов в пробах грунта, отобранных у подножия свалочного тела, составляет 263–342 мг/кг.

Методы исследований

Для оценки влияния свалочного тела на загрязнение подземных вод на первом этапе оценивается количество влаги, поступающей на уровень подземных вод под свалочным телом в период функционирования свалки. Для этого рассчитывался водный баланс свалочного тела при помощи программного комплекса HELP, специально созданного для проектирования полигонов [6]. В этой гидрологической модели в водном балансе свалки учитывается поверхностный сток, эвапотранспирация и утечки фильтрата через основание свалочного тела. Свалочное тело представлено как зона неполного насыщения, гравитационное стекание влаги в которой рассчитывается по закону Дарси-Клютта. Расчет утечек фильтрата через основание свалочного

тела – количества влаги, поступающей на уровень подземных вод под свалочным телом, или инфильтрационного питания подземных вод с использованием HELP применяется не только для организации полигона, но и для оценки опасности свалки для загрязнения подземных вод [3]. При помощи HELP также было рассчитано количество влаги, поступающей на уровень подземных вод из зоны аэрации у подножья свалочного тела.

На втором этапе при помощи программы VS2DT – численной конечно-разностной модели миграции загрязняющих веществ с влагой в ненасыщенной зоне [5] воспроизводилось формирование профиля загрязнения нефтепродуктами свалочного тела и профиля зоны аэрации подземных вод в 30-ти летний период эксплуатации полигона и очистка после этого периода чистыми не содержащими нефтепродукты атмосферными осадками, В VS2DT вертикальное движение влаги и загрязняющих веществ в ненасыщенной зоне описывается уравнения Ричардсона и сопряженного с ним уравнения конвективно-дисперсионного массопереноса для расчета массопереноса в зоне аэрации. Полученные распределения напора и влажности по профилю зоны аэрации далее используются для вычисления скоростей движения влаги в зоне аэрации в расчетах массопереноса.

Расчетные профили свалочного тела и зоны аэрации воспроизводили реальные условия, расчетные параметры задавались по умолчанию из базы данных, входящей в состав UnSat Suite Plus 2.2.0.2 [4]. Основные допущения в расчетах – свалочное тело представляет собой зону неполного насыщения, фильтрат формируется из атмосферных осадков, поступающих на поверхность свалочного тела, загрязняющие вещества моментально поступают из отходов в фильтрат и мигрируют до уровня подземных вод. В подземные воды нефтепродукты поступают с инфильтрационным питанием. Задавая в течение 30-ти летнего периода рассчитанную при помощи HELP интенсивность инфильтрации под свалочным телом и зоной аэрации, подбирали концентрацию нефтепродуктов в инфильтрации таким образом, чтобы на конец 30-ти летнего периода концентрация нефтепродуктов на уровне подземных вод соответствовала наблюдаемым в подземных водах под свалочным телом 8,4 мг/л и 300 мг/л (в пересчете на жидкую фракцию) в зоне аэрации у подножья свалки. В дальнейших расчетах имитировалось очищение свалочного профили и зоны аэрации, задавая естественное инфильтрационное питание, характерное для климатической зоны и строения расчетных профилей, и нулевую концентрацию нефтепродуктов в инфильтрации [2].

Результаты и их обсуждения

Оценка влияния зоны аэрации на загрязнение подземных вод

Рассчитанная при помощи HELP для профиля зоны аэрации интенсивность инфильтрации составила 200 мм/год в течение 30-ти летнего периода работы полигона ТКО. На конец этого периода на уровень подземных вод поступает 300 мг/л нефтепродуктов,

что соответствует концентрации в породе в пересчете на жидкую фракцию (Рис.1). После рекультивации свалки задавалась интенсивность инфильтрации 60 мм/год и нулевая концентрация нефтепродуктов в ней. Без учета адсорбции на уровне грунтовых вод концентрация во влаге на уровне грунтовых вод снижается с 300 до 0,3 мг/л примерно за 34 года после рекультивации полигона (Рис.1). С учетом адсорбции (линейная изотерма Генри, $K_d=1$) время формирования профиля загрязнения нефтепродуктами в зоне аэрации и время ее очищения от нефтепродуктов после рекультивации свалки увеличивается (Рис.2). Концентрации нефтепродуктов во влаге на уровне подземных вод уменьшаются до 0,3 мг/л более чем через 100 лет после рекультивации свалки.

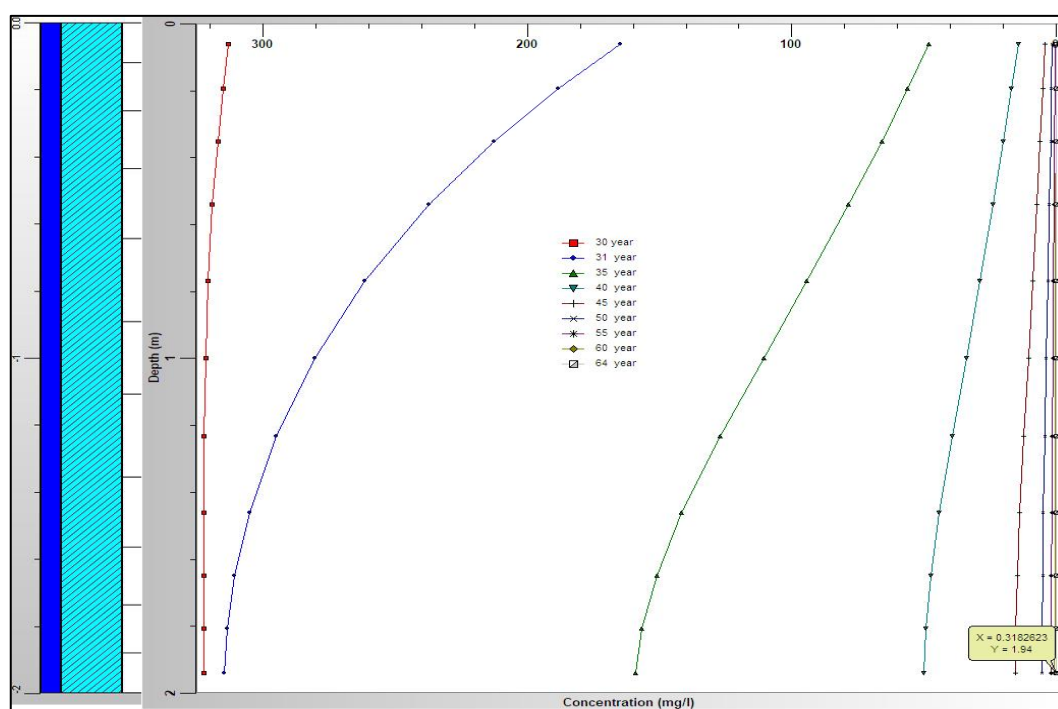


Рис. 1 Профили равновесных концентрации нефтепродуктов в зоне аэрации с момента начала естественного очищения ($T=30$ лет) до достижения ПДК на уровне грунтовых вод ($T=64$ года).

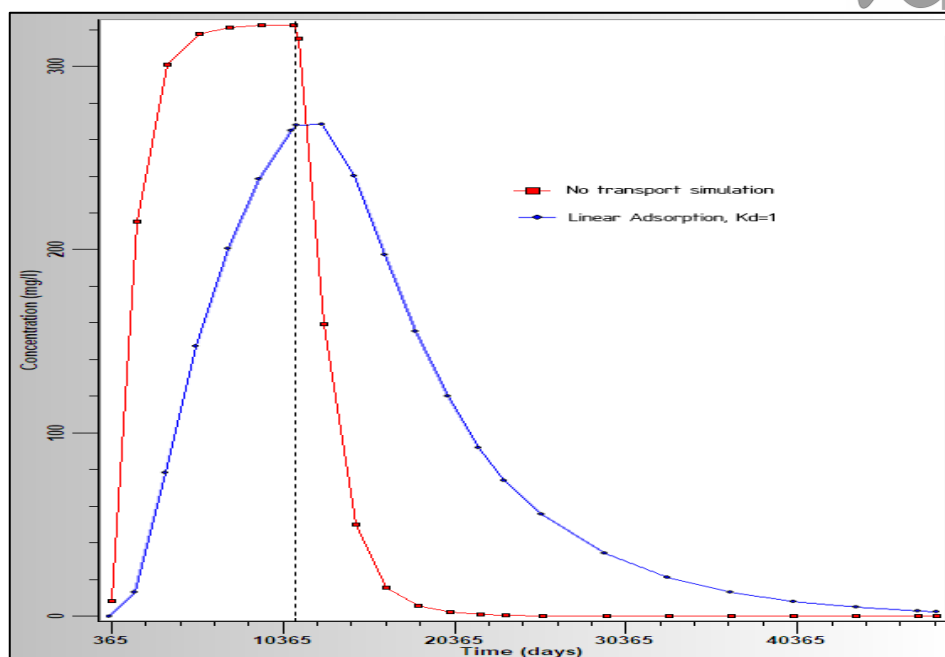


Рис. 2 Расчетная концентрация нефтепродуктов, поступающая на уровень подземных вод.

Оценка влияния свалочного тела на загрязнение подземных вод

Рассчитанная при помощи HELP для свалочного тела интенсивность инфильтрации в течение 30-ти летнего периода функционирования свалки составила 319 мм/год. На конец этого периода на уровне подземных вод концентрации нефтепродуктов во влаге составят 8,4 мг/л (Рис. 3). Снижение концентраций нефтепродуктов на уровне подземных вод до 0,3 мг/л при интенсивности инфильтрации 90 мм/год будет наблюдаться к 110 годам, а полное очищение свалочного тела от нефтепродуктов к 140 годам.

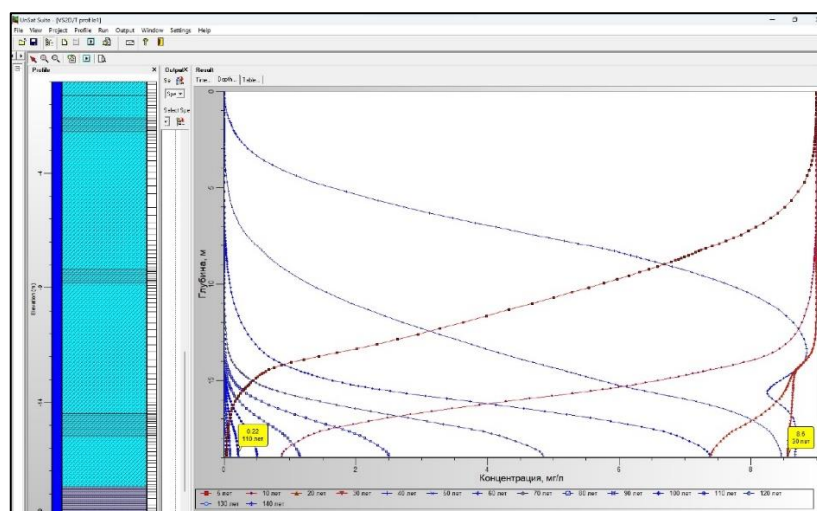


Рис. 3 Расчетный профиль и распределение концентрации нефтепродуктов по профилю свалочного тела от поверхности до уровня подземных вод на разные моменты времени в период функционирования (красные линии) и после рекультивации свалки (синие линии)

Заключение

Полигоны ТКО еще долгое время остаются источниками поступления в подземные воды нефтепродуктов из свалочного тела и загрязненных почв. Во влаге, поступающей на уровень подземных вод под свалочным телом, концентрации нефтепродуктов будут превышать ПДК еще более 100, а полное очищение свалочного профиля займет более 140 лет. Породы зоны аэрации еще более 30 лет будут источником поступления на уровень подземных вод нефтепродуктов с влагой в концентрации, превышающей ПДК, без учета процессов адсорбции и 110 лет с учетом.

При прогнозе миграции загрязняющих веществ в подземных водах в районах свалок необходимо учитывать такое долговременное влияние полигонов ТКО.

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования по программе № 122022400104-2.

Список литературы

1. Галицкая И.В., Путилина В.С., Юганова Т. И. Аммонийный азот в фильтрате полигонов ТКО: образование, трансформация, долговременность загрязнения // Геоэкология. 2021. №1. С. 3–13.
2. Гриневский С.О., Новоселова М.В. Закономерности формирования инфильтрационного питания подземных вод // Водные ресурсы. 2010. т. 37. С. 1-12.
3. D. A. Fatta, A. Papadopoulos, M. Loizidou. A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area // Environmental Geochemistry and Health. 1999. V. 21. pp. 175–190.
4. Gogolev, M.I. et al. 1-D Unsaturated zone groundwater flow and contaminant transport modeling using VLEACH, PESTAN, VS2DT and HELP). WHI UnSat Suite user's manual. WHI publication. 2002.
5. Healy R.W. Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the US Geological Survey's computer program VS2D // Water-Resources Investigations Report 90-4025. 1990. 125 p.
6. P. R. Schroeder, T. S. Dozier, P. A. Zappi, US Environmental Protection Agency Risk Reduction Engineering Laboratory Report // EPA/600/R-94/168a. 1994. 84 p.

УДК 556.3.06

ОЦЕНКА БАРЬЕРНОЙ РОЛИ АДЫРНОЙ ГРЯДЫ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАЙОНЕ ДИГМАЙСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА, СЕВЕРНЫЙ ТАДЖИКИСТАН

М.Д. Курбонов^{*1}, А.В. Расторгуев²

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

E-mail: murod.kurbanov@inbox.ru

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: alvr9@mail.ru

Аннотация

Адырные гряды широко распространены на севере Таджикистана, антиклинальные структуры, вытянутые вдоль берега р. Сыр-Дарья. При проведении гидрогеологических прогнозов они часто рассматривались как непроницаемый барьер для подземных вод и загрязняющих веществ. Так было и с Дигмайским хвостохранилищем. Предполагалось, что гряда изолирует хвостохранилище от р. Сыр-Дарья. Однако мониторинг подземных вод не подтвердил это предположение. В докладе описывается попытка воспроизведения истории развития хвостохранилища помощью численного моделирования. Это позволило обосновать необходимые для проведения прогнозных расчетов фильтрационные параметры пород, слагающих адырную гряду. Для более детального учета гидрогеологических условий объекта использован код GeRa, основанный на конечно-объемной неортогональной дискретизации. Результаты моделирования позволили определить граничное условие на питающей границе модели, принять фильтрационные параметры и инфильтрационное питание.

Ключевые слова: антиклинальная структура, барьер, хвостохранилище, моделирование, мониторинг

ASSESSMENT OF THE BARRIER ROLE OF THE ADYR RIDGE, BASED ON STUDIES IN THE AREA OF THE DIGMAY TAILINGS DUMP, NORTHERN TAJIKISTAN

M.D. Kurbonov^{*1}, A.V. Rastorguev²

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: murod.kurbanov@inbox.ru

²Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: alvr9@mail.ru

Abstract

The Adyr ridges are widespread anticlinal structures in northern Tajikistan that extend along the banks of the Syr-Darya River. During hydrogeological forecasts they have often been considered

as an impermeable barrier for groundwater and pollutants. This was the case with the Digmay tailings pond. The ridge was assumed to isolate the tailings pond from the Syr-Darya River. However, groundwater monitoring has not confirmed this assumption. The report describes an attempt to reproduce the history of the development of the tailings dump by means of numerical modeling. This allowed substantiating the filtration parameters of rocks composing the Adyr ridge necessary for conducting forecast calculations. The GePa code based on finite-volume non-orthogonal discretization was used for more detailed consideration of hydrogeological conditions of the object. The modeling results allowed us to determine the boundary condition at the model feed boundary, adopt hydraulic conductivity and recharge.

Key Words: anticlinal structure, barrier, tailings pond, modeling, monitoring

Введение

Дигмайское хвостохранилище расположено на территории Гафуровского района Дигмайской возвышенности Согдийской области Республики Таджикистан. Географически эта территории находится в пределах Ферганской долины.

Оно эксплуатировалось в 1963-1993 гг. В этот период была создана наблюдательная сеть скважин для стационарных гидрогеохимических наблюдений за уровнями подземных вод и рядом химических компонентов. На основе режимных наблюдений было установлено, что в подземных водах в повышенных концентрациях содержатся следующие нормируемые компоненты: сульфат-анион, хлор-анион и естественные радионуклиды (ЕРН), минерализация и общая жесткость. Последний раз геомиграционное моделирование для этого объекта было выполнено на плановой модели в конце 80 годов прошлого века. В задачу настоящих исследований входит разработка модели, учитывающей гидрогеологические условия объекта более детально и с использованием последних данных.

Характеристика объекта исследования

Современный облик территории, формирование складок, а также разрывных нарушений связан с активными постседиментационными тектоническими движениями [1; 3]. В пределах рассматриваемой территории выделяется структура Дигмая, типичный пример брахиантиклинали. Брахиантиклиналь представляет собой сундучную складку, с шириной замка 2,0-2,5 км. В замке породы залегают горизонтально.

Ядро складки сложено породами плиоцен - нижнечетвертичного возраста, представляющими собой переслаивание песчаников, аргиллитов и алевролитов.

Складка осложнена двумя тектоническими нарушениями на юге и на севере, соответствующими перегибам складки. Северо-западное крыло складки после перегиба падает

на северо-запад под углом 20^0 , юго-восточное отсутствует, вероятнее всего разрушено вследствие последующих эндогенных процессов (Рис. 1).

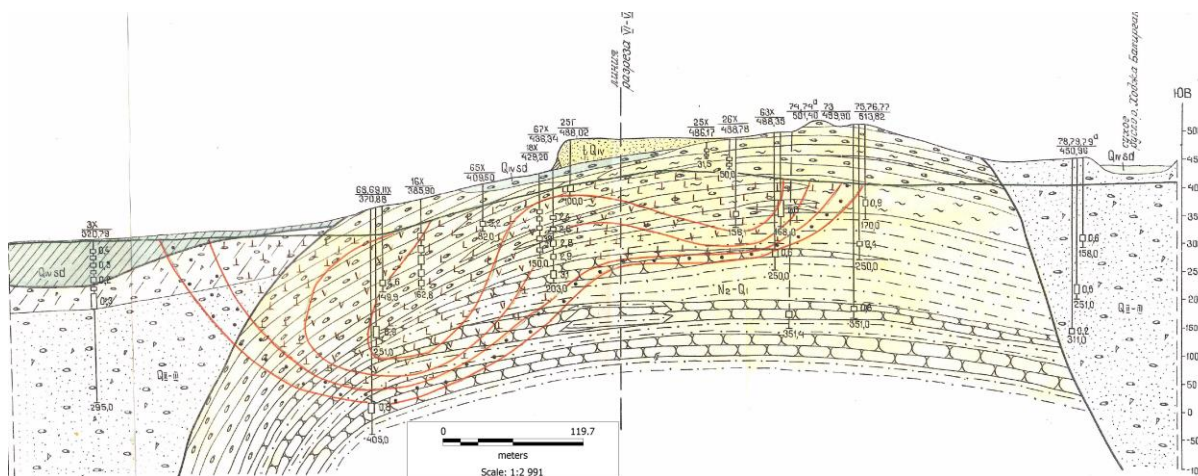


Рис. 1 Гидрогеологический разрез через хвостохранилище с положением наблюдательных скважин.

При проектировании хвостохранилища, вероятно, рассчитывали на то, что северо-западное крыло складки окажется барьером, однако загрязнение в наблюдательных скважинах в долине р. Сыр-Дарья оказалось уже в первые годы эксплуатации. При этом барьерная роль проявлялась в том, что содержание сульфатов уменьшалось в 50 раз по сравнению с хвостами.

Моделирование геофильтрации-геомиграции

Основные особенности природных и техногенных условий объекта, отраженные на разрезе (Рис.1), могут быть учтены на двумерной профильной модели. Так как необходимо выполнить нестационарный расчет, учитывающий историю эксплуатации хвостохранилища, важны начальные условия. Такая модель также важна для оценки граничного условия притока с юго-восточной границы, оценки инфильтрационного питания и калибровки фильтрационных параметров.

Моделирование начальных условий было проведено с помощью кода GeRa [2], реализующего неортогональную дискретизацию и позволяющего максимально полно учесть особенности объекта.

По данным мониторинга (Табл. 1) содержание сульфатов в подземных водах резко снижается с удалением от хвостохранилища что возможно связано с сульфатредукцией и должно быть учтено в дальнейшем.

Результаты и их обсуждения

В результате калибровки модели была получена структура потока в напорах подземных вод (Рис.3) и приняты фильтрационные параметры в соответствии с табл. 2

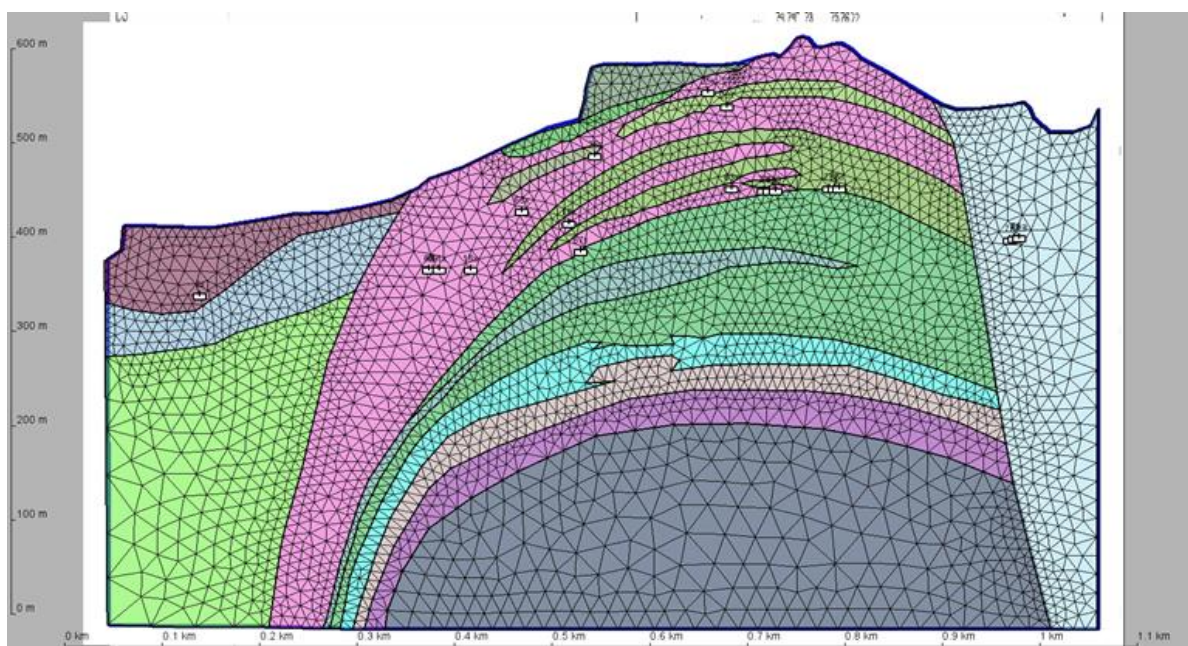


Рис 2. Модельный разрез через хвостохранилище с конечно-объемной дискретизацией.

Табл. 1 Данные мониторинга на 1988г.

Номер скважины	Расстояние до хвостохранилища, м	Содержание сульфатов, мг/л
67х	160	1200
18х	270	2000
65х	770	3800
68	1700	206
3х	4050	213

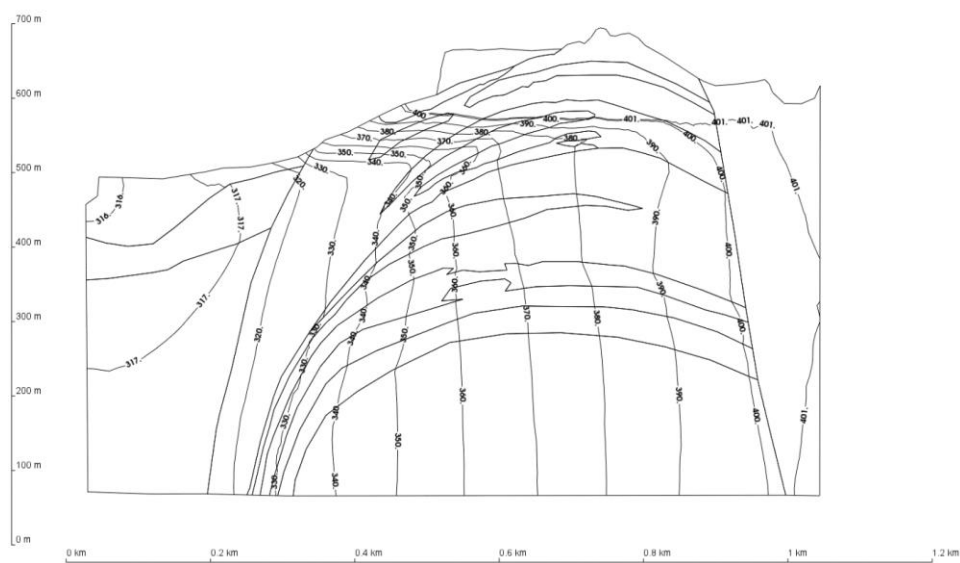


Рис. 3 Структура потока подземных вод на 1965г, полученная в результате моделирования.

По результатам решения обратной задачи были приняты также граничные условия - инфильтрационное питание $w=0,00005$ м/сут и скорость фильтрации потока, поступающего в расчетную область, на правой границе модели $v=0,06$ м/сут.

Табл. 2 Фильтрационные параметры после калибровки модели.

Литологический состав	Коэффициент фильтрации, м/сут	Литологический состав	Коэффициент фильтрации, м/сут
Гравийно-галечные отложения с песчаным заполнителем	30	Валунно-галечные отложения	50
Переслаивание аргиллитов и алевролитов	0,4-1,3	Песок илистый	0,013
Песчаник	0,15-0,18	Конгломераты	0,59
Глина	0,0002		

Заключение

Для Дигмайского хвостохранилища на севере Таджикистана разрабатывается модель геомиграции на основе кода GeRa. В настоящее время модельно обоснованы начальные и граничные условия, и ведутся работы по воспроизведению истории эксплуатации хвостохранилища. Данные мониторинга показали возможность сульфатредукции, что надо учитывать при разработке миграционной части модели.

Список литературы

1. Грабовников В.А., Самсонов Б.Г., Манукян В.А. и др. Гидрогеологические и геофизические исследования по заказу 48-04. Москва. 1962.
2. Капырин И. В., Иванов В.А., Копытов Г.В., Уткин С.С.. Интегральный код GeRa для обоснования безопасности захоронения РАО // Горный журнал – 2015 – №10 – С. 44-50.
3. Кокорина В.А., Глаголев А.В., Лебедев Б.Я. Гидрогеология Таджикской ССР. Дигмайское хвостохранилище. – М., 1989.

УДК 556.3.01:519.6

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ОТРАБОТКЕ СКРУ-2 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н.В. Кутяйкин*¹, П.К. Коносовский², А.А. Потапов³

¹ Горный институт УРО РАН/ Геологический центр СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, E-mail: nikolaykut@mail.ru

² Горный институт Уральского отделения РАН, Санкт-Петербург, Россия, E-mail: konosavsky@dhspb.ru

³ Горный институт Уральского отделения РАН, Санкт-Петербург, Россия, E-mail: potapov@dhspb.ru

Аннотация

Проведен комплексный анализ географических, геологических и гидрогеологических данных на территории рудника СКРУ-2 с использованием различных методов. Корреляционный анализ с применением современных геоинформационных средств показал хорошую сопоставимость данных, полученных разными методами. Впоследствии результаты интерпретации данных были загружены в численную геофильтрационную модель, с помощью которой оценивалась возможность образования новых или расширения существующих провалов в земной коре на территории действующих рудников и жилой застройки.

Ключевые слова: гидрогеология, численное моделирование, опытно-фильтрационные работы, геостатистический анализ

PREDICTION OF HAZARDOUS GEO-ECOLOGICAL PHENOMENA IN THE MINING OF SKRU-2 USING NUMERICAL MODELING

N.V. Kutiaikin*¹, P.K. Konosavsky², A.A. Potapov³

¹ Mining institute Ural Branch of the Russian Academy of Sciences/Geological center of SPbU, Saint Petersburg, Russian Federation, E-mail: nikolaykut@mail.ru

² Mining institute Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation, E-mail: konosavsky@dhspb.ru

³ Mining institute Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation, E-mail: potapov@dhspb.ru

Abstract

A comprehensive analysis of geographical, geological and hydrogeological data at the SKRU-2 mine site using various methods was carried out. Correlation analysis using modern geoinformation tools showed good comparability of data obtained by different methods. Subsequently, the results of data interpretation were loaded into a numerical flow model, which was used to assess the possibility

of the formation of new or expansion of existing dips in the earth's crust in the territory of operating mines and residential development

Key Words: hydrogeology, numerical modeling, pumping test, geostatistical analysis

Введение

В ноябре 2014 года на аварийном участке СКРУ-2 (1995 г.) произошло образование провала с нарушением водозащитной толщи (ВЗТ) и поступлением надсолевых подземных вод в рудник [1].

Для выявления структуры фильтрационного потока подземных вод в районе провала на СКРУ-2 в современных геолого-гидрогеологических условиях в рамках настоящей работы была выполнена разработка детальной локальной геофильтрационной модели надсолевой толщи пород.

Для этого были выполнены следующие работы:

Построение детальной локальной геологической модели с целью оконтуривания в плане и в разрезе зон повышенной проницаемости пород в пределах гидрогеологических пластов СМТ2 и ТКТ, а также для детализации конфигурации разделяющей границы между СМТ2 и ТКТ.

Детальная графоаналитическая интерпретация результатов всех ранее проведенных опытно-фильтрационных работ из уже сооруженных наблюдательных и водопонижающих скважин, располагающихся в радиусе порядка 1000 м от провалов на СКРУ-2, с целью количественной оценки значений фильтрационных параметров (проницаемости) горных пород в различных водоносных горизонтах.

Соотнесение данных гидрогеологических и геологических материалов и их последующая интерпретация с использованием методов геостатистического анализа, с последующей подгрузкой материалов в локальную гидрогеологическую модель.

Непосредственно авторами данного доклада были выполнены анализы опытно-фильтрационных работ и режимных наблюдений на участке работ, геостатистически обработаны геологические и гидрогеологические материалы, создана локальная гидрогеологическая численная модель провала на основе региональной модели, на которой впоследствии были посчитаны прогнозные сценарии развития негативных явлений в земной коре [2].

Методы исследований

За длительный период разработки месторождений калийной соли был накоплен значительный объем данных, позволяющих достаточно точно охарактеризовать геологическое строение участка работ. Изучению подверглись пласты непосредственно залегающие над

пермскими соляными отложениями («соляное зеркало»). В сокращенном виде выделяют следующие подразделения:

Уфимский ярус. Соликамский горизонт. (P_{1sl_1}) Представлен соляно-мергельной толщей, отсюда название – СМТ. Горизонт разделяется на два подгоризонта в зависимости от соотношения соляных и карбонатных отложений – СМТ₁ (больше карбонатов, меньше соли, залегает выше) и СМТ₂ (залегает ниже, соли больше, непосредственно граничит с соляным зеркалом).

Верхнесоликамская свита. (P_{1sl_2}) Представлена терригенно-карбонатной толщей (ТКТ). Сложена известняками, доломитами, песками и глинами.

Шемшинский горизонт. ($P_{1šš}$) Называется пестроцветной толщей (ПЦТ), сложена песчаниками, аргиллитами, алевролитами, глинами и конгломератами пестрого окраса.

Четвертичная система (Q) представлена стандартным комплексом пород различной мощности и разнообразного генезиса – аллювиального, делювиального, ледникового и других.

Основным методом для разбраковки данных был анализ геологических разрезов, космологических снимков и кернового материала.

Для анализа пространственной изменчивости проницаемости пород использовалась бальная оценка.

0 — Керн отсутствует.

1 — Скальные монолитные породы, которые обладают крайне низкой фильтрационной способностью.

2 — Пластичные породы, также обладающие низкими фильтрационными свойствами. К ним отнесены глины и глины с редкими обломками щебня или зернами песка, или алевроита.

3 — Трещиноватые скальные породы – породы с малым или средним количеством открытых трещин, по которым возможна фильтрация флюида.

4 — Рыхлые и сильнотрещиноватые породы – это рыхлые слабоглинистые пески, супеси и сильнотрещиноватые породы, разрушенные до щебня и дресвы.

5 — Карстовые брекчии – породы индикаторы бывших карстовых пустот, по которым в определенный период времени могли проходить мощные водные потоки.

6 — Породы с карстовыми пустотами (идентифицировались при наличии провала бурового инструмента). [2]

Всего на территории, прилегающей к провалу, в 1996, 2014-2017 году было пробурено и обустроено 43 гидрогеологические режимные наблюдательны скважины, из которых 29 скважин были оборудованы на водоносные горизонты средней и нижней части терригенно-карбонатной толщи (ТКТ), и 14 скважин – на водоносный горизонт верхней подтолщи соляно-мергельной толщи (СМТ₂). Из 43 скважин была проведена 60 опытных откачек подземных вод.

Интерпретация данных опытно-фильтрационных работ была проведена по двум методикам с использованием аналитической расчетной схемы и на базе эмпирической зависимости. Для интерпретации по аналитическим схемам был использован широко известный программный комплекс ANSDIMAT [3].

Результаты обработки гидрогеологических и геологических материалов были загружены в GIS систему ArcGIS и с помощью инструментов Geostatistical Analyst были интерполированы на всю исследуемую территорию. Для интерполяции использовался широко известный метод Kriging (Кригинг).

На основе полученных карт распределения параметров была создана комплексная 3D-модель, которая впоследствии была загружена в программный комплекс Processing Modflow 8.0. [5] Основой модели является региональная крупная модель [4], на которой были созданы локальные модели врезки – это позволило задать известные граничные условия, снятые с крупной модели. Используя полученные материалы, была проведена калибровка модели по данным режима и опытно-фильтрационных работ.

Результаты и их обсуждения

В результате анализа геологических материалов для каждой скважины были определены баллы проницаемости, а на всей территории были выделены линеаменты, разделенные на два порядка – генеральные и вторичные. На карту линеаментов были наложены карты балльности по слоям. Пример такого наложения представлен на рис. 1.

Совмещение карты линеаментов, выделенных по рельефу местности, с картами балльности показывает хорошую зависимость между ними, особенно хорошо это заметно по увеличению балльности между двумя генеральными линеаментами северо-западного простиранию, где также сосредоточены и известные провалы в земле.

Результаты опытно-фильтрационных работ демонстрируют ухудшение фильтрационных характеристик сверху вниз по разрезу. Так, в целом, для пласта ТКТ характерны коэффициенты фильтрации в районе первых десятков метров в сутки. В то время как в нижележащем слое СМТ коэффициенты фильтрации изменяются от 0,05 до 5 м/сут. Коэффициенты фильтрации обоих пластов очень неоднородны в плане, при этом в обоих случаях увеличиваются в области существующих провалах, что связано с обильным образованием трещин в результате геомеханических нарушений.

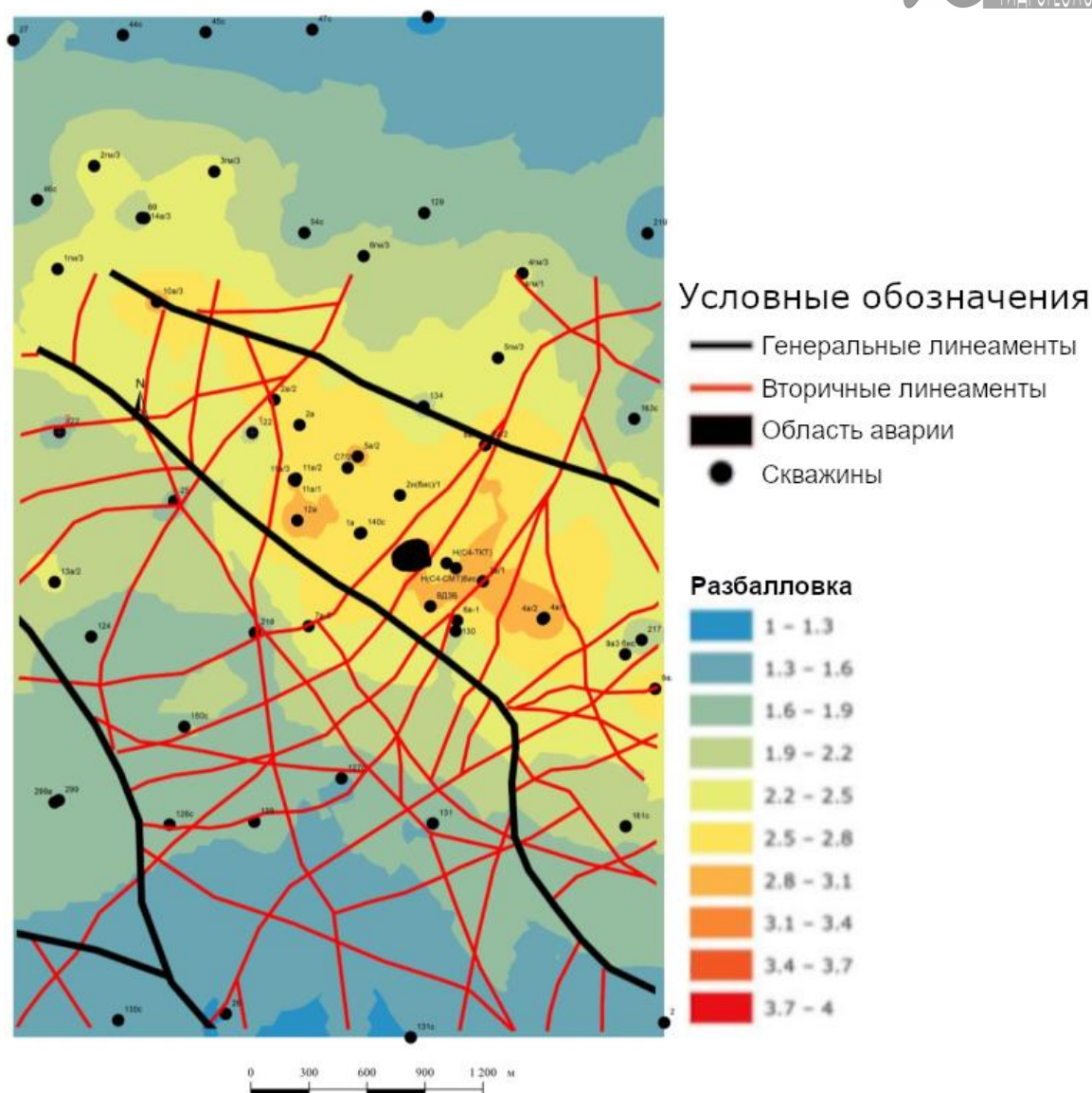


Рис. 1 Наложения карты линеаментов на карту распределение балльности по слою ТКТ.

Наконец, основным результатом проведенных исследований следует считать прогнозные расчёты двух вариантов развития событий, связанных с потенциальным образованием новых провалов:

Прогнозный Вариант 1 (вероятный). Размеры провальной зоны, объединяющей оба современных провала, останутся на современном уровне порядка 200 x 250 м; фильтрационное сопротивление пород внутри этой зоны останутся на уровне для периода с начала мая 2018 г по конец января 2019 г. Учитывая, что в период с конца января по конец мая 2019 г. средний расход водопритока подземных вод в рудник составлял всего 75 м³/час (что значительно меньше, чем 606 м³/час в указанный период с начала мая 2018 г. по конец января 2019 г.) данный Вариант 1 следует рассматривать именно как наиболее вероятный, а не как наиболее благоприятный.

Прогнозный Вариант 2 (наихудший). Размеры провальной зоны увеличатся до значений 300 х 400 м, а фильтрационное сопротивление пород внутри этой зоны окажется практически равным нулю (практически беспрепятственный выход подземных вод из водоносных горизонтов в провальную зону и далее в рудник). При этом дренажный контур водопонижающих скважин (ВПС), оборудованных вокруг провалов на ТКТ, вообще не будет функционировать.

Заключение

В рамках этой работы были применены геологические, гидрогеологические, геоинформационные, геостатистические и численные методы изучения геологического объекта. Были показаны корреляционные связи между географическими, геологическими и гидрогеологическими данными.

Полученные результаты позволяют с высокой уверенностью утверждать, что прогнозные сценарии, полученные в результате численного моделирования, обладают высокой точностью и могут быть применены для дальнейшего практического использования.

Выражаем свою благодарность своим коллегам из Горного института УрО РАН и Геологического центра Санкт-Петербургского Государственного Университета.

Список литературы

1. Анализ и прогноз развития ситуации на руднике СКРУ-2 на основе комплексных исследований. Отчёт о НИР. Фонды ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018
2. Барях А.А. и др. «Разработка детальной локальной геофильтрационной модели надсолевой толщи пород в районе провала на СКРУ-2 на основе комплексного геолого-геофизического и гидрогеологического анализа». – Пермь, 2019. 192 с.
3. Синдаловский Л.Н. Аналитическое моделирование опытных опробований водоносных пластов и скважинных водозаборов (программный комплекс ANSDIMAT). – СПб.: Наука, 2014. – 521 с.
4. Потапов А.А., Барях А.А. и др. Анализ гидрогеологических условий надсолевой толщи шахтных полей действующих рудников СКРУ-1 и СКРУ-2 ОАО «Уралкалий». Отчёт по НИР. Пермь., ГИ УрО РАН, 2014.
5. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model— Documentation of the SEAWAT- 2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT). By Christian D. Langevin, U.S. Geological Survey, Miami, Fla., W. Barclay Shoemaker, U.S. Geological Survey, Miami, Fla., and Weixing Guo, CDM Missimer, Ft. Myers, Fla. Tallahassee, Florida 2003.

УДК 550.24

ГЕОСЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО СЕКМЕНТА ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА

Р.А. Магомедов¹

¹Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. М. Ярагского 75, ra-mag@yandex.ru

Аннотация

На основе разработанного в Институте геологии ДФИЦ РАН метода, впервые проведена количественная оценка геосейсмической опасности территории северо-восточного сегмента Восточного Кавказа. В результате проведенных исследований удалось закартировать (в условных единицах) потенциальный уровень геосейсмической опасности исследуемой территории и приблизиться к составлению детальной карты зон возможных очагов землетрясений.

Установлено, что области с максимальными значениями уровня потенциала геосейсмической опасности пространственно совпадают с зонами возможных очагов сильных землетрясений, имеющими историческую активность и приурочены к зоне пересечения субкавказских глубинных разломов с главным кавказским структурным элементом - Аграхано-Тбилиско-Левантийской левосдвиговой зоной 1-го порядка.

Ключевые слова: региональная геотектоника, сейсмический режим, активность, геосейсмическая опасность, геосейсмологические показатели, палеосейсмичность, гипоцентр.

GEOSEISMIC DANGER THE NORTH-EASTERN SEGMENT OF THE EASTERN CAUCASUS

R.A. Magomedov¹

¹Institute of Geology of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Republic of Dagestan,
Makhachkala, ul. M. Yaragского 75, ra-mag@yandex.ru

Annotation

Based on the method developed at the Institute of Geology of the Russian Academy of Sciences, the geoseismic hazard of the territory of the northeastern segment of the Eastern Caucasus was quantitative assessed for the first time. As a result of the conducted research, it was possible to map (in conventional units) the potential level of geoseismic danger of the studied territory and to get closer to drawing up a detailed map of the potential earthquake centers zones.

It is established that the areas with the maximum values of the geoseismic hazard potential spatially coincide with the zones of possible foci of strong earthquakes having historical activity and

473

are confined to the zone of intersection of the Subcaucasian deep faults with the main Caucasian structural element - the Agrakhan-Tbilisi-Levantine left-thrust zone of the 1st order.

Key Words: regional geotectonics, seismic regime, activity, geoseismic hazard, geoseismological indicators, paleoseismicity, hypocenter.

Введение

Потенциальный уровень *геосейсмической опасности* блоков земной коры является важнейшим показателем оценки степени сейсмической опасности исследуемого региона. Она позволяет приблизиться к составлению детальной карты зон возможных очагов землетрясений (зон ВОЗ) и дать их прогноз в исторической перспективе.

Методы исследования

Основными методами исследования являются анализ пространственно-временного распределения сейсмичности и экспертная оценка уровня *геосейсмической опасности* блоков земной коры по комплексу *геосейсмологических показателей*, таких как мощность земной коры, протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла, наличие следов палеосейсмичности, мощность сейсмоактивного слоя, сейсмическая активность, максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда, период последней активизации и тектоническая активность. Разработка нового метода оценки уровня геосейсмической опасности явилась продолжением проводимых исследований в рамках темы НИР ИГ ДФИЦ РАН. При этом стояла задача более детально оконтурить зоны ВОЗ. С этой целью проведено дробное деление *квазиоднородных геодинамических блоков* (КОГБ) региона [3]. Блок наименьшего порядка разделили на 4 части с примерными поперечными размерами в 30 км каждая, в соответствии с проявлением предвестниковых аномалий высокочастотной части спектра излучений сейсмических волн, которые применяются при уточнении местоположения очага землетрясения на заключительной стадии развития сейсмического процесса [5]. Выбранный способ деления (разбиения) гарантирует от завышения степени геосейсмической опасности рассматриваемого блока, могущего произойти за счёт влияния «потенциала» смежных блоков.

Под понятием «*геосейсмическая опасность*» здесь подразумевается уровень максимальной потенциальной энергии, заключенный в структуре (блоке) земной коры по состоянию на современный период его развития и определяемый на основе расчета геосейсмологических показателей в условных единицах. В зависимости от литолого-структурного строения, вещественного состава, геолого-геофизических условий и истории геологического развития того или иного участка земной коры, потенциальная энергия эпизодически выделяется в процессе сейсмических событий в настоящем или в будущем. В

работе определен набор *геосейсмологических показателей* характеризующий в наибольшей степени потенциальный уровень геосейсмической опасности (G_s) КОГБ на сегодняшний день:

$$G_s = f(m, l, M_{\max}, a_t, \tau, s, h_s, A_{10}) \quad (1)$$

где, m – мощность земной коры в км, l – протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла, км, $M_{\max}$ – максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда, a_t – тектоническая активность, τ – период последней активизации, s – наличие следов палеосейсмичности, h_s – мощность сейсмоактивного слоя, км, A_{10} – сейсмическая активность. Для оценки G_s блоков земной коры набор исходных данных о современном строении и состоянии земной коры является исчерпывающим, поскольку многие другие параметры невозможно использовать из-за их неполноты. Каждый показатель градуирован с условным весом от 0 до 1, определенным экспертным путем (Табл. 1) и учтен в суммарной оценке.

Табл. 1 Экспертная градуировка геосейсмологических показателей в условных единицах (от 0 до 1).

№ п/п	Геосейсмологические показатели	Экспертная градуировка	Условные единицы
1	Мощность земной коры, в км	максимальная мощность	1
		мощность выше 80% от максимальной	0,5
		мощность ниже 80% от максимальной	0,1
2	Протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла, в км.	максимальная суммарная протяженность дизъюнктивных зон фундамента	1
		от 1/2 максимальной до максимальной	0,7
		менее 1/2 максимальной	0,3
		максимальная протяженность дизъюнктивных зон в осадочном чехле	0,5
		от 1/2 максимальной протяженности до максимальной	0,2
		менее 1/2 максимальной	0,1
3	Максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда, $M_{\max}$.	сейсмическое событие в блоке с $M \geq 6.6$	1
		$M_{\max}$ в пределах от 6 до 6.5	0,9
		-//- в пределах от 5.5 до 5.9	0,8
		-//- в пределах от 4.5 до 5.4	0,7
		-//- в пределах от 3.8 до 4.4	0,5
		-//- менее 3.8	0,1
4	Тектоническая активность, a_t	современная активность (за последние 100 лет)	1
		историческая активность	0,7
		четвертичная и новейшая активность	0,2+0,1
5	Период последней активизации, τ	сильное сейсмическое событие в блоке XVIII-XIX вв.	1
		XVII века	0,5
		с VII по XIII века	0,1
6	Наличие признаков (следов) палеосейсмичности, S в км ²	максимальная площадь распространения следов палеосейсмичности	1
		от 1/2 максимальной площади до максимальной	0,5
		менее 1/2 максимальной площади	0,3
7	Мощность	мощность сейсмоактивного слоя $\geq h_{\max}$	1

	сейсмоактивного слоя, h в км	$0,75 h_{max} \leq h < h_{max}$	0,8
		$0,50 h_{max} \leq h < 0,75 h_{max}$	0,5
		$0,25 h_{max} \leq h < 0,50 h_{max}$	0,3
		$h < 0,25 h_{max}$	0,1
		При отсутствии очага	0
8	Сейсмическая активность, A_{10}	максимальное значение	1,77
		в пределах	от 1,50 до 1,77
		-//-/-	от 1,00 до 1,49
		-//-/-	от 0,50 до 0,99
		-//-/-	от 0,30 до 0,49
		-//-/-	менее 0,30
		при отсутствии информации по блоку	0

Пояснения к таблице 1:

1. Максимальное значение показателя определяется после его расчета для всех КОГБ.
2. Показатель «*мощность земной коры*», определяется по карте мощности земной коры исследуемой территории и с привлечением данных глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и интерпретации гравиметрических материалов при их наличии.
3. При оценке показателя «*протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла*» не учитывают искусственные границы. Рассматривая границы блоков как области пространства и дизъюнктивные структуры, одновременно принадлежащие двум смежным блокам, мы сразу сталкиваемся с вопросом: где в этой области пространства провести линию, от которой следует считать протяженности дизъюнктивных зон и размеры блока? От этого в значительной мере зависят результаты последующих расчетов и их интерпретации. Поэтому, при оценке уровня геосейсмической опасности не учитываются искусственные границы блоков. Протяженность дизъюнктивных зон фундамента и осадочного чехла измеряется на геолого-тектонических картах соответствующего масштаба курвиметром.
4. *Максимальная отмеченная (наблюденная) магнитуда* определяется по результатам анализа общего каталога землетрясений Единой геофизической службы РАН (ЕГС РАН) с учетом сильных исторических землетрясений на исследуемой территории.
5. *Тектоническая активность*. Для целей определения уровня геосейсмической опасности блоков и определения зон ВОЗ современная и историческая активность имеет наибольшее значение и условный вес по сравнению с четвертичной и новейшей активностью.
6. *Период последней активизации* определялся по каталогу исторических землетрясений исследуемой территории и по данным летописи. Макросейсмические данные имеются о 18 сильных землетрясениях кавказского региона с VII века нашей эры.
7. Показатель «*наличие следов палеосейсмичности*» определялся на основе анализа результатов публикаций по исследованию палеосейсмособытий [2,4,8 и др.]. Производится наложение карт и схем распространения следов палеосейсмособытий исследуемой территории на схему КОГБ с последующим определением их площади распространения для каждого блока. Максимальной площади распространения следов присваивается условная единица – 1.
8. Показатель «*мощность сейсмоактивного слоя*» определялся по распределению гипоцентров ощутимых землетрясений по глубинам. Оно дает сведения о сейсмоактивном слое и глубине его залегания. Мощность сейсмоактивного слоя в блоке с одиночным и на одинаковом уровне очагами принимается как 5 км.
9. Значение сейсмической активности A_{10} вычислялся по известной формуле [1]:

$$A_{10} = \frac{S_0 \cdot T_0 \cdot \sum_{K_{min}}^{K_{max}} 10^{\gamma(K-10)} \cdot N_K}{S \cdot T \cdot K_{max} - K_{min} + 1} \quad (2)$$

где γ – наклон графика повторяемости; S_0 – единица нормирования по площади ($S_0 = 1000 \text{ км}^2$); T_0 – единица времени ($T_0 = 1$ год); S – площадь выбранных; T – период наблюдения землетрясений. Далее производится наложение карты A_{10} [7] исследуемой территории на схему КОГБ с последующим определением ее значения для каждого блока. Определяется максимальное значение A_{10} которому

придается значение - 1. Между максимальным и минимальным значениями производится дробное деление A_{10} на условные единицы (в табл. 1 приведено дробное деление).

Результаты и их обсуждения

Полученная информация сводилась в итоговую таблицу, где отображается уровень потенциала геосейсмической опасности каждого выделенного КОГБ в условных единицах. В таблице 2 приведена суммарная оценка (по всем геосейсмологическим показателям) уровня потенциала геосейсмической опасности КОГБ северо-восточного сегмента Восточного Кавказа. По результатам итоговой таблицы составлена карта потенциального уровня геосейсмической опасности (Рис), которая позволяет идентифицировать активные, на современном этапе развития региона, сейсмогенерирующие структуры и дать детальную картину распределения зон ВОЗ на исследуемой территории. Результаты оценки показывают, что максимальное значение уровня потенциала геосейсмической опасности в условных единицах имеет блок 5вз приуроченный к зоне пересечения субкавказских глубинных разломов с одним из главных, кавказским структурным элементом – Аграхано-Тбилиско-Левантийской левосдвиговой зоной 1-го порядка. К этой же зоне примыкает и диагонально ориентированный Андийско-Сулакский разлом, который отделяет Сулакский выступ от Капчугайского грабена. Уровень потенциала геосейсмической опасности блока является величиной непостоянной, поскольку его показатели меняются в исторической и геологической перспективе.

Табл. 2. Суммарная оценка уровня потенциала геосейсмической опасности КОГБ северо-восточного сегмента Восточного Кавказа.

Квадратно-родные геодинамические блоки	Показатели потенциала геосейсмической опасности КОГБ (условные единицы)									Суммарная оценка показателей, усл. ед.			
	мощность земной коры (m)	прогибность дельтовидных ан-флюидов и ос-двигательных (f)	наличие при-знаков палео-сейсмичности (f)	тектоническая активность (a _г)	период по-следней акти-визации (t)	максимальная отмеченная (на-блюдениями) маг-нитуда (M _{max})	мощность сейсмоактив-ного слоя (h _г)	сейсмическая активность (A _г)		1	2	3	4
1	a ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.8	0.4	0.4	0.4
	b ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.4	0.5	0.4	0.4
	c ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.4	0.5	1.2	1.0
	d ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0.3-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.5-0.5-0.7-0.7	0-0-0-0	0.1-0.1-0.1-0.1	1.0	1.3	1.2	1.2
2	a ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.5	0.5	0.9	0.9
	b ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0.3-0.3	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.5-0.5-0.5-0.5	0-0-0-0	0.1-0.1-0.1-0.1	1.0	0.5	1.2	0.9
	c ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0.3-0.3-0.1-0.3	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.5-0.5-0.5-0.5	0-0-0-0	0-0.1-0.1-0.1	1.2	1.3	1.1	1.3
	d ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0.3-0.3	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.5-0.5-0.5-0.5	0-0-0-0	0.1-0.1-0.1-0.1	1.0	1.0	1.3	1.4
3	a ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.4	0.4	0.6	0.5
	b ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.4	0.4	0.4	0.4
	c ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0.3-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0-0-0.5-0.5	0-0-0-0	0.1-0.1-0.1-0.1	0.8	0.5	1.0	1.1
	d ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.1-0.1-0.5-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.5	0.5	1.3	0.5
4	a ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0.3	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.5-0.7-0.7-0.7	0-0-0-0	0.1-0.3-0.1-0.3	1.0	1.4	1.2	1.7
	b ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0.3-0.3-0.3	0-0.4-0.3	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.7-0.7-0.5-0.8	0.1-0.1-0.3-0	0.3-0.9-0.3-1	1.4	2.4	2.1	4.2
	c ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0.3-0-0.3	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0-0.7-0-0	0-0-0-0	0-0.1-0-0.1	0.4	1.5	0.4	0.8
	d ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.5-0.5-1	0-0.3-0-0	0.5-0.5-0.3-0.3	0.3-0.7-0.3-0.3	0-1-0-0	0.9-0.7-0.7-0.7	0.1-0.1-0.1-0.1	0.5-0.5-0.1-0.3	2.4	4.3	2.0	2.7
5	a ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.5-0.5	0.4-1.2-0.8-0.9	0.5-0.3-1-0.5	0.7-1-0.3-0.3	1-0-0-0	0.8-1-0.8-0.9	0-0.3-0.1-0.1	0.5-0.3-0.5-0.1	4.4	4.6	4.0	3.3
	b ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.5-0.5	1.2-0.8-0.5-0.9	0.3-0.3-0.3-0.3	0.3-0.3-0.7-0.3	0-0-1-0	0.8-0.5-1-0.5	0.1-0-0.1-0	0.5-0.1-0.3-0.1	3.7	2.5	4.4	2.6
	c ₁₋₂₋₃₋₄	1-1-1-1	0.3-0.4-0.8-0.4	0.3-0.3-0.5-0.5	0.3-0.3-0.7-0.7	0-0-1-1	0.5-0.7-0.8-0.7	0.1-0.1-0-0	0.5-0.1-0.3-0.3	3.0	2.9	5.1	4.6
	d ₁₋₂₋₃₋₄	1-1-1-1	0.4-0.4-0.4-0.4	0.5-0.5-0.3-0.3	0.3-0.3-0.7-0.7	0-0-0-0.5	0.7-0.5-1-0.9	0-0.1-0-0	0.1-0.1-0.1-0.1	3.0	2.9	2.4	3.5
6	a ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.5-0.5	0.3-0.3-0.8-0.7	0.3-0-0.5-0.3	0.3-0.3-0.7-0.3	0-0-0.1-0	0.5-0.9-0.7-0.9	0-0.1-0-0.5	0.3-0.3-0.1-0.3	2.2	2.4	3.5	3.5
	b ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.1-0.5-0.5	0-0-0.3-0.3	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.7	0-0-0.4-0.1	0.7-0.5-0.5-0.9	0.1-0-0.1-0.1	0.3-0.1-0.1-0.1	1.4	1.0	1.8	2.7
	c ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-1-1	0.4-0.4-0.4-0.4	0.3-0.3-0.3-0.3	0.3-0.3-0.7-0.7	0.5-0-0.5-0	0.7-0.7-0.8-0.8	0.1-0-0-0.1	0.1-0.1-0.1-0.3	2.9	2.3	3.8	3.2
	d ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.5-0.5	0.8-0.8-0.4-0.4	0.3-0.3-1-0.5	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.5-0.5-0.9-0.1	0-0-0.1-0.1	0.1-0.1-0.1-0.1	2.5	2.5	3.3	2.0
7	a ₁₋₂₋₃₋₄	0.1-0.5-0.5-0.5	0-0-0-0	0.3-0.3-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.7-0.8-0-0	0-0-0-0	0-0.1-0-0	1.4	2.0	0.8	0.8
	b ₁₋₂₋₃₋₄	1-1-1-1	0-0-0-0.3	0.3-0.3-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.8-0.7-0.7-0.7	0-0.1-0-0.1	0.3-0.3-0.1-0.1	2.7	2.7	2.1	2.5
	c ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.5-0.5	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0-0-0-0	0.8	0.8	0.8	0.8
	d ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.5-0.5	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0-0.7-0-0	0-0.1-0-0	0-0.1-0-0.1	0.8	1.7	0.8	0.9
8	a ₁₋₂₋₃₋₄	1-1-0.5-0.5	0.3-0-0.7-0.3	0-0-0-0	0.7-0.3-0.3-0.3	1-0-0-0	0.5-0.7-0.8-0.7	0-0-0.1-0.8	0.3-0.3-0.5-0.3	3.8	2.3	2.9	2.9
	b ₁₋₂₋₃₋₄	1-1-0.5-0.5	0-0-0.3-0.3	0-0-0-0	0.3-0.7-0.3-0.3	0-0.5-0-0	0.5-0.7-0.7-0.8	0.1-0-0.1-0.1	0.1-0.1-0.5-0.7	2.0	3.0	2.4	2.7
	c ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.5-0.5	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.5-0.7-0-0.5	0.1-0-0-0	0.1-0.1-0.1-0.1	1.5	1.6	0.9	1.4
	d ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.5-0.5	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.8-0.8-0.7-0	0.5-0.1-0.1-0.1	0.3-0.5-0.1-0.1	2.4	2.3	1.7	1.0
9	a ₁₋₂₋₃₋₄	1-1-0.5-0.5	0.3-0.3-0.3-0.3	0.3-0.5-0-0	0.7-0.7-0.7-0.3	0.5-0.5-0-0	1-0.7-0.7-0.7	0-0-0-0	0.1-0.3-0.7-0.1	3.9	4.0	2.9	1.9
	b ₁₋₂₋₃₋₄	1-1-1-0.5	0.3-0.3-0.3-0.3	0.5-0.5-0.3-0.3	0.7-0.3-0.3-0.3	1-0-0-0	0.8-0.7-0.5-0.8	0-0-0-0.1	0.1-0.1-0.1-0.1	4.4	2.9	2.5	2.4
	c ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.7-0.7-0-0.5	0-0-0-0.1	0.1-0.3-0-0	1.6	1.8	0.4	1.0
	d ₁₋₂₋₃₋₄	0.5-0.5-0.1-0.1	0-0-0-0	0-0-0-0	0.3-0.3-0.3-0.3	0-0-0-0	0.8-0.7-0.7-0.7	0.1-0.1-0-0	0-0-0-0	1.7	1.6	1.1	1.1

Примечание: в начале столбца «суммарная оценка показателей» цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены индексы КОГБ наименьшего порядка

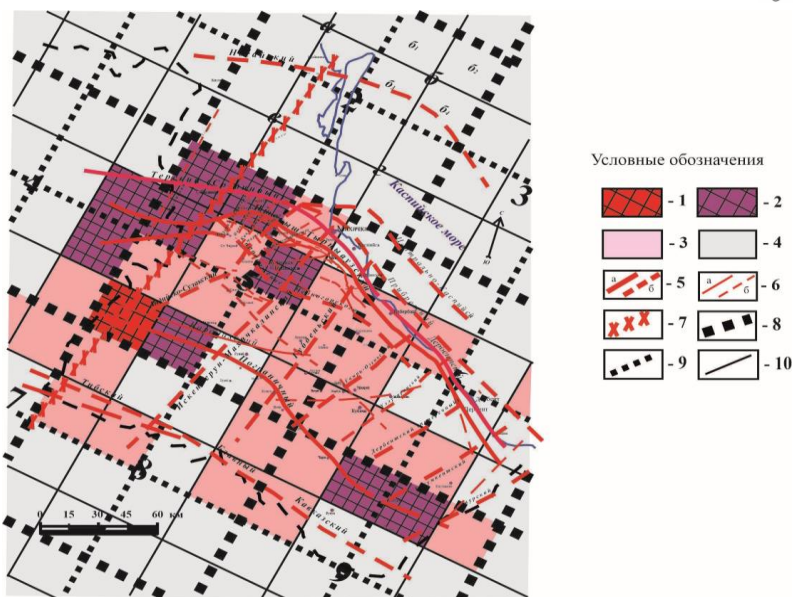


Рис. 1 Схема оценки потенциала геосейсмической опасности северо-восточного сегмента Восточного Кавказа.

1 – блок, имеющий максимальное значение потенциала геосейсмической опасности; 2 – зоны ВОЗ сильных землетрясений в исторической перспективе; 3 – блоки, имеющие критический (превышающий 50 % барьер) уровень потенциала геосейсмической опасности; 4 – прочие блоки, имеющие потенциал геосейсмической опасности ниже критического; 5 – глубинные разломы (а – достоверные, б – предполагаемые); 6 – разломы осадочного чехла (а – достоверные, б – предполагаемые); 7 – фрагмент Аграхано-Тбилиско-Левантийской левосдвиговой зоны 1-го порядка. Границы блоков местного порядка: 8 – первого (в середине блока - его номер), 9 – второго (в середине блока – его буквенное обозначение), 10 – третьего (наименьшего порядка, в середине блока – его буквенное обозначение с индексом).

Заключение

В результате проведенных исследований удалось закартировать в условных единицах потенциальный уровень геосейсмической опасности исследуемой территории, и приблизиться к составлению детальной карты зон ВОЗ. Установлено, что блоки с максимальными значениями уровня потенциала геосейсмической опасности пространственно совпадают с зонами ВОЗ, имеющими историческую активность и, приурочены к зоне пересечения субкавказских глубинных разломов с главным кавказским структурным элементом.

Проведенные исследования позволяют идентифицировать сейсмогенерирующие структуры и дать более детальную картину распределения зон ВОЗ в регионе. Выделенные зоны ВОЗ в уточненном варианте, могут послужить основанием для постановки дополнительных геофизических и геодеформационных наблюдений совместно с наблюдением за ГГД-полем в режиме мониторинга [6].

Метод оценки геосейсмической опасности рекомендуется для применения в других геодинамически активных регионах страны и мира.

Проведенные исследования позволят сделать обоснованный выбор объектов и методов эффективных управляющих воздействий на геологические системы с целью минимизировать негативные последствия от воздействия потенциальных катастрофических геологических процессов природного характера и обеспечат рациональное использование природных ресурсов в условиях повышенной геодинамической и сейсмической активности.

Список литературы

1. Арефьев С.С., Асманов О.А., Дейнега А.Г., Мусаев М.А., Шебалин Н.В. Количественные характеристики сейсмичности Дагестана // Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Сейсмология, геология, геофизика. М.: Наука, 1980. С. 10–17.
2. Гаврилов Ю.О. Отражение сейсмических палеособытий в мезозойско-кайнозойских терригенных толщах Северного Кавказа // Литология и полезные ископаемые. 2017, № I. С. 3–24.
3. Магомедов Р.А. Геодинамический потенциал блоков Восточного Кавказа // Геология и ресурсы Кавказа. Труды ИГ ДНЦ РАН. Выпуск № 3 (82). 2020. С. 54–61.
4. Магомедов Р.А. Следы палеосейсмических событий в разрезах осадочного чехла Восточного Кавказа // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. Седьмое Всероссийское совещание. 18–22 сентября 2017 г., Москва. Научные материалы / В.А. Захаров, М.А. Рогов, Е.В. Щепетова (ред.). Москва: ГИН РАН, 2017. С. 119–122.
5. Магомедов Р.А. Способ предсказания силы и места землетрясения. Пат. № 2163385 (Россия). БИ, 2001. № 5.
6. Магомедов Р.А. Концепция использования гидросейсмического мониторинга для прогноза землетрясений в области Дагестанского клина // Проблемы гидрогеологии XXI века: наука и образование. Материалы научной конференции, посвященной 50-летию кафедры гидрогеологии МГУ им. М.В. Ломоносова. – М.: Изд-во РУДН, 2003. – С. 444–454.
7. Мусаев М.А. Пространственно-временные вариации распределения сейсмичности на территории Дагестана с сопредельными территориями за 2006 – 2019 гг. // Тр. Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2020. № 1 (80). С. 70–76.
8. Шарафутдинов В.Ф. Геологическое строение и закономерности формирования палеогеновых олистостромовых толщ северо-восточного Кавказа. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. МГУ. Москва, 1991. 18 с.

УДК 502.37:504.064.2:504.4.054

СОЗДАНИЕ КИСЛОРОДНОГО БАРЬЕРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ РАСТВОРЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Н.Г. Максимович*¹, В.Т. Хмурчик¹, А.Д. Деменев¹, О.А. Березина¹

¹ООО «МИП «Геоинновация плюс», Пермь, Россия, E-mail: nmax54@gmail.com

Аннотация

Загрязнение природной среды нефтью и нефтепродуктами – острейшая экологическая проблема во многих регионах мира. Перспективное направление борьбы с нефтяным загрязнением – разрушение его биологическими методами. Для ликвидации загрязнения подземных вод возможно использовать автохтонную нефтеокисляющую микрофлору, жизнедеятельность которой активируют созданием повышенной концентрации водорастворенного кислорода – кислородного барьера. Полевые исследования показали возможность поддержания концентрации водорастворенного кислорода на уровне не ниже 5 мг/л при использовании специальных устройств (эмиттеров).

Ключевые слова: загрязнение, нефть и нефтепродукты, подземные воды, микроорганизмы, кислородный барьер

DEVELOPMENT OF AN OXYGEN BARRIER FOR GROUNDWATER CLEANING FROM DISSOLVED PETROLEUM PRODUCTS

N.G. Maksimovich*¹, V.T. Khmurchik¹, A.D. Demenev¹, O.A. Berezina¹

¹LLC «MIP «Geoinnovatsiya Plus», Perm, Russian Federation, E-mail: nmax54@gmail.com

Abstract

Pollution of the natural environment with oil and oil products is the most acute environmental problem in many regions of the world. A promising direction in the fight against oil pollution is its destruction by biological methods. To eliminate groundwater pollution, it is possible to use autochthonous oil-oxidizing microflora, the vital activity of which is activated by providing an increased concentration of water-dissolved oxygen – an oxygen barrier. Field studies have shown the possibility of maintaining the concentration of water-dissolved oxygen at a level above 5 mg/l using special devices (emitters).

Key Words: pollution, oil and oil-products, groundwater, microorganisms, oxygen barrier

Введение

Загрязнение природной среды нефтью и сопутствующими загрязнителями – острейшая экологическая проблема во многих регионах России и мира. Компоненты нефти воздействуют на сопредельные среды (растительный покров, поверхностные и грунтовые воды, животный мир), вследствие чего продукты трансформации нефти обнаруживаются в различных объектах биосферы [1; 4; 5]. Нефтяные углеводороды распространяются латерально и вниз по профилю грунта от источника загрязнения и, в отсутствие непроницаемых для них барьеров, достигают уровня грунтовых вод, где могут образовать нефтяную линзу над поверхностью воды в виде отдельной жидкой фазы; часть углеводородов может проникнуть в пористую структуру грунта, слагающего водоносный горизонт, и диспергироваться в нем в виде отдельных капель, размеры которых зависят как от силы межфазного натяжения, так и от размера пор грунта; часть углеводородов может раствориться в воде и мигрировать вместе с потоком грунтовых вод [4].

Усиливающееся загрязнение окружающей среды привело к развитию и совершенствованию методов борьбы с загрязнением нефтью и нефтепродуктами. Локализация и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов предусматривает выполнение многофункционального комплекса задач, реализацию различных методов и использование технических средств. Перспективным направлением предотвращения загрязнения нефтепродуктами является их биологическое разрушение. Все вещества биологического происхождения могут быть окислены, и в природе всегда найдутся микроорганизмы, способные их расщепить полностью или частично. Биологические методы разрушения углеводородов применяют в тех случаях, когда их количество слишком мало, чтобы применять механические средства сбора, а с другой стороны, слишком велико, чтобы использовать загрязненные земли и воду в хозяйственных целях. В основе биологических способов очистки нефтезагрязненных подземных вод и грунтов лежит использование микроорганизмов подземных вод и пород, способных к деградации углеводородов [3; 8; 9]. В основе биологических методов, использующих природную микрофлору, лежит принцип создания оптимальных условий для развития нефтеокисляющих микроорганизмов, которые в условиях нефтяного загрязнения ограничены низкой температурой, избыточной кислотностью, недостатком кислорода и биогенных элементов [2]. Для стимулирования окислительной активности микрофлоры нефтезагрязненных подземных вод применяют продувку вод сжатым воздухом или кислородом [6].

Целью нашего исследования являлась разработка технологии очистки подземных вод от нефтяного загрязнения, основанной на создании кислородного барьера на пути миграции водорастворенных нефтепродуктов, где активизация жизнедеятельности углеводородоокисляющей микрофлоры подземных вод будет способствовать очистке подземных

вод. Для создания кислородного барьера использовались «излучатели полевого усиления биodeградации (эмиттеры)» WaterlooTM (Solinst, Канада), работа которых основана на физическом законе диффузии Фика.

Методы исследований

Площадка для проведения опытных работ находилась на территории Пермского края. К числу природных особенностей исследуемого участка территории относятся неоднородный геолого-литологический состав пород (в верхней части разреза суглинки, в нижней – более проницаемые песчаные и гравийные отложения, подстилаемые выветрелыми коренными породами), анизотропия фильтрационных свойств водовмещающих пород, переход пористой среды в трещиноватую на относительно небольшой глубине, локальное присутствие напорных подземных вод. Участок проведения опытных работ находился непосредственно в зоне загрязнения подземных вод растворенными нефтепродуктами.

На площадке размещали профиль из 10 очистных скважин, расположенный перпендикулярно направлению разгрузки подземных вод с интервалом между скважинами 2 метра, которые оборудовали эмиттерами. На площадке размещали наблюдательные скважины на расстоянии 5 м до и после профиля очистных скважин.

В ходе исследований проводился систематический мониторинг, направленный на определение эффективности очистки подземных вод, а также на общую оценку условий на территории исследований. Осуществлялся контроль за следующими параметрами подземных вод: уровень, pH, TDS, температура и удельная электрическая проводимость, растворенные нефтепродукты, растворенный кислород, общий химический анализ.

Результаты и их обсуждение

Показатель содержания кислорода в исследуемых водах является одним из ключевых параметров при проведении мониторинга и при оценке работы системы создания кислородного барьера в целом. Так как при окислении нефтяных углеводородов кислород расходуется, то существует необходимость поддержания его концентрации на определенном уровне, необходимом для жизнедеятельности углеводородоксилирующих бактерий. Янига и соавт. (1985) показали необходимость поддержания в подземных водах концентрации водорастворенного кислорода на уровне 5-10 мг/л для деградации нефтяных углеводородов [10]. При содержании водорастворенного кислорода в воде ниже 5 мг/л аэробная деградация нефтепродуктов будет идти медленнее [7]. Поэтому в ходе проведения экспериментальных работ старались поддерживать концентрацию водорастворенного кислорода на уровне 5-10 мг/л. В табл. 1 приведены результаты определения содержания водорастворенного кислорода в подземных водах в одной из обрабатываемых скважин. В ходе мониторинга были выявлены периоды снижения и роста концентрации кислорода, что может быть вызвано температурными

колебаниями, разбавлением вод первого от поверхности горизонта атмосферными осадками, естественными особенностями технологического процесса подачи кислорода через систему эмиттеров. Среднее содержание растворенного кислорода в подземных водах в зоне очистки (т.е. во всех обрабатывающих скважинах) на протяжении эксперимента составило 28,55 мг/л., при этом степень очистки подземных вод от растворенных нефтепродуктов составила до 99,5%.

Табл. 1 Содержание водорастворенного кислорода в обрабатывающей скважине 3-о, мг/дм³.

№	Период исследований	Содержание кислорода, мг/дм ³
1	До начала исследований	1,0
2	На 10 сутки исследований	32,0
3	На 30 сутки исследований	41,0
4	На 45 сутки исследований	35,3
5	На 60 сутки исследований	23,9
6	На 75 сутки исследований	16,0
7	На 90 сутки исследований	12,2

Заключение

Проведенные исследования показали, что создание кислородного барьера может быть успешной использовано в технологиях очистки подземных вод от загрязнения нефтепродуктами биологическими методами. Для создания кислородного барьера и его поддержания в ходе очистных мероприятий могут быть использованы устройства, обеспечивающие постоянное насыщение в диффузионном режиме подземных вод кислородом до его содержания не менее 5 мг/л. Применение таких устройств на исследуемом участке позволило снизить содержание водорастворенных углеводов и добиться степени очистки вод до 99,5%.

Исследование выполнено при поддержке проекта Региональных исследовательских групп, 2023 (Министерство образования и науки Пермского края).

Список литературы

1. Давыдова С.Л., Тагасов В.И. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде / М.: Изд-во РУДН, 2004. 163 с.
2. Коронелли Т.В. Принципы и методы интенсификации биологического разрушения углеводов в окружающей среде // Прикладная биохимия и микробиология. 1996. Т. 32. № 6. С. 579-585.
3. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Биотехнологии в инженерной геологии // Инженерная геология. 2014. № 3. С. 18-25.
4. Соколов Э.М., Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю. Формирование нефтяного загрязнения сульфатного массива в карстовых районах и методы его ликвидации // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. № 2. С. 79-89.

5. Фашук Д.Я., Овсиенко С.Н., Леонов А.В. и др. Геоэкологические последствия аварийных разливов нефти // Изв РАН. Сер. геогр. 2003. № 5. С. 135-150.
6. Baker P.W., Futamata H., Harayama S., Watanabe K. Bacterial populations occurring in a trichloroethylene-contaminated aquifer during methane injection // Environmental Microbiology. 2001. Vol. 3 (3). pp. 187-193.
7. Chiang C.Y., Salanitro J.P., Chai E.Y., Colthart J.D., Klein C.L. Aerobic biodegradation of benzene, toluene, and xylene in a sandy aquifer – data analysis and computer modeling // Ground Water. 1989. Vol. 27 (6). pp. 823-834.
8. Maksimovich N., Meshcheriakova O., Khmurchik V. Bacterial processes in oil-polluted karst environments in Perm region (Russian Federation). In: IAEG/AEG Annual meeting proceedings (Shakoor A., Cato K., Eds) / San Francisco, 2018. Vol. 3. pp. 103-107.
9. McNabb J.F., Dunlap W.J. Subsurface biological activity in relation to ground-water pollution // Ground Water. 1975. Vol. 13 (1). pp. 33-44.
10. Yaniga P.M., Matson C., Demko D.J. Restoration of water quality in a multi-aquifer system via in situ biodegradation of the organic contaminants // Proc. 5th Natl. Symp. Exp. on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, National Water Well Association / Worthington, 1985. 510 p.

УДК 550.34.013.4: 550.34.013.2

РАСЧЁТ ЗАКАЧКИ РАССОЛОВ В МНОГОЛЕТНЕ-МЁРЗЛЫЕ ПОРОДЫ НА УЧАСТКЕ ЛЕВОБЕРЕЖНЫЙ С УЧЕТОМ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

И.А. Расторгуев^{*1,2}, И.В. Литвинова², Н.А. Иост², И.А. Хилько²

¹НИИЦ «Курчатовский Институт», Москва, пл. Курчатова, д.1, stiar@mail.ru

²АК «Алроса», Новосибирск, Советская, д.5, LitvinovaIV@alrosa.ru

Аннотация

В работе рассматривается модель закачки рассолов в многолетние мерзлотные породы на опытном участке Левобережный в районе города Удачный в Якутии. Для расчёта используется модуль FreezeThaw75, разработанный применительно к модельной среде Feflow v7.4-7.5. В модели одновременно учитываются движение потока подземных вод, тепломассоперенос и фазовые переходы. Большие объёмы закачиваемых высокоминерализованных рассолов способствуют протаиванию мерзлоты.

Ключевые слова: Далдыно-Алакитский район, фильтрационная модель, тепломассоперенос, многолетняя мерзлота, высокоминерализованные рассолы

CALCULATION OF BRINE INJECTION INTO PERMAFROST ROCK MASS AT THE LEVOBEREZHZNY SITE TAKING INTO ACCOUNT TEMPLOMASS TRANSFER

I.A. Rastorguev^{*1,2}, I.V. Litvinova², N.A. Iost², I.A. Khilko²

¹Kurchatov Institute, Moscow, Kurchatov Square, 1, stiar@mai.ru

²AK «Alrosa», Novosibirsk, Sovetskaya, 5, LitvinovaIV@alrosa.ru

Abstract

The paper considers a model of brine injection into permafrost rock mass at the Levoberezhny experimental site not far from the city Udachny in Yakutia. The FreezeThaw75 module was developed by one of the authors in Feflow 7.4-7.5 model environment and used for calculations. The model simultaneously takes into account the movement of groundwater flow, heat, mass transport and changes in phase. The mineralization of the injected brines makes possible to thaw permafrost and inject large volumes of brines into a number of injection wells.

Key Words: Daldyn-Alakit district, groundwater flow model, heat and mass transport, permafrost, highly mineralized brines

Введение

Отработка глубоких горизонтов алмазных месторождений в Западной Якутии связана с поступлением хлоридных (кальциевых или натриевых) рассолов в открытые и подземные горные выработки. Район работ находится вблизи кимберлитовой трубки «Удачная», отрабатываемой подземным способом и территориально относится к Мирнинскому району Республики Саха (Якутия). Участок закачки дренажных и шахтных вод «Левобережный», расположен северо-восточнее г. Удачный, на левом берегу реки Далдын между ручьями Улахан-Бысыттах и Орто-Бысыттах.

Более 35 лет осуществляется закачка дренажных рассолов в толщу многолетнемерзлых пород (ММП), обладающих высокими поглощающими способностями, особенно на участках, приуроченных к зонам тектонических нарушений (участки Октябрьский, Киенгский). В настоящее время для удаления дренажных рассолов в криогенные структуры используется участок «Левобережный» [1]. Процесс закачки дренажных вод приводит к высвобождению дополнительного объема пустотности и образованию техногенного водоносного горизонта. Происходит увеличение емкостных показателей пород и их фильтрационной проницаемости. Для модельного обоснования закачки рассолов применялись два подхода. Первый, наиболее простой, основан только на фильтрационной модели с параметрами, полученными по результатам мониторинга на объекте. Второй, более сложный предполагает совместное использование модели геофильтрации и тепло-массо-переноса с фазовыми переходами.

Методы построения фильтрационных моделей на участке «Левобережный»

Подход, основанный на использовании только фильтрационных моделей, применялся специалистами ОАО «ВИОГЕМ», ООО НТЦ «НОВОТЭК», институтом «Якутнипроалмаз» и авторами данной статьи.

В данном подходе использовались:

- завышенные фильтрационные и емкостные параметры пород на участках в зоне закачки, заданные не изменяемыми во времени;
- вне области закачки указанные параметры задавались в несколько раз меньше.

Опыт построения фильтрационных моделей на основе различного программного обеспечения показал следующее. Эксплуатация участка закачки «Левобережный» с 2022 года ограничена 1,7 года (без учета перетока закачиваемых рассолов из ММП в верхнекембрийский водоносный комплекс - ВВК) и более 5 лет с перетоком в ВВК. ОАО «ВИОГЕМ» и ООО НТЦ «НОВОТЭК» применяли для расчётов ПО Modflow/GMS. Калибровка выполнялась для стационарных условий, на дату самых последних замеров. В 2021-2023 годах авторами для расчётов применялось ПО FEFLOW. Калибровка выполнялась в нестационарных условиях. Использование чисто фильтрационных расчётов показало, что невозможно хорошо

откалибровать уровенный режим и спрогнозировать переполнение участка закачки, т.к. не учитывается миграция рассолов, мерзлоты и увеличение фильтрационных и емкостных свойств.

Модель тепломассопереноса для участка закачки

Второй подход при моделировании применялся авторами и заключался в применении расчётов с учетом тепломассопереноса (ТМП) и фазовых переходов лед-вода и вода-лед. При расчёте использовался модуль FreezeThaw75, разработанный одним из авторов под Feflow 7.4-7.5 на C++. Модуль находится в состоянии разработки и постоянно обновляется.

В отличие от фильтрационного подхода применительно к ТМП были заданы изменения проницаемости, пористости, льдистости и параметров теплопроводности из-за изменения свойств мерзлоты (растворение льдистой составляющей). Данная модель реализована с учетом перетока закачиваемых рассолов из ММП в ВВК.

Моделирование закачки рассолов

В соответствии с зональностью фильтрационных свойств ММП (Рис. 1, 2) в разрезе и необходимостью учета ВВК толща пород на модели разделена на две части - верхняя ММП и нижняя отвечает ВВК. Начальный уровень свободной поверхности +165 м. По границам заданы непроницаемые граничные условия. Влияние ручьев и инфильтрации на образующийся техногенный водоносный горизонт не учитываются, т.к. на участке закачки отсутствуют сквозные талики.

Объем закачанных рассолов составил почти 22 млн. м³. Заданы расходы в соответствии с режимом закачки по западному ряду скважин № (13-12з) и восточному ряду №(13з-18з) на 10-летний период с мая 2013 г. Температура рассолов задавалась постоянной -5 С°. Концентрация закачиваемого рассола до 350 г/л. Фоновая концентрация рассолов в ВВК 100 г/л. Фоновая температура массива ММП -2 С°. Для минимизации численной дисперсии модельные слои были раздроблены по вертикали.

В процессе моделирования выполнялась калибровка параметров. Проводилось сопоставление фактических и расчётных уровней. Сопоставление фактических и расчётных уровней по моделям фильтрации и ТМП показано на рис. 3. Отмечается более качественное совпадение фактических и расчётных уровней для модели с применением ТМП. Далее этот подход применялся для оценки оставшейся емкости после закачки и был проведен расчёт эксплуатации участка закачки. Результаты расчёта показаны на рис. 4.

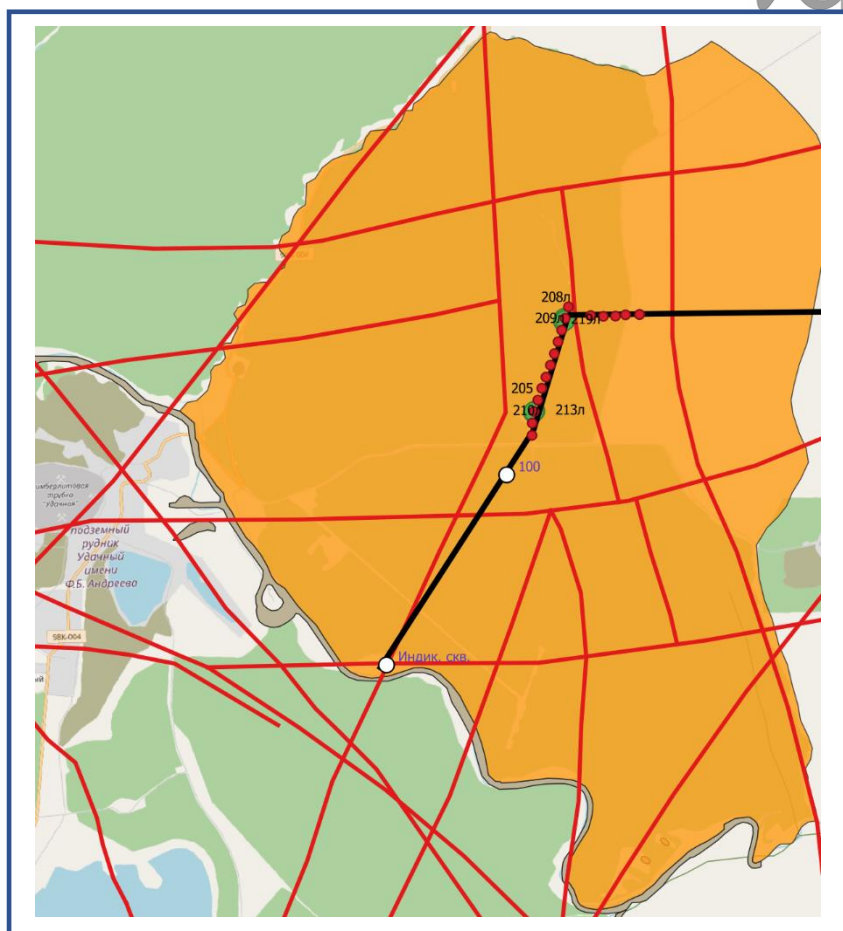


Рис. 1 Схема расположения объекта моделирования с системой разломов (красные линии). Скважины закачки показаны красными кружками, наблюдательные зелеными. Линия разреза показана черным цветом.

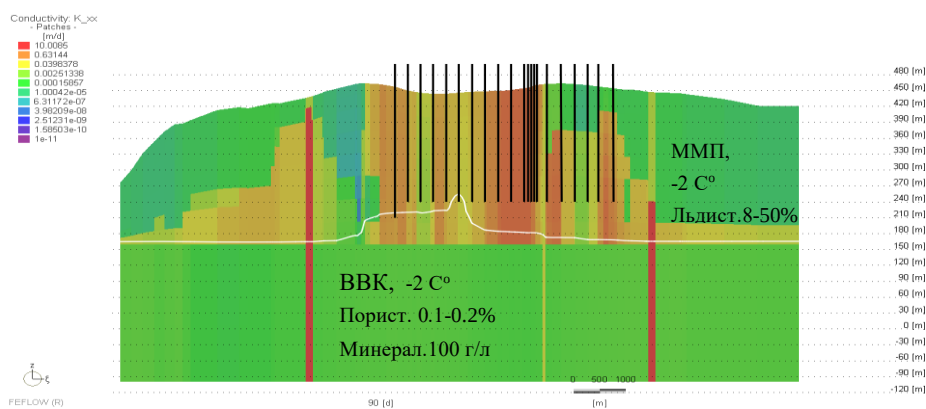


Рис. 2 Схема разреза. Слева южная часть модели, справа – восточная. Черным показаны скважины, белой линией – кривая репрессии, заливкой – коэффициент фильтрации через 3 месяца после начала закачки.

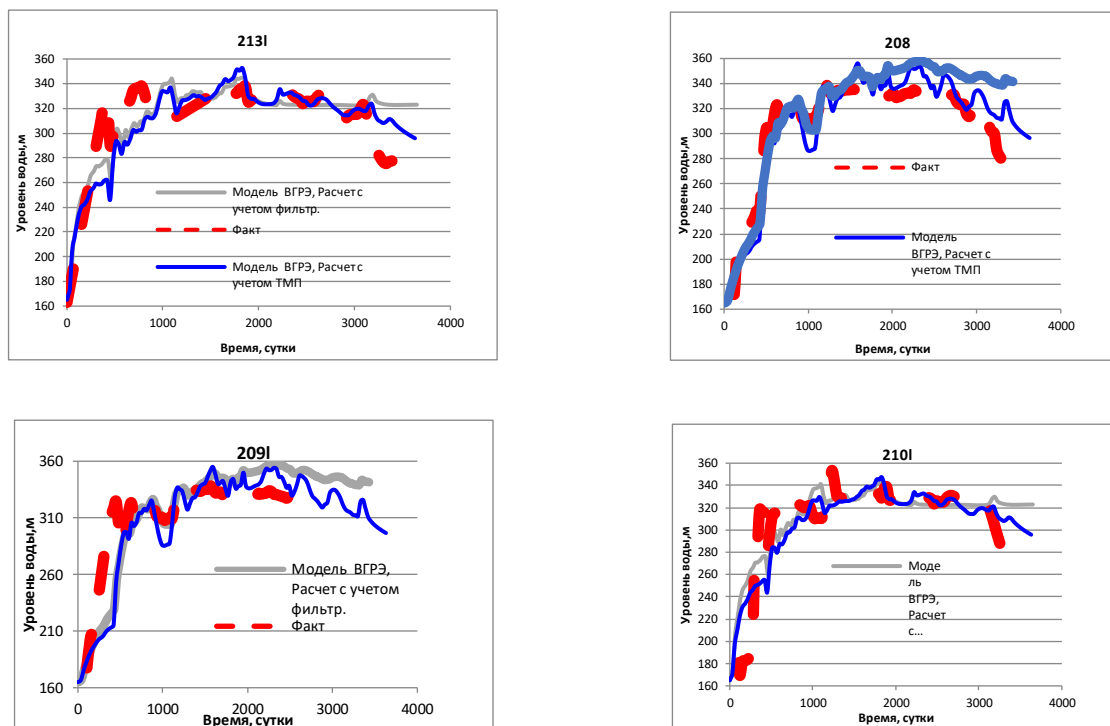


Рис. 3 Сопоставление фактических и расчётных уровней по ближайшим к закачным скважинам пьезометрам №№ 208, 209, 210, 213.

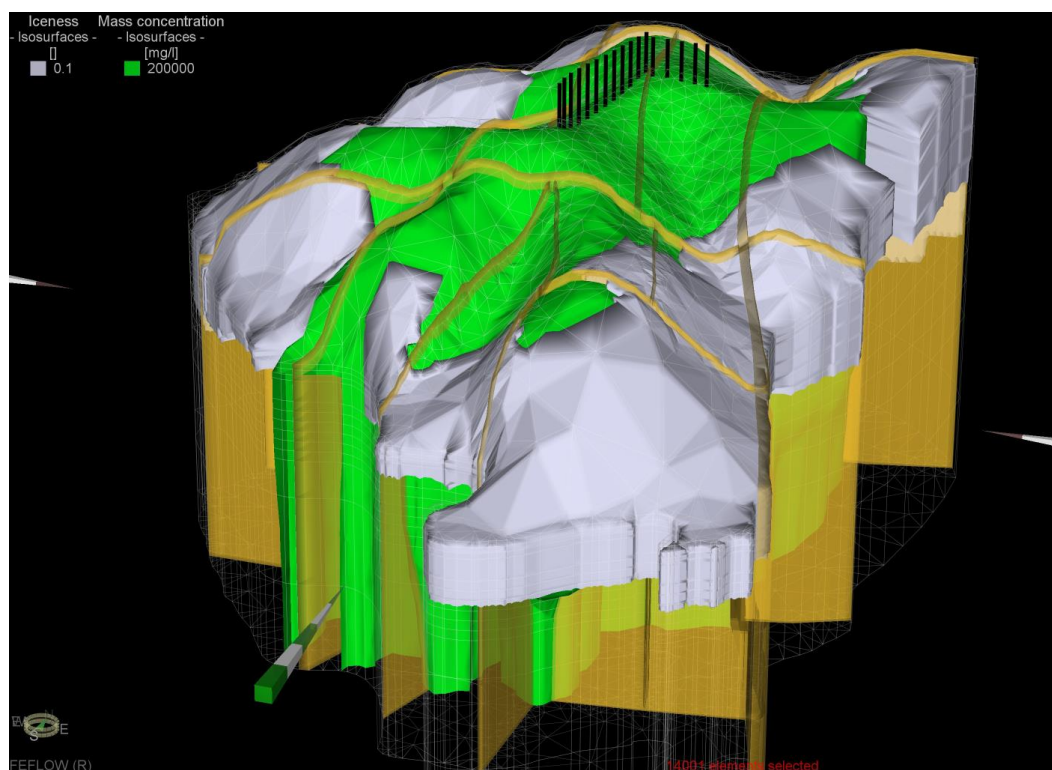


Рис. 4 Результаты расчёта закачки в течение 2013-2022 гг. Желтым показаны разломы, зеленым- ореол минерализации 200г/л, белым показана не размороженная часть.

Заключение

На основании анализа предыдущих работ по построению численных моделей построена адекватная модель ТМП с учетом изменения характеристик толщи ММП за счет обводнения закачиваемыми рассолами с отрицательной температурой, растворяющими льдистую составляющую разреза (создание техногенного водоносного горизонта в ММП) и миграции рассолов на участке. Проведенные расчеты с учетом тепломассопереноса показывают текущее заполнение участка с прогнозными рекомендациями дальнейшей эксплуатации участка.

Проведенные расчёты, а также новые подходы с использованием тепломассопереноса и фазовых переходов к применяемому в настоящее время моделированию процесса закачки дренажных вод, изложенные в рамках данной статьи, позволяют повысить прогнозный потенциал эксплуатируемых участков закачки, а также могут выступать в качестве дополнительного элемента контроля за процессом закачки и развитием техногенного водоносного горизонта в толще ММП.

Список литературы

1. Дроздов А.В. Оценка перспективности участка «Левобережный» для захоронения дренажных рассолов трубки «Удачной» // Изв. Сиб. отд. Секции наук о Земле РАЕН. 2013. № 1 (42). С. 146-156.

УДК 504.06

ПОСТМАЙНИНГ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ: ОТ ОЦЕНКИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ К МЕТОДАМ РЕАБИЛИТАЦИИ

Л.С. Рыбникова*¹, П.А. Рыбников²

¹Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, E-mail: luserib@mail.ru

²Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия, E-mail: ribnikoff@yandex.ru

Аннотация

Большое количество месторождений полезных ископаемых к настоящему времени исчерпали свои запасы. Согласно законодательству, на их территории необходимо проведение рекультивационных мероприятий. Однако существуют проблемы, которые даже при попытке применения наилучших доступных технологий не позволяют достичь поставленной цели. В частности, это относится к месторождениям, породы которых содержат сульфидные минералы, где формирование кислых шахтных вод продолжается десятки и сотни лет, в том числе после завершения отработки на этапе постмайнинга. Многочисленные описания таких объектов можно найти и в мире, и в России, и на Урале.

Территория отработанного Левихинского медноколчеданного месторождения многие годы является одним из наиболее экологически неблагополучных объектов Свердловской области. Несмотря на очистку кислых шахтных вод (разгрузка их на поверхность началась в 2007 г.) показатели ПДК по металлам в р. Левихе превышены в десятки тысяч раз. Причиной этого является совокупное проявление природных (фоновые превышения ПДК), техногенно-индуцированных (разгрузка шахтных вод в зоне обрушения) и техногенных (несовершенство технологии очистки) процессов. Для ранжирования вклада многочисленных техногенных объектов в формирование экологической обстановки был реализован комплекс работ, включающий полевое опробование; создание моделей (геофильтрационных и термодинамических); оценку балансовых составляющих и прогноз их изменения при реализации мероприятий; определение вклада объектов в загрязнение; оценка влияния сезонности и водности периода. На основе анализа наилучших доступных технологий выполнено технико-экономическое обоснование рекомендуемых мероприятий.

Ключевые слова: кислые шахтные воды, водоотлив, отработка, затопление, накопленный вред.

POST-MINING OF COPPER PYRITE DEPOSITS: FROM HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS TO REHABILITATION

L.S. Rybnikova*¹, P.A. Rybnikov²

¹*Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation, E-mail: luserib@mail.ru*

²*Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation, E-mail: ribnikoff@yandex.ru*

Abstract

A large number of mineral deposits have now exhausted their reserves. According to the legislation, it is necessary to carry out reclamation measures on their territory. However, there are problems that even when trying to use the best available technologies do not lead to achieving the goal. In particular, this applies to deposits whose rocks contain sulfide minerals, where the formation of acid mine waters continues for tens and hundreds of years, including after the completion of mining at the post-mining stage. Numerous descriptions of such objects can be found in the world, in Russia, and in the Urals.

The territory of the dormant Levikha copper pyrite deposit has been one of the most environmentally unfavorable objects of the Sverdlovsk region for many years. Despite the purification of acid mine waters (coming to the surface in 2007), the MPC indicators for metals in the Levikha river are exceeded tens of thousands of times. The reason for this is the combined manifestation of natural (background exceedances of MPC), technogenic-induced (unloading of mine waters in the collapse zone) and technogenic (imperfection of purification technology) processes. To rank the contribution of numerous technogenic objects to the formation of the ecological situation, a complex of works was implemented, including field testing; creation of models (iltration and thermodynamic); assessment of balance components and forecast of their changes during the implementation of measures; determination of the contribution of objects to pollution; assessment of the influence of seasonality and water content of the period. Based on the analysis of the best available technologies, a feasibility study of the recommended measures was carried out.

Key Words: acid mine water, drainage, mining, flooding, accumulated damage.

Введение

Несмотря на то, что отработанные месторождения твердых полезных ископаемых являются значимым источником загрязнения окружающей среды, широко распространенном во всем мире [9; 10], как правило они не исследуются с точки зрения сложной экосистемы горнопромышленной территории, развивающейся в течение десятков и сотен лет. Последствия активного преобразования окружающей среды в ходе эксплуатации месторождений проявляются в изменении базиса дренирования водосборов и условий питания-разгрузки подземных и поверхностных вод, формировании техногенного ландшафта, изменении стока рек,

появлении возвышенностей (отвалов), техногенных озер (шламонакопителей, отстойников, прудов-осветлителей). На этапе постмайнинга негативные процессы зачастую усугубляются, в результате прекращения водоотлива появляются участки подтопления, затопленные карьеры, провалы, образуются техногенные родники (зоны сосредоточенной разгрузки шахтных вод). В процесс загрязнения гидросферы наиболее значимый вклад вносят месторождения, в которых имеются сульфидсодержащие породы [1; 2].

Такие территории представляют собой объекты накопленного вреда окружающей среде¹. В Пермском крае после ликвидации шахт Кизеловского угольного бассейна сформировалась 18 техногенных родников с кислыми водами, произошло загрязнение 500 км рек, которое достигло Камского водохранилища [8]. Капитальные затраты на строительство очистных сооружений на основных объектах составят более 10 млрд руб., ежегодные эксплуатационные будут не менее 2,5 млрд руб².

В Свердловской области представителями таких объектов являются несколько десятков отработанных медноколчеданных месторождений³, на некоторых из них (это Левихинское, Ломовское, Карпушихинское, Белореченское, Дегтярское) уже 25 лет за счет средств областного бюджета организуется сбор и нейтрализация кислых шахтных вод, при этом далеко не всегда достигается целевой показатель очистки: соответствие показателей химического состава сбрасываемых в гидросеть очищенных вод требованиям нормативных документов.

Наиболее сложной является территория отработанного Левихинского рудника, здесь отмечается очень сложная экологическая ситуация, которая привлекает внимание общественности и контролирующих органов. Для решения этих проблем Институт горного дела УрО РАН в 2020–2021 гг. по поручению Министерства природных ресурсов Свердловской области выполнял работы «Проведение оценки современного гидрогеоэкологического состояния компонентов окружающей среды и разработки рекомендаций по минимизации негативного воздействия на гидросферу в районе расположения отработанного Левихинского рудника».

Целью работ являлось формирование модели природно-техногенной экосистемы для выбора наилучших доступных технологий реабилитации горнопромышленной территории.

Для этого был решен комплекс задач, включающих: оценку современной экологической, гидродинамической, гидрогеохимической ситуации на площади водосбора, в пределах которого расположены отработанные карьеры, шахты, провалы, отвалы, пруд-осветлитель; оценка

¹ Накопленный вред окружающей среде - вред окружающей среде, возникший в результате прошлой экономической и иной деятельности, обязанности по устранению которого не были выполнены либо были выполнены не в полном объеме (ст. 3 федерального закона "Об охране окружающей среды" от 10 января 2002 года N 7-ФЗ).

² Около 500 км рек выведено из водопользования — на их дне скопились миллионы тонн осадка. <https://www.newsko.ru/articles/nk-6274374.html>.

³ В период отработки с начала 1960-х гг. выполнялась нейтрализация и осветление шахтных вод.

процессов формирования шахтных и подотвальных вод; выявление и ранжирование источников загрязнения гидросферы и основных факторов, определяющих развитие негативных процессов; прогноз изменения состояния подземных и поверхностных вод при реализации возможных сценариев; технико-экономическое обоснование методов реабилитации района.

Методы исследований

Полевые работы выполнялись с августа 2020 по ноябрь 2021 гг. и включали: измерения на 14 гидрологических створах (120 замеров); гидрохимическое опробование 27 водных объектов (80 проб); отбор проб пород отвала (12 проб) и донных отложений (6 проб); буровые и опытно-фильтрационные работы (7 скважин).

Аналитические исследования выполнялись для определения химического состава вод; пород отвала; шлама, накопленного в пруду-осветлителе за 60 лет эксплуатации.

Геофильтрационное и геомиграционное моделирование позволило оценить балансовые составляющие формирования водных объектов территории и дать прогноз их изменения при реализации реабилитационных мероприятий. Термодинамическое моделирование использовалось для определения форм миграции элементов в воде и индексов насыщения ее по отношению к минералам.

Литературный и патентный поиск был направлен на выявление наилучших доступных технологий, использующихся в процессе реабилитации горнопромышленных территорий для очистки кислых вод, рекультивации отвалов, складирования шламов.

Результаты и их обсуждения

Состав вод техногенных объектов сульфатный железо-алюминиевый, природных объектов хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый. Значения минерализации варьируют от 0,04–0,2 г/л (фоновые значения в притоках р. Тагил) до 10 (зона разгрузки шахтных вод) – 52 г/л (подотвальные воды в межень). Водородный показатель изменяется от 2,3–2,8 ед. – кислые (шахтные и подотвальные воды) до 12,3 ед. – щелочные воды (шахтные воды после нейтрализации), В фоновых створах воды нейтральные с рН 6,6–8,1.

Окислительно-восстановительный потенциал для кислых вод превышает 500 mV, после нейтрализации снижается до -280 mV; в фоновых створах варьирует от -15 до 150 mV. В замыкающем створе частного водосбора р. Тагил (пн. 28) перед впадением в Леновский пруд (один из источников водоснабжения г. Нижний Тагил, население 350 тыс. чел.) минерализация 0,2 г/л, состав воды гидрокарбонатно-сульфатный магниевый-кальциевый.

Кратность превышения ПДК⁴ для водоемов рыбохозяйственного значения здесь составляют 74 для марганца, 35 для меди и цинка, 17 для алюминия, 3 для железа⁵.

Степень деградации горнопромышленной территории определяется влиянием водосбора, на котором расположен отработанный и затопленный Левихинский рудник. Несмотря на то, что кислые шахтные воды нейтрализуются и отстаиваются в пруду-осветлителе, эффективность такой очистки не превышает 90% для железа и составляет всего 30-40% для марганца и цинка. Концентрации компонентов в р. устье Левихи при сбросе в р. Тагил превышают ПДК в тысячи раз для цинка (до 17200), меди (до 16700), железа (до 9760), марганца (до 6900).

Для развернутого анализа существующей ситуации и оценки последствий развития различных сценариев ее изменения была создана численная гидрогеомиграционная модель объекта. Проведенные методами математического моделирования исследования позволили уточнить поле емкостных и фильтрационных параметров, водно-балансовые составляющие района в различные моменты его освоения.

На модели был воспроизведен процесс затопления подземных выработок и заполнения депрессионной воронки в течение трех лет, модель откалибрована по расходу излива шахтных вод и уровням подземных вод в процессе затопления.

Для оценки эффективности реализуемых мероприятий по сбору и нейтрализации шахтных вод было проведено решение прогнозных миграционных задач. Установлено, что после прекращения откачки из зоны разгрузки фронт загрязнения достигает реки Тагил за 5 лет, минерализация подземных вод в долине р. Тагил составит 1–2 г/л, достигая в зонах тектонических нарушений 7 г/л. В случае продолжения работы существующей системы загрязнение локализуется в пределах зон обрушения (минерализация до 15 г/л) и долины реки Левихи (минерализация подземных вод <1 г/л).

В настоящее время неблагоприятную гидрогеоэкологическую обстановку в районе определяют техногенный водоем (зона разгрузки кислых шахтных вод) и пруд-осветлитель. Разгрузка подотвальных, подземных вод и затопленных карьеров играет подчиненную роль.

Основные технические мероприятия могут быть разбиты на 3 группы (Табл. 1): А - повышение степени очистки сбрасываемых в речную сеть вод; Б) снижение объемов воды, подаваемой на очистку; В) реабилитация территории и снижение влияния накопленного вреда окружающей среде. Наиболее эффективным и быстро реализуемым является включение в

⁴ Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: утверждены приказом Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. № 552 с изм. на 10 марта 2020 г. М.: ВНИРО, 2011. 257 с.

⁵ В фоновых створах зафиксированы превышения ПДК для марганца (до 17 раз), железа и меди (до 9 раз), алюминия и ванадия (до 2 раз).

существующую активную систему этапа пассивной очистки в виде каскада прудов ниже пруда-осветлителя (их параметры рассчитывались с использованием [7]). Основной недостаток этого варианта – необходимость отчуждения достаточно больших площадей лесного фонда (~ 60 га). Использование современных технологий очистки с применением аэротенков и радиальных отстойников позволит довести степень очистки до требований ПДК [4]. Модернизация существующей станции нейтрализации нецелесообразна, поскольку не обеспечит необходимую степень очистки. Значимый эколого-экономический эффект при небольших затратах могут дать мероприятия, направленные на снижение объемов очищаемой воды: рекультивация отвала (прекращение формирования кислых подотвальных вод [3]) и отвод потока чистых подземных вод, поступающих в зону обрушения со стороны водораздела. Реализация последнего варианта позволяет дополнительно решить вопрос с обеспечением станции нейтрализации необходимым количеством воды для приготовления известкового молока (в настоящее время используется вода из городского водопровода, что не является рациональным [5]).

Табл. 1 Техничко-экономическое обоснование реабилитационных мероприятий.

№№ пп	Мероприятие		Затраты, тыс. руб.				Степень очистки (вк)**	Рейтинг
	Код группы	Содержание	К	Э	Σ	на 1%*		
1	А	Пассивная очистка	281 385	0	14 069	35	100 (1)	I
2		Организация современной системы	259 443	5 220	18 192	45		II
3		Модернизация используемой системы	32 800	64 280	65 920	439	90 (2)	УII
4	Б	Рекультивация отвала	54 459	0	2 723	272	65 (5)	IУ
5		Сбор подотвальных вод	6 700	3 220	3 555	356		У
6		Отвод стока верховьев р. Левихи	21 700	0	1 085	109		III
7		Перехват подземных вод	10 000	3 220	3 720	372		УI
8	В	Рекультивация пруда-осветлителя	823 355	0	41 168	-	-	-
9		Очистка пруда от шлама ленточного фильтр	205 000	5 220	15 470	-	-	-

Примечание. А – повышение степени очистки кислых вод; Б - снижение объема очистки; В – ликвидация накопленного вреда окружающей среде; К – капитальные; Э – эксплуатационные; Σ - ежегодные в среднем за 20 лет; *удельные затраты с учетом весового коэффициента на 1% повышения степени очистки; ** в настоящее время степень очистки 60%; вк – весовой коэффициент, учитывающий повышение степени очистки.

Заключение

Установлены источники, процессы и факторы формирования неблагоприятной гидрогеоэкологической ситуации в районе отработанного Левихинского медноколчеданного рудника. С использованием моделирования определены составляющие водного баланса и проведено их ранжирование. Выполнено технико-экономическое обоснование реабилитационных мероприятий, которые могут выполняться в различных сочетаниях в зависимости от этапности и доступного финансирования работ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2. Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002) г. р. № 123012300006-0 и за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20140, <https://rscf.ru/project/22-27-20140/>.

Список литературы

1. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Шепель К.В. Оценка возможности использования отходов железо-магниевого производства для очистки сточных вод от тяжелых металлов (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+}) // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 257-265. DOI: 10.31897/PMI.2023.34
2. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) / Геохимия. - 2019. - Т. 64. - № 3. - С. 282-299. (L. S. Rybnikova and P. A. Rybnikov. Regularities in the Evolution of Groundwater Quality at Abandoned Copper Sulfide Mines at the Levikha Ore Field, Central Urals, Russia. *Geochemistry International*, 2019, Vol. 57, No. 3, pp. 298–313).
3. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Галин А.Н. Исследование закономерностей формирования состава подотвальных вод медноколчеданного месторождения (Средний Урал) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 2. С. 165-176.
4. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Снижение негативного влияния законсервированного медноколчеданного рудника Урала на состояние гидросферы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. - № 3. - С. 194-201. DOI: 10.15372/FTPRPI20220318. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Navolokina V.Yu. Reducing Negative Impacts of Dormant Pyrite Copper Ore Mine on the Geosphere in the Urals. *Journal of Mining Science*, 2022, Vol. 58, No. 3, pp. 519–525.
5. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Шапочкин Р.А. Обоснование альтернативных источников водоснабжения в горно-добывающих районах с высокой техногенной нагрузкой (на примере поселка Левиха Свердловской области) // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2023. № 2. С. 74-86
6. Chiang W.H., Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN / New York: Springer Berlin Heidelberg, 2001. 346 p.
7. PIRAMID Consortium. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine / industrial drainage" (PIRAMID). University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne UK. 2003. 166 c.

8. Pyankov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A., Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K. Monitoring acid mine drainage's effects on surface water in the Kizel coal basin with Sentinel-2 satellite images. *Mine Water and the Environment*. 2021. Т. 40. № 3. С. 606-621.
9. Wolkersdorfer C *Mine Water Treatment – Active and Passive Methods*. Springer Berlin, Heidelberg: 2022. 328 с. DOI: 10.1007/978-3-662-65770-6
10. Younger P.L. The longevity of minewater pollution – a basis for decision-making. *Sci Total Environ*. 1997. 194–195. 457–466. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(96\)05383-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(96)05383-1)

УДК 556.3

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД
К РАСЧЕТУ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ****Н.Е. Сизов*¹, А.В. Расторгуев²**¹*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,**E-mail: wwwwwwwww@list.ru*²*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: alvr9@mail.ru***Аннотация**

Современный подход к расчету и проектированию зон санитарной охраны (ЗСО) водозаборов подземных вод были сформулированы еще в 80-е годы прошлого века во ВНИИ ВОДГЕО вместе с кафедрой коммунальной гигиены Московской медицинской академии им. Сеченова. В настоящей работе дан краткий обзор на существующие методы проектирования ЗСО с их достоинствами и недостатками как теоретическими, так и производственными, а также описано решение, позволяющее убрать значительное количество недостатков самых распространенных методик по проектированию поясов санитарной охраны.

Ключевые слова: численно-аналитическое моделирование, зоны санитарной охраны, миграция, конвективный перенос, вероятностное моделирование

**PROBABILISTIC NUMERICAL-ANALYTICAL APPROACH
TO CALCULATION OF SANITARY PROTECTION ZONES****N.E. Sizov*¹, A.V. Rastorguev²**¹*Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: wwwwwwwww@list.ru*²*Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: alvr9@mail.ru***Abstract**

The modern approach to calculating and designing sanitary protection zones (SPZs) for groundwater intakes was formulated in the 1980s at the VNIIVODGEO Institute together with the Department of Communal Hygiene at the Sechenov Moscow Medical Academy. This paper provides a brief overview of existing SPZ design methods, their advantages and disadvantages both in theory and practice, and describes a solution that addresses many shortcomings of the most common methods for designing SPZs.

Key Words: numerical-analytical modeling, sanitary protection zones, migration, advective transport, probabilistic simulation

Введение

Необходимость установления зон санитарной охраны (далее по тексту ЗСО) вокруг источника водоснабжения обусловлено действием СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения» [3]. В соответствии с данным документом ЗСО устанавливаются в количестве трех поясов: физическая защита водозабора, бактериологическая и химическая. Данные зоны являются зонами с особыми условиями использования территорий и вносятся в ЕГРН.

В подавляющем большинстве случаев расчет ЗСО осуществляется в соответствии с рекомендациями [2]. Контроль за соответствием проекта ЗСО рекомендациям, а также согласование отклонений от рекомендаций осуществляется местными органами санитарно-эпидемиологического контроля.

Методы исследований

В общем случае расчет ЗСО подземного источника водоснабжения может осуществляться следующими методами:

Табл. 1 Методы расчет ЗСО с достоинствами и недостатками.

Методы	Достоинства	Недостатки
Аналитические	Требуют ограниченного количества фактических данных. Умеренная стоимость.	Могут применяться только для одиночных скважин и линейных водозаборов в однородных пластах
Численно-аналитические	Требуют ограниченного количества фактических данных. Учитывают интерференцию скважин и произвольное направление потока. Умеренная стоимость.	Применимы только для однородных водоносных горизонтов.
Численные	Позволяют учитывать сложные гидрогеологические условия.	Требуют большого количества фактических данных и опытности специалистов. Высокая стоимость.

Наиболее простыми в использовании являются аналитические методы, реализованные на основе аналитического интегрирования скоростей фильтрации, полученных из зависимостей, описывающих фильтрацию к водозаборах подземных вод. Применимость ограничена конфигурацией водозабора, направлением потока подземных вод (относительно водоема) и однородностью фильтрационных параметров. В результате зоны получаются в виде простых

фигур, завышающих реальные размеры ЗСО, однако аналитические методы все равно остаются наиболее распространенными на практике из-за своей простоты и дешевизны.

Численно-аналитические методы также основаны на скоростях движения подземных вод, полученных из аналитических решений, однако интегрирование проводится не аналитически, а численно, что позволяет убрать ограничения по конфигурации водозаборов и их количеству, а также позволяет задавать произвольное направление потока подземных вод. При этом ограничения по однородности фильтрационных параметров остаются в силе.

Численные методы актуальны для случаев со сложным геологическим строением: фильтрационная неоднородность, сложная конфигурация внешних или внутренних границ и т.д. Численные методы сложны в реализации и требуют очень большого количества фактического материала, а потому дороги и редко используются.

С точки зрения авторов работы, на данный момент для рядового водозабора наиболее актуальными являются численно-аналитические методы, поскольку результаты расчетов не захватывают лишние области, как в случае с аналитическими методами, и нет необходимости в сложной модели и большом количестве фактического материала, как в случае с численными методами. Однако тут также возникает проблема фактических данных: для аналитических расчетов каждый расчетный параметр представляет собой одно число, тогда как очевидно, что:

- параметры, характеризующие модель (коэффициент фильтрации, направление потока, пористость и т.д.) всегда лежат в определенном диапазоне, а не являются единственным точным значением;
- значения этих параметров в лучшем случае характеризуют относительно небольшую область, в худшем – точку или несколько точек, что в результате также дает определенный диапазон для использования в расчетах.

В таком случае возможно использование вероятностных методов (группа методов Монте-Карло) [1], суть которых в нашем случае в следующем: в пределах диапазона каждого из параметров задается распределение этого параметра (реализовано случайное, нормальное, логнормальное и равномерное), в результате получается n -ое количество наборов параметров с заданным распределением. По каждому из наборов считается численно-аналитическая модель, то есть получается n моделей, результаты которых суммируются и переводятся в вероятностную шкалу.

Для моделирования, на языке python с использованием значительного количества статистических и математических библиотек было разработано программное обеспечение, включающее модуль распределения, расчётный модуль и модуль визуализации. ПО позволяет задавать произвольную область моделирования, параметры, количество и дебиты скважин, так же позволяет выбирать тип распределения параметров, срок миграции и т.д.

На примере: задан водозабор из трех скважин со следующими параметрами модели:

Табл. 2 Параметры модели.

Параметр	Значение
Коэффициент фильтрации, м/сут	5,0 – 20,0
Уклон потока	0,001 – 0,01
Направление потока, градус	270 – 330
Пористость	0,2 – 0,4
Мощность, м	5,0 – 10,0
Производительность одной скважины, м ³ /сут	62,8
Количество наборов параметров, шт	100

Расчет размеров ЗСО при моделировании осуществлялся через фиксирование факта дохода фронта миграции в блок модели через 200 суток (для 2 пояса ЗСО). Результаты представлены ниже:

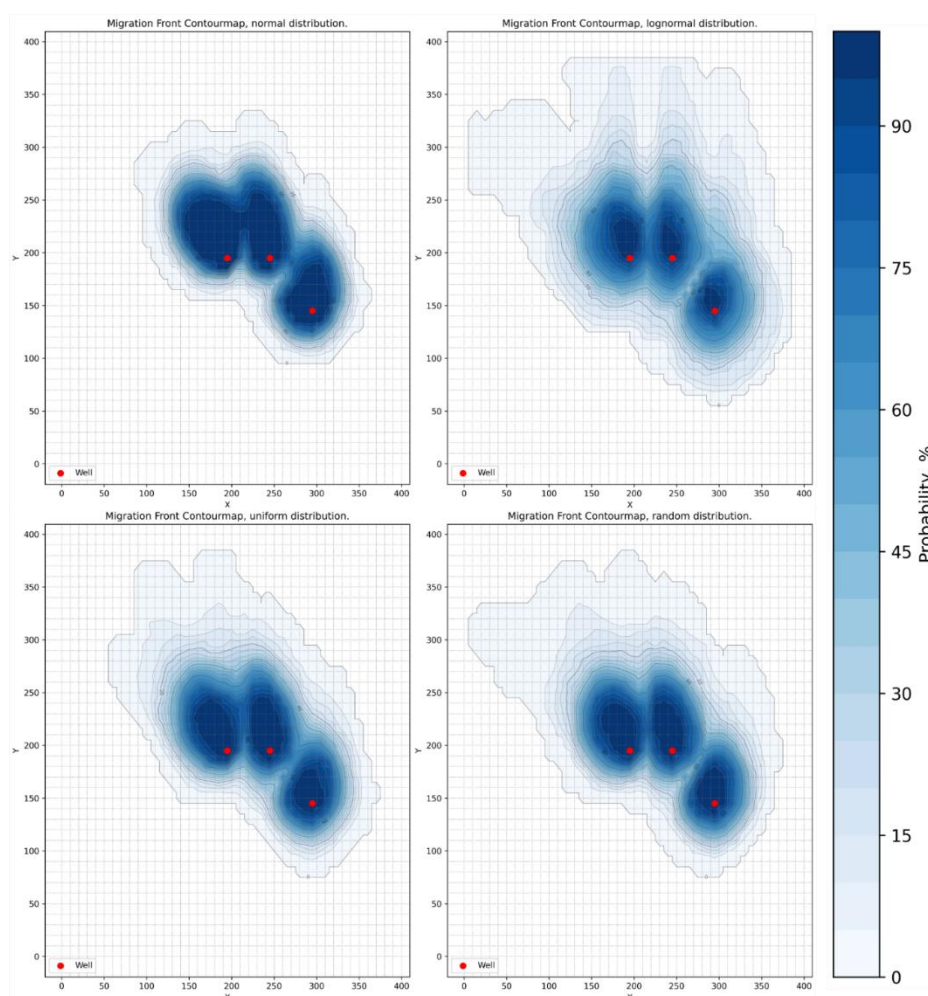


Рис. 1 Результаты вероятностного численно-аналитического расчета второго пояса ЗСО. Нормальное, логнормальное, равномерное и случайное распределения параметров.

Выводы и заключение

1. С минимальным размером доступных фактических данных возможно использовать как аналитические методы, так и численно-аналитические;
2. Повсеместно используемые аналитические методы имеют большее количество ограничений, чем численно-аналитические при этом достоверность аналитических методов, по сравнению с вероятностными численно-аналитическими ниже, а потенциальные издержки недропользователя – выше;
3. Разработанное ПО позволяет оперативно рассчитать радиусы миграции в целом и ЗСО в частности для однородного пласта и планового потока со значительной достоверностью и с минимальными потерями для недропользователя.

Список литературы

1. Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. и др. «Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ 2 и 3 поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения» / М., ВНИИ «ВОДГЕО», 1983 г. 103 с.
2. Соболев И.М. «Численные методы Монте-Карло» / М. Из-во «Наука», 1973 г. 313 с.
3. СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения»

УДК 556

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ТЕРРИТОРИИ
БАЙКАЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА****Я.В. Сорокоумова*¹, А.В. Расторгуев²**¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: yana1992@gmail.com²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: alvr9@mail.ru**Аннотация**

Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат был предметом научных дискуссий многие десятилетия, результатом его эксплуатации явилось значительное загрязнение подземных вод, которые разгружались в озеро Байкал. Для защиты озера от загрязнения 20 лет назад был организован перехватывающий водозабор, сооружены наблюдательные скважины; тем не менее, спустя 10 лет, комбинат и перехватывающий водозабор прекратили действовать, однако мониторинг, хоть и с меньшей регулярностью, проводится до сих пор.

На основе обобщения материалов мониторинга показателей состава подземных вод, их температуры и положения уровенной поверхности была разработана и откалибрована геомиграционная модель, воссоздающая развитие и трансформацию температурного поля и ореола растворенных контаминантов в подземных водах первого от поверхности водоносного горизонта, разгружающегося, в основном, в озеро Байкал. Были установлены основные источники поступления растворенных минеральных веществ и нефтепродуктов в подземные воды. В процессе калибровки моделей тепло и массопереноса было выявлено существенное различие параметров термодисперсивности и дисперсивности, что обусловлено, по-видимому, различной природой процессов, приводящих к распространению теплового потока и потока растворенных веществ.

Ключевые слова: тепломассоперенос, дисперсивность, ореол загрязнения подземных вод, озеро Байкал

**SIMULATION OF HEAT AND MASS TRANSFER ON THE BAIKALSK
PULP AND PAPER MILL SITE****Y.V. Sorokoumova*¹, A.V. Rastorguev²**¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: yana1992@gmail.com²Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: alvr9@mail.ru

Abstract

The Baikalsk pulp and paper mill has been a subject of environmental scientists' work for many years. Its exploitation is resulted in huge volume of waste waters partly infiltrated to groundwater and to Lake Baikal even after its closure in 2013. That is why a lot of environmental protection actions such as contaminant migration reducing and surface and groundwater quality monitoring actions are provided till nowadays.

Heat and mass transfer model was build up and calibrated according to groundwater quality monitoring data. The primary heat and mass groundwater contaminant sources location was determined. Model calibration process resulted in significant difference in heat and mass transfer dispersivity parameters, what may be explained in essential difference in physical phenomena of heat and mass transfer generalized as disperesivity parameter.

Key Words: heat and mass transfer, dispersivity, groundwater contamination plume, Lake Baikal

Введение

Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК), функционировал в период с 1966 по 2013 г. Несмотря на то, что комбинат не эксплуатируется практически 10 лет, негативные экологические последствия от деятельности БЦБК существуют до сих пор, что представляет интерес для исследований. Так как комбинат расположен непосредственно на берегу Байкала – крупнейшего озера в мире, являющегося уникальной экосистемой и объектом всемирного наследия, остро стоит вопрос об очистке и восстановлении прилегающих территорий. Целью настоящего исследования была разработка модели геомиграции для последующих расчетов сценариев реабилитации территории.

Характеристика объекта исследования

Объектом исследования является территория Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК), построенного в Слюдянском районе Иркутской области. В сентябре 2013 года предприятие было остановлено, однако никаких процедур по остановке на длительный срок и консервации не проводилось.

Изучаемый участок относится к юго-западному побережью озера Байкал, поверхность имеет слабый наклон в сторону уреза воды. На территории распространен мощный (до 500 м) грунтовый водоносный горизонт, вмещающими породами которого, в основном, являются гравийно-галечниковые отложения с песчаным, супесчаным и реже суглинистым заполнением; глубина до воды, по данным измерений, меняется, преимущественно от 1 до 30 м, естественный поток подземных вод направлен в сторону озера.

Тепловое и химическое загрязнение подземных вод на территории комбината фиксируется с конца 80-х годов прошлого века. Данные опробования подземных вод,

проведенного в 2000-х годах, показывают существенное превышение минерализации подземных вод в районе расположения главного корпуса предприятия – 10250 мг/л, при фоновых значениях около 200 мг/л. Также было зафиксировано высокоградиентное температурное поле подземных вод – от 28°C в скважине около главного корпуса до 9°C в скважине в 300 м ниже по потоку подземных вод. В ходе последних изысканий, проведенных в 2022 году, установлено повышенное значение минерализации – 4604 мг/л; также отмечено повышение температуры подземных вод в пределах территории предприятия – до 16,7°C, при 6,2°C вне зоны влияния.

Моделирование геомиграции

Расчеты фильтрации подземных вод проводились в стационарной и нестационарной постановке на трехмерной численной модели. Моделируемая область (1938×1543 м) была разбита неравномерной сеткой 118×83 блоков, с размерами блоков от 240×200 м – в крайних частях модели, до 5×5 м – на участках расположения перехватывающих скважин. По вертикали моделируемая область была разбита на 6 слоев, соответствующие верхним 100 м разреза, что, согласно исследованиям 2000-х годов, включает наиболее проницаемую сорокаметровую толщу разреза, а также превышает глубину зафиксированного проникновения загрязнения в водоносную толщу (70 м).

На западной границе, согласно материалам изысканий 2000-х годов, был задан градиент потока подземных вод равный 0,003 (условие второго рода). На восточной границе, приуроченной к берегу озера Байкал, была задана абсолютная отметка уровня 455,73 м, по данным гидрометрического поста Порт Байкал на 12.08.2022. Северная и южная границы непроницаемые, проведены по линиям тока подземных вод.

Коэффициент фильтрации был принят равным 34 м/сут, в соответствии с ранее разработанной моделью [1], прошедшей калибровку по опыту эксплуатации дренажа.

Инфильтрационное питание в пределах расчетной области было принято равным 0,0003 м/сут (15% от атмосферных осадков). Повышенное инфильтрационное питание задавалось на участках предполагаемого (на основе материалов предыдущих исследований) дополнительного техногенного питания за счет существенных утечек с территории предприятия. По результатам калибровки модели, в районе карты №11, в которую идет сброс сточных вод с территории предприятия, инфильтрационное питание составило 0,1 м/сут, на участке между главным корпусом БЦБК и зданием ТЭЦ (где в 2000 году было зафиксировано наличие куполообразного возвышения поверхности грунтовых вод, а также наиболее значительное увеличение минерализации) – 0,13 м/сут.

Для прогноза миграции загрязняющих веществ были определены основные источники поступления загрязнения. Первый источник определен по результатам единовременных

измерений уровней грунтовых вод в 2001 году, которые показали наличие куполообразного строения поверхности грунтовых вод между главным корпусом и зданием ТЭЦ, что свидетельствует об интенсивности техногенной инфильтрации. Второй источник был определен на северо-западе моделируемой области, выше по потоку грунтовых вод от главного корпуса предприятия, где расположена карта №11, в которую осуществляются сбросы с ТЭЦ, по данным измерений в существовавшей тогда около неё скважине 48, температура воды достигала 43°C, что свидетельствует о масштабном тепловом загрязнении подземных вод (при фоновом значении температуры 8°C).

Расчеты геофильтрации проводились для периода с 2002 по 2022 года, в нестационарной постановке. Это было необходимо для учета работы перехватывающего водозабора, действующего с переменным расходом на территории комбината более 20 лет. На Рис. 1, в качестве примера, приведен график изменения расхода откачиваемой воды из одной из скважин водозабора.

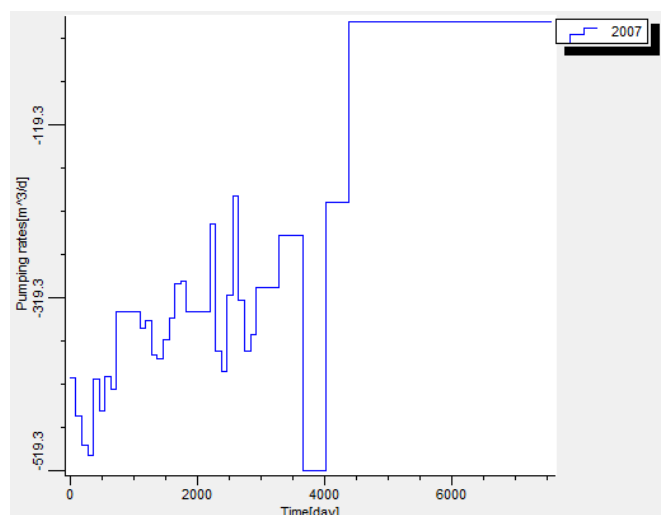


Рис. 1 График расхода воды ($\text{м}^3/\text{сут}$) откачиваемой из скважины 2007.

При решении обратной задачи была подобрана величина гравитационной водоотдачи, которая оказалась равной 0,25. Оценка массопереноса проводилась по условно консервативному показателю – минерализации. Фоновая минерализация, поступающая со стороны берега, принималась равной 200 мг/л. Минерализация в местах утечек варьировалась от 400 до 800 мг/л (карта №11) и от 1000 до 10000 мг/л (участок между главным корпусом и ТЭЦ). Активная пористость была принята равной 0,2, продольная дисперсивность варьировалась от 0,1 до 100 м. Поперечная дисперсивность в горизонтальном направлении принималась на порядок меньше продольной. Поперечная дисперсивность в вертикальном направлении принималась на 2 порядка меньше продольной. В качестве начального условия в верхних пяти слоях модели (верхние 60 м) принималась минерализация по данным мониторинга на 2002 г. В нижнем 6 слое (от 60 до 100 м) принималась фоновая минерализация.

Расчеты теплопереноса проводились на основе модели адвективной теплопроводности. Скорости фильтрации подземных вод оценивались на основе геофильтрационного моделирования, выполненного с помощью кода MODFLOW [2]. Расчеты теплопереноса проводились с помощью кода MT3DMS [3], входящего в пакет Visual Modflow [4]. Программа MT3DMS ориентирована на решении задач переноса вещества. Для решения теплопереноса в модели массопереноса молекулярная диффузия была заменена на:

$$D = \frac{K}{n\rho_f C_f} \quad (1)$$

$$K = nK_f + (1 - n)K_s \quad (2)$$

где K_f и K_s – теплопроводности воды и породы, принятые 0,58 и 2,9 Вт/м/град – соответственно, ρ_f и C_f – плотность и теплоемкость воды, равны 1000 кг/м³ и 4186 Дж/кг/град, n – пористость.

Для теплообмена вода-порода коэффициент сорбционного распределения был задан равным:

$$k_d = \frac{C_s}{\rho_f C_f} \quad (3)$$

где C_s – теплоемкость породы, принята равной 800 Дж/кг/град.

Фоновая температура принималась равной 8°C. Температура в местах утечек варьировалась от 15°C до 25°C (карта №11) и от 8°C до 15°C (участок между главным корпусом и ТЭЦ). Активная пористость была принята равной 0,2, продольная термодисперсивность варьировалась от 5 до 25 м. Поперечная термодисперсивность в горизонтальном направлении принималась в 4-10 раз меньше продольной. Поперечная термодисперсивность в вертикальном направлении принималась на 1 порядок менее продольной. В качестве начального условия в верхних пяти слоях модели (верхние 60 м) принималась температура по данным мониторинга на 2002 г. В нижнем – 6 слое (от 60 до 100 м) принималась фоновая температура 8°C.

Результаты исследования и их обсуждение

Количественная оценка сопоставления результатов расчетов с фактическими данными производилась путем сравнения значений среднеквадратических ошибок (RMS). Решение фильтрационной задачи на 2022 год показало достаточную сходимость с массивом данных единовременных замеров уровней, проведенных в августе 2022 года.

Проведенные вариантные расчеты при различных значениях параметра продольной дисперсивности показали максимальное совпадение фактических и модельных выходных

кривых (графиков временного прослеживания) минерализации для скважин водозабора при значении дисперсивности – 10 м. Модельный ореол по минерализации достаточно близко совпадает с ореолом по минерализации, полученным по данным изысканий 2022 года (Рис. 2).

Проведенные варианты расчеты показали максимальное совпадение фактических и модельных выходных кривых (графиков временного прослеживания) температур для скважин водозабора при значении термодисперсивности – 125 м. Модельный температурный ореол достаточно близко совпадает с ореолом, полученным по данным изысканий 2022 года (Рис. 3).

В ходе анализа результатов калибровки модели по параметру дисперсивности, можно сделать вывод, что наилучшая сходимость модельных расчетов с наблюдаемыми значениями достигается при различных значениях дисперсивности. Для модели массопереноса – 10 м, для модели теплопереноса 125 м. Такая существенная разница в значениях параметра может быть обусловлена различной физической природой процессов, суммарное действие которых отражается модельным параметром дисперсивности.

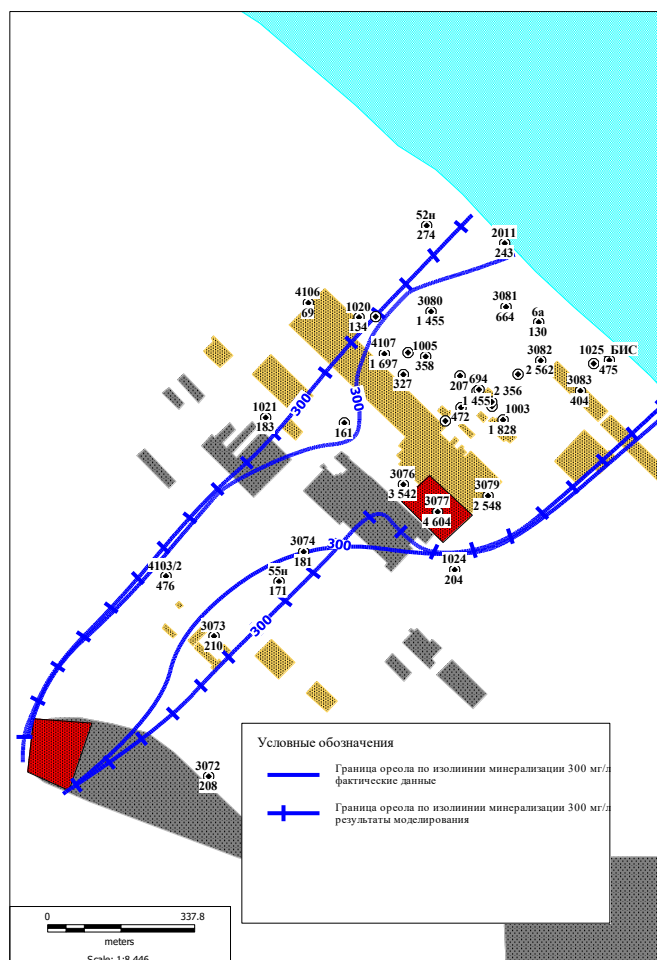


Рис. 2 Сопоставление модельного распределения минерализации и ореола, построенного по данным опробования скважин.

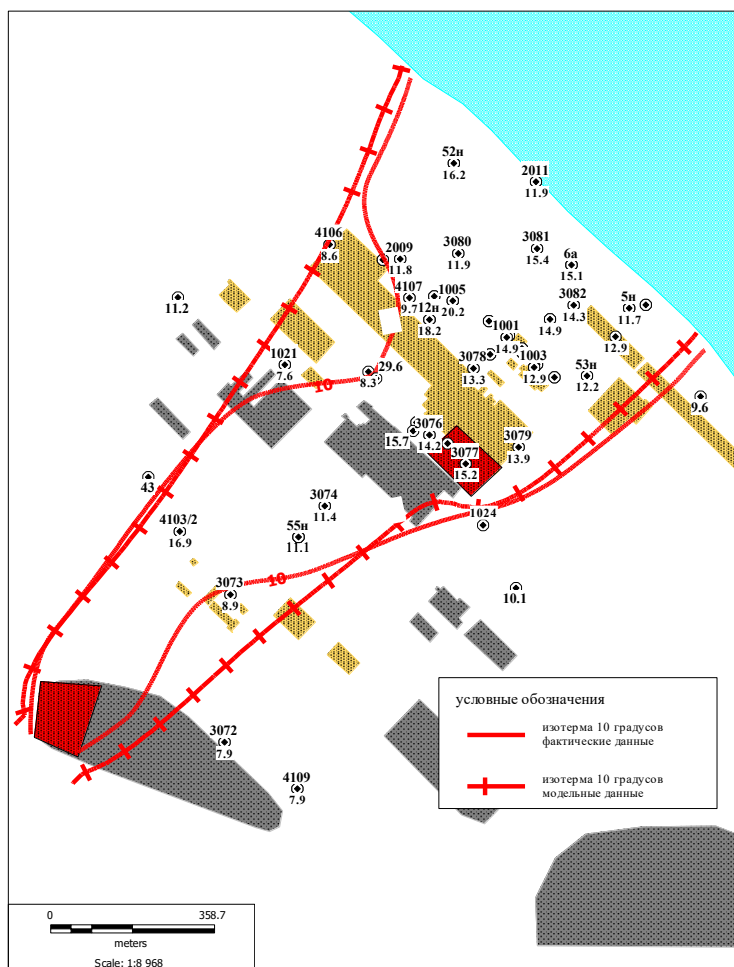


Рис. 3 Сопоставление модельного температурного поля и ореола, построенного по данным замеров температуры в скважинах.

Заключение

Разработана геомиграционная модель территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината в среде Visual Modflow. Проведен анализ температурного поля подземных вод и его изменения во времени, на основании которого выделены границы ореола теплового загрязнения.

Геофильтрационная модель достаточно достоверно соответствует фактическим материалам по уровням грунтовых вод – нормализованная ошибка около 10%.

Геомиграционные расчеты показали приемлемое совпадение фактических и модельных ореолов по химическому (по параметру минерализации) и термальному загрязнению. Сложная картина реального распределения химического загрязнения по территории предприятия обусловлена наличием значительного количества источников поступления контаминантов в природную среду, различных по составу, направленности, интенсивности и периода воздействия. Загрязнение от них поступает в подземные воды как напрямую, растворенное с инфильтрующимися атмосферными осадками и техногенными утечками, а также путем

вторичного вымывания уже сорбированных в обменный комплекс пород загрязнителей. Соответственно, для более точного восстановления картины загрязнения на территории предприятия необходимо более детальное изучение истории и локализации источников загрязнения, помимо этого, для обоснования всех миграционных параметров требуются дополнительные специальные исследования на объекте, результаты которых помогут уточнить модельные расчеты распространения уже существующего загрязнения с территории предприятия, а также позволят разработать комплекс мероприятий по реабилитации территории.

Калибровка модели по параметрам дисперсивности показала, что, в случае теплопереноса, значение этого параметра на порядок больше, чем в случае массопереноса. Что можно объяснить различной физической природой и направленностью процессов, результат воздействия которых выражается в модельном параметре – дисперсивность.

Список литературы

1. Расторгуев А.В., Куранов П.Н. Обоснование защиты озера Байкал от загрязнения подземными водами. Сборник трудов конференции «Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики». СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002
2. McDonald, M. C. and A. W. Harbaugh, 1988. MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, U. S. Geological Survey, Open-file report 83-875.
3. Chunmiao Zheng and P. Patrick Wang. MT3DMS: A modular three dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. – University of Alabama, 1999
4. Веб-сайт программы Visual Modflow: <https://www.waterloohydrogeologic.com/2018/03/02/retiring-visual-modflow-classic>.

УДК 556

МИКРОПЛАСТИК В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Е.А. Филимонова^{*1}, А.Е. Преображенская¹, Л.О. Гутникова¹, А.В. Чистякова^{1,2},
Е.С. Казак^{1,3}, А.А. Маслов¹, Р.В. Веселовский^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; кафедра гидрогеологии, E-mail: ea.filimonova@yandex.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, E-mail: direction@ifz.ru

³ООО «Фарватер», Москва, Россия, E-mail: Kanigu@mail.ru

Аннотация

Рост производства пластиковых изделий, большая часть (около 54 %) которых является товарами одноразового использования, отсутствие эффективного управления пластиковыми отходами привели к глобальной проблеме загрязнения полимерами окружающей среды. Частицы микропластика (МП размером < 5 мм) и нанопластика (НП размером < 100 нм) обнаружены во всех средах: воздушной, водной, почвенной и даже в живых организмах [1; 2; 3; 5]. Большинство работ направлено на исследование микропластика в поверхностных водах, однако частицы МП и НП обнаружены и в подземных водах. Частицы полимеров выявлены в незащищенных водоносных горизонтах (ВГ), например, в аллювиальных ВГ (Виктория, Австралия; Калуга, РФ; Потchefструм, ЮАР; Шираз, Иран) и карстовых ВГ (Звенигород, РФ; Иллинойс, США) [4; 6; 7]. В терригенном водоносном горизонте Андреевского месторождения выявлены полимеры различной формы: микрогранулы, микроволокна, фрагменты и пленки, которые указывают на загрязнение подземных вод как первичным, так и вторичным микропластиком. Визуальная характеристика проводилась с помощью оптического микроскопа Olympus BX53M, химический состав полимеров определялся на рамановском спектрометре EnSpectr 532.

Ключевые слова: микропластик, микроволокна, загрязнение подземных вод, рамановская спектроскопия, идентификация микропластика

MICROPLASTICS IN GROUNDWATER: FIRST RESEARCHING IN RUSSIA

E.A. Filimonova^{*1}, A.E. Preobrazhenskaya¹, L.O. Gutnikova¹, A.V. Chistyakova^{1,2}, E.S. Kazak^{1,3}, A.A. Maslov¹, R.V. Veselovskiy^{1,2}

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: ea.filimonova@yandex.ru

Abstract

The growing production of plastic products, the majority (about 54 %) of which are single-use goods, and the lack of effective plastic waste management have led to the global problem of environmental pollution by polymers. Micro- (< 5 mm) and nano-sized (< 100 nm) plastic particles (MP and NP, respectively) are found in all environments: air, water, soil, and even in living organisms [1; 2; 3; 5]. The majority of researches are focused on microplastics in surface waters, but MP and NP particles have been detected also in groundwater. Polymer particles have been revealed in shallow aquifers, for example, in alluvial aquifers (Victoria, Australia; Kaluga, RF; Potchefstroom, South Africa; Shiraz, Iran) and karst aquifers (Zvenigorod, RF; Illinois, USA) [4; 6; 7]. Polymers of different shapes: microgranules, microfibers, fragments and films were detected in the terrigenous aquifer of the Andreevskoye field, which indicate groundwater contamination by both primary and secondary microplastics. Visual characterization was carried out using an Olympus BX53M light microscope, the chemical composition of the polymers was determined using an EnSpectr 532 Raman spectrometer.

Key Words: microplastics, microfibers, groundwater contamination, Raman spectroscopy, microplastic identification

Введение

В настоящее время пластмассовые изделия прочно вошли в жизнь каждого человека. Причина заключается в их свойствах: биоинертность, прочность, износостойкость, легкость; а также относительная дешевизна, легкость производства и обработки пластмасс [2]. Срок службы пластиковых изделий варьирует от нескольких минут для одноразовой посуды до десятков лет для материалов, используемых в строительстве, при этом упаковочный материал составляет 54 % пластиковых отходов. Длительное время естественной деградации, сложность и дороговизна вторичной переработки привели к накоплению огромного количества бытовых и промышленных пластиковых отходов.

Микропластик (частицы пластмассы < 5 мм) объединяет достаточно широкую группу полимеров различного химического состава, размера, формы, цвета и свойств. По происхождению выделяется первичный и вторичный МП. Первичные полимеры представляют собой микрогранулы, специально изготовленные для использования в косметических, лекарственных и моющих средствах, или пеллеты, используемые для производства более крупных изделий [1; 2; 3]. Частицы первичного МП и НП в исходном виде попадают в окружающую среду со сточными водами или через очистные сооружения, так как

размер гранул не позволяет их отфильтровать. Вторичные МП и НП образуются при распаде крупных полимерных продуктов: истирания шин, разрушении дорожного покрытия, дефрагментации пластикового мусора, при стирке, производстве синтетических тканей.

Исследование посвящено изучению частиц микропластика в донных отложениях р. Оки, подземных и речных водах участка Андреевского месторождения подземных вод, расположенного в 12 км к югу от г. Калуги. Исследуется совмещенный аллювиально-нижнетульский водоносный комплекс, который является целевым горизонтом для водоснабжения г. Калуги. Водовмещающими отложениями представлены разнотельными песками мощностью 56 м. Напорно-безнапорный комплекс перекрыт современными аллювиальными суглинками мощностью 10-12 м. Усредненный уровень подземных вод в меженные периоды находится на отметке 120 м.

Методы исследований

Методика изучения МП включает три этапа: отбор пробы, экстракция полимерных частиц и их идентификация. На Андреевском месторождении подземных вод были отобраны проба из донных отложений, из поверхностных вод реки и проба из подземных вод совмещенного аллювиально-нижнетульского водоносного комплекса. Проба речной воды отбиралась методом фильтрации через сетчатый фильтр с размером ячейки 75 мкм. Отбор пробы из подземных вод осуществлялся с помощью фильтрационной установки, используемой при микробиологических исследованиях. Донные отложения отбирались металлическим совком в стеклянную банку. Этап извлечения МП проводился по методике NOAA, модифицированной для анализа полимерных частиц в поверхностных водах [8], и включал следующие основные подэтапы: пероксидное окисление, плотностное разделение, сушка. На этапе идентификации проводилась визуальная характеристика частиц с помощью оптического микроскопа Olympus BX53M, тип полимеров определялся на рамановском спектрометре EnSpectr 532.

Результаты и их обсуждения

Каждый фильтр был сфотографирован на микроскопе Olympus BX53 и из 25×26 кадров были составлены в программе CorelDraw карты фильтров. Анализ карты фильтра позволил разделить все частицы на минеральные частицы и потенциальные полимерные частицы. Последние по форме классифицированы на волокна, фрагменты и микрогранулы. Результаты визуальной идентификации представлены в табл.1.

Первичный микропластик, представленный микрогранулами, выявлен в речных водах и донных отложениях в количестве 1 и 7 % от общего содержания полимеров. В подземных водах присутствует только вторичный микропластик. Соотношение микроволокон и фрагментов (61 % и 38-39 % соответственно) в подземных и поверхностных водах идентично, в донных отношениях фрагменты преобладают, составляя 54 %. Волокна легко переносятся течениями

и медленно оседают, поэтому в донных отложениях в большем количестве накапливаются фрагменты. В абсолютном отношении самая высокая концентрация частиц МП установлена в донных отложениях, в которых накапливаются «тяжелые» полимерные частицы. Донные отложения могут впоследствии стать вторичным источником микро- и нанопластика.

Табл. 1 Результаты визуального анализа карты фильтров.

	Подземные воды	Речные воды	Донные отложения
Минеральные частицы + соли	46	50	786
Микрогранулы	-	3	34
Фрагменты	72	97	269
Микроволокно	112	153	192
Всего микропластика	184	253	495
Концентрация, шт/л,	2,3	2,7	-
Концентрация, шт/м ³ , шт/кг (для донных)	2300	2700	4950

Идентификация химического состава полимеров проводилась только для пробы из подземных вод, поскольку основная цель исследования заключается в изучении МП в подземных водах (Рис. 1). В результате обработки спектров в программе EnSpectr выделено несколько типов полимеров: нейлон (53 %), сульфат/карбоксиметил-целлюлоза (11 %), полиуретан (6 %), полифенилен (3 %). Значительная часть частиц (27 %) не подлежит идентификации из-за высокой степени деградации частицы, но визуально определяются как полимерные частицы.

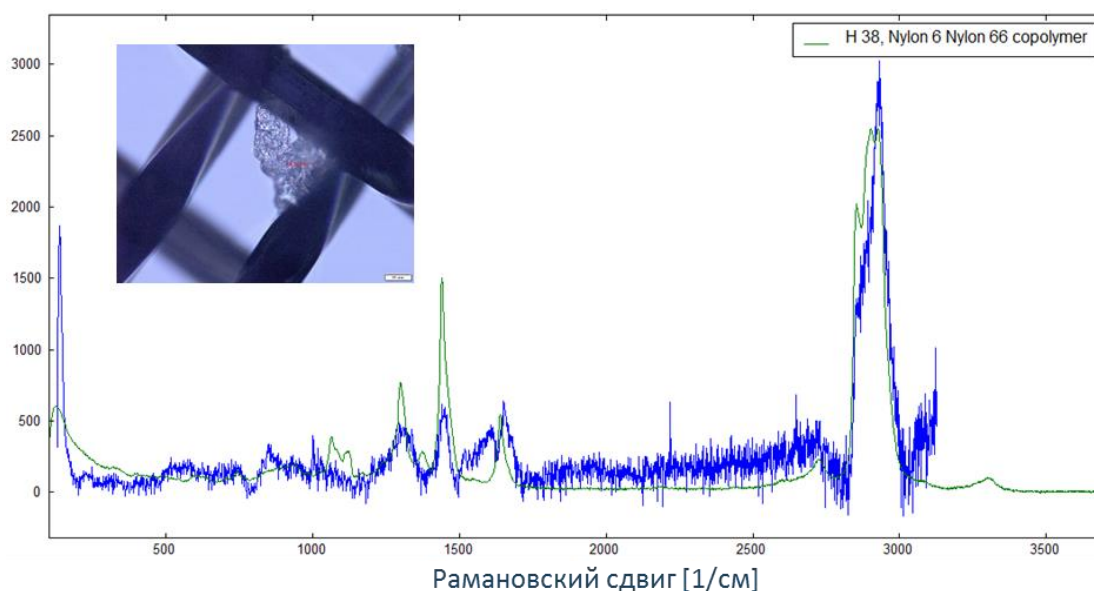


Рис. 1 Частица нейлона из подземных вод. Фото частицы на фильтре, КР-спектр исследуемого полимера (синяя линия) и нейлона из библиотеки полимеров (зеленая линия).

Процедуры контроля качества необходимы при анализе МП в пробах окружающей среды. Завышение (ложноположительные результаты) может произойти в результате фоновое загрязнения образца микропластиком из воздуха в помещении, использования полимерных приборов, одежды из синтетического волокна и т. д. В то время как недооценка концентраций возникает в результате потери аналитического материала во время анализа. Для выявления фоновое загрязнения была исследована холостая проба в лабораторных условиях, в которой было выявлено 5 микроволокон. Спектры большей частью (4/5) не совпадают с полученными спектрами частиц из подземных вод, спектр одного микроволокна определен как Nylon 6. Однако, визуальные характеристики нейлоновых частиц из подземных вод и из холостой пробы значительно отличаются, частицы нейлона из подземных вод более деградированные, неровные и шероховатые в отличие от гладкого микроволокна холостой пробы. Материалы фильтров, используемых при отборе и извлечении частиц МП из подземных и поверхностных вод, также были определены – это полиэстер (PES) и полиэтилентерефталат (PETF), данные типы полимеров в исследуемом образце не выявлены.

Заключение

В рамках данного исследования были отобраны пробы подземных вод совмещенного аллювиально-нижнетульского водоносного комплекса, речной воды и донных отложений р. Оки в пределах Андреевского месторождения подземных вод. Концентрации МП в поверхностных водах р. Оки и донных отложениях составили 2700 шт/м³ и 4950 шт/кг соответственно. Содержание частиц микропластика в подземных водах составило около 2300 шт/м³ и 900 шт/м³ без учета микроволокон. Полимеры представлены нейлоном, сульфат/карбоксиметилцеллюлозой, полиуретаном и полифенилен.

Карбоксиметилцеллюлоза используется в качестве загустителя зубных паст, косметических средств, пищевых продуктов, а также как загуститель и стабилизатор глинистых суспензий при бурении скважин. Возможно, выявленные микрочастицы карбоксиметилцеллюлозы в исследуемом горизонте остались от бурового раствора. Потенциальными источниками обнаруженных нейлоновых микроволокон являются предприятия легкой промышленности г. Перемышль, сточные воды, бытовой мусор. Микрочастицы полифенилена и полиуретана могли сформироваться при истирании шин автотранспорта, проезжающего по проходящей рядом автодороге Р-92, деградации бытового мусора или промышленного мусора предприятий машиностроения и металлообработки в городе Чекалин, через который проходит река Ока выше по ее течению.

Первичные микрогранулы из проб поверхностных вод и донных отложений могли быть принесены из расположенного в Калужской области промышленного предприятия ООО «ДПЛ Полимер» в результате потерь при транспортировке или производстве.

Список литературы

1. Казак Е.С., Филимонова Е.А., Преображенская А.Е. Микро- и нанопластик в природных водах России и проблемы его определения // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 6. С. 110–123.
2. Казмирук, В.Д. Микропластик в окружающей среде. Нарастающая проблема планетарного масштаба / М.: ЛЕНАНД, 2020.
3. Cole M. et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review // Marine Pollution Bulletin. 2011. 62. pp. 2588–2597.
4. Esfandiari A. et al. Distribution and transport of microplastics in groundwater (Shiraz aquifer, southwest Iran) // Water Research 220. 2022. 118622.
5. Li C. et al. Assessment of microplastics in freshwater systems: A review // Science of the Total Environment. 2020. 707, 135578.
6. Panno S.V. et al. 2019. Microplastic Contamination in Karst Groundwater Systems // Groundwater. 57. pp. 189–196.
7. Samandra, S. et al. Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia // Science of The Total Environment. 2022. 802, 149727.
8. Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results // Marine Pollution Bull. 2017. Vol. 114. P. 724–732.

УДК 556: 550.4

ПОЧВЫ КАК КОМПОНЕТ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**А.П. Хаустов*¹**¹Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия, E-mail: khaustov-ap@rudn.ru**Аннотация**

Рассмотрены теоретические проблемы идентификации роли почв в формировании подземной гидросферы как изначально активной составляющей гидрогеологических систем (ГГС). Центральная роль отводится вкладу органической составляющей в системе «вода–порода–газ–живое вещество». С термодинамических позиций вводится понятие проточности систем в условиях для различных условий структурных взаимодействий компонентов. Информативной мерой эволюционного развития систем с распределенными параметрами признан структурное приращение энтропии.

Ключевые слова: почвы, эволюция, структурная энтропия, проточность термодинамических систем

SOILS AS A COMPONENT OF HYDROGEOLOGICAL SYSTEMS**A.P. Khaustov*¹**¹People's Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation,

E-mail: khaustov-ap@rudn.ru

Abstract

The theoretical problems of identifying the role of soils in the formation of the underground hydrosphere as an initially active component of hydrogeological systems (HGS) are considered. The central role is given to the contribution of the organic component in the system «water–rocks–gas–living matter». From the thermodynamic point of view, the concept of the throughput capacity of systems under conditions for various conditions of structural interactions of components is introduced. The structural increment of entropy is recognized as an informative measure of the evolutionary development of systems with distributed parameters.

Key Words: soils, evolution, structural entropy, throughput capacity of thermodynamic systems

Введение

Почвы по В. В. Докучаеву (1886) – это «наружные горизонты горных пород (все равно каких), естественно измененные совместным влиянием воды, воздуха и различного рода организмов живых и мертвых». Важно то, что в определении первоосновой являются горные

породы и указано на их совместную (когерентную) метаморфизацию под влиянием компонентов геосистем. Отметим, что это определение было сформулировано задолго до представлений о взаимодействии компонентов в геохимических системах В.И. Вернадского.

Е.М. Сергеев относил почвы к компонентам геологической среды, наряду с подземными водами. В ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация почвы также рассматриваются как грунты (*грунт*: любая горная порода, *почва*, осадок и техногенные минеральные образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы и часть геологической среды, изучаемые в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью – п. 3.3), а п. 3.15 декларируется *органический грунт* с массой органического вещества не менее 50 %. Подразумевается, что с этого предела грунты можно считать почвами? Вопрос во многом дискуссионный.

В почвоведении делается акцент на самостоятельность органоминерального природного тела «... в результате длительного воздействия биотических, абиотических и антропогенных факторов, имеющих... специфические генетико-морфологические признаки, свойства, создающие для роста и развития растений соответствующие условия». Важно, что почвы – продукт самоорганизации эволюционных процессов, а их система разделения по происхождению и (или) свойствам создает необходимое разнообразие для всего живого.

В почвоведении почвенным водам (растворам) придается первостепенное значение. В то же время, в Водном Кодексе РФ вообще нет упоминания об этих водах, хотя специалистами не отрицаются понятия «почвенный сток» и «внутрипочвенный сток». Гидрологами всегда отмечалось, что почвенный покров и первые метры толщи горных пород – это область повышенного интереса гидрологии и гидрогеологии одновременно. Это принципиально важно, когда вопрос встает о водообмене и массопереносе во взаимодействующих компонентах геосистем, поскольку за этим скрываются громадные динамические различия. Поэтому, по мнению известного гидролога Ю.Б. Виноградова, исключительно важны переходные процессы и явления. Именно в почвах происходит активизация таких процессов и, как следствие, формируется многообразие сочетаний различных типов физических состояний природных вод. Химический состав почвенных вод также крайне изменчив, поэтому почвы являются феноменальным объектом исследования специалистов различного профиля.

Почвы в гидрогеологических системах

Почвы – начальное звено метаморфизации атмосферных осадков, коренным образом изменяющее их химический состав и количественные параметры локальной инфильтрации. Именно в почвах ярко проявляется параметрическое преобразование «вода – породы – газ – живое вещество», которое создает неравновесные термодинамические состояния почвенной, а в последствии – инфильтрующей влаги. «Память» о таких преобразованиях сохраняется до перехода инфильтрационных вод в зону насыщения и далее при фильтрации в пласте. Модели

«воздействие–результат» по отношению к зонам аэрации и насыщения на примере миграции полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) показывают высокую эффективность использования их в качестве трассера, а также высокую реакционную способность полиаренов по отношению к органическому веществу и механическому составу пород [1; 4; 6; 8] и др. Кроме этого, соотношения концентраций кинетических к термодинамическим ПАУ в водной и сопредельных средах позволяют уверенно определять их генетическую принадлежность, включая выявление техногенных источников [10].

С современных позиций почвы представляют хаотическую буферную среду (обусловленную внутренними противоречиями) с быстрым массопереносом по локальным зонам, с отсутствием фронтального переноса влаги и вещества, выраженной сезонностью и др. Формы массопереноса изменяются в зависимости от преобладания воздействий и видов влаги в вышеуказанной системе [3].

Роль почв как профилактического фильтра рассмотрена в работах Б.Л. Личкова, а в 1937 г. геологом Г.А. Могилевским было высказано предположение о том, что углеводородные газы дыхания недр экранируются бактериальным (биологическим) фильтром в зоне гипергенеза. Он расположен в подпочвенном слое. С современных позиций это катаболический экран в аэрируемой зоне литосферы – уникальная трофическая природная система различных микроорганизмов, основу которых составляют углеводородоокисляющие бактерии. Сейчас, в эпоху расчетов «углеродного следа» и оценок роли парникового эффекта, открытие А.Г. Могилевского чрезвычайно актуально. По данным его последователей, такие зоны максимальной интенсивности генерации газообразных углеводородов распространены под почвами на 0,5-3,0 м, а над контуром нефтяных и газовых залежей хорошо фиксируются в грунтовых водах.

По нашему мнению, аналогичные массопотоки могут формировать аномалии из почвенного покрова в зону аэрации и далее в грунтовые воды. Выпавшие осадки коренным образом преобразуют свой химический состав. В почвенном слое метаморфизация вод крайне неоднородна. Причина этому – механический состав и присутствие органического вещества, сезонные и даже суточные колебания газов. Почвы – активнейшая среда, влияющая на миграционные массопотоки по горизонтали и вертикали и, следовательно, она определяет исходный состав влаги, мигрирующей в подземные воды. В существующие отечественные схемы оценок защищенности и уязвимости подземных вод наличие почвенного покрова не включены. Однако зарубежные методы DRASTIC и SUPRA (особенно последний) включают почвенный блок, основанный на модели поглощающей способности почв SCAM. Акцентируем, что почвы по семи показателям признаются как защитный экран, который необходимо учитывать при всех построениях и моделировании. Почвы – активнейший саморегулятор, формирующий защитные механизмы по отношению к зоне насыщения. Особенно активен

верхний горизонт А, который, например, по данным лизиметрических экспериментов сорбирует до 89-90 % нефтепродуктов и других поллютантов.

Наши оригинальные эксперименты и термодинамические расчеты на Крымском полигоне с обратной постановкой задачи (выходы разных типов подземных вод как биологические реакторы) указывают на значительное разнообразие формирования ассоциаций полиаренов в структурных фазовых переходах «вода–почвы», «почвы–растения», «вода–гидрофиты», что доказывает активность и доминирующую роль почв в адсорбции веществ [7; 9].

Воздействие антропогенеза образует природно-техногенные системы, системы особого рода – нерелексные (по Н.Н. Моисееву). Им присуще такое главное отличительное свойство, как неодинаковость реакции на одни и те же воздействия или даже отсутствие реакций. Этим они отличаются от механических систем с однотипными формами реакции на воздействия извне. Все естественные системы неравновесны и даже не стохастичны. При моделировании потоков влаги через почвы и в зонах насыщения условно считается, что процессы приобретают стационарность (равновесие) быстрее, чем произойдет изменение внешних воздействий или параметров состояния и баланса масс. То есть, система должна иметь некоторые критические размеры с распределенными параметрами состояния. Во многом для грунтовых вод эти параметры определяются при инфильтрации через почвы. Лизиметрические данные дают возможность количественных оценок начального состава и объемов массопереноса из почв в зону аэрации.

В условиях техногенеза важнейшее свойство геологической среды – наличие определенного количества (или качества) кондиционных (репрезентативных) водных ресурсов всей системы или ее части, которые в любой момент могут быть вовлечены в поддержание самоорганизации (саморазвития) системы. Это справедливо и по отношению к загрязнению, и к изъятию подземной воды, поскольку природа определила в эволюции системы траекторию, удовлетворяющую минимуму: сопротивлению и диссипации энергии для движущихся потоков в горных породах (в механике – принцип Гамильтона).

Необратимость в эволюции признана как асимметрия между прошлым и будущим. Атмосфера, а затем и почвы, формируют волновую функцию прихода вещества и энергии в зону аэрации. Понятие необратимости процессов не укрепляет наши знания о системах, скорее наоборот, оно дает возможность найти новые пути к познанию. С позиций термодинамики в открытых системах должны существовать только необратимые процессы, поскольку мы не знаем или не задаем начальные условия траектории эволюции. Отсюда отсутствие универсальности интерпретации понятия энтропия. Необратимость приводит нередко к парадоксальным выводам и отсутствию связи, например, между многими положениями динамики подземных вод и гидрогеохимии. А ведь необратимость была выведена (сформулирована) Л. Больцманом в 1872 г. из канонической динамики. Пользуясь

терминологией И. Пригожина и И. Стенгера [2], сейчас необходим некоторый физический критерий, который бы позволил нам различать обратимые и не обратимые процессы в природе. В качестве такого критерия можно признать водообмен, включая горизонтальный перенос из почв причем не только гравитационных вод. зоны. Понятие водообмен фундаментально тем, что вводит временные ограничения, а, следовательно, и скоростные; их чаще принимают равномерными в пространстве пористой или трещинной среды. Реально такого быть не может. Поэтому было введено определение проточности структурных взаимодействий компонентов в термодинамической системе [5]. С позиций преобладания обозначенных процессов эволюция микро – (да и макро) систем это «продукт» структурных переходов вещества и энергии внутри системы и воздействий извне.

Проточность как физическое явление объединяет энергию и массопотоки в динамических пространственно-временных образованиях. Открытость системы предполагает возможность возникновения высокоупорядоченных диссипативных структур и их способность к последующей организации, согласно канонам термодинамики. Необратимые реакции производства низкоэнтропийных продуктов должны обеспечивать возникновение и существование «стационарных» структурных переходов в системах, а это условная линейность протекающих процессов их итеративного воспроизводства, что нами не подтверждено эмпирически. Отрицательные потоки энергии (негэнтропия) структурных переходов для слабопроточных и нейтральных условий несоизмеримо больше по абсолютным значениям по отношению к положительным и числу проявлений [5; 9].

Заключение

Представляется важным выделение на основе экспериментальных данных специального геохимического типа природных диссипативных структур, которые развиваются с участием живого вещества условно от простого (водные растворы) к более сложному (например, гидрофиты) с производством энтропии. Эти структурные переходы по своему знаку производства энтропии будут тяготеть к положительным значениям. Именно почвы как генератор органического веществ создают такую среду или начальный импульс эволюции подземной гидросферы при взаимодействии с различными типами физико-химических растворов.

Список литературы

1. Галицкая И.В., Позднякова И.А. К проблеме загрязнения подземных вод и пород зоны аэрации нефтепродуктами и ПАУ на городских территориях // Геоэкология. 2011. No 4. С. 337–343.
2. Пригожим И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. / М.: Прогресс, 1986. 432 с.

3. Смагин А. В. Термодинамическая концепция физического качества почв // Почвоведение. 2021. № 9. С. 1033-1050. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21090094>
4. Хаустов А.П. Геохимические барьеры как форма самоорганизации естественных геосистем // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. № 3. С. 396–414.
5. Хаустов А.П. Структурная энтропия как мера фракционирования массопотоков в экосистемах в условиях транспортного прессинга // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8. № 2. С. 16–38.
6. Хаустов А.П., Редина М.М. Идентификация природных и техногенных процессов в подземной гидросфере на основе анализа полиаренов // Науки о Земле и недропользование. 2021, № 4. С. 161-173
7. Хаустов А.П., Редина М.М. Парадоксы концентрирования углеводородов в компонентах геосистем (на примере ПАУ)/ Сергеевские чтения: геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». Диалог поколений. Вып. 22: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24 марта 2020 г.). М.: РУДН, 2020. С. 94–103.
8. Хаустов А.П., Редина М.М. Полициклические ароматические углеводороды как маркер процессов в подземной гидросфере / ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА. Мат-лы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. Иркутск, 2021. Изд-во: ИЗК СО РАН, 2021. С. 439-443.
9. Хаустов А.П., Редина М.М., Яковлева Е.В. Водопроявления подземных вод как геохимические системообразующие объекты (интерпретация на основе распределения ПАУ) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2018. № 3. С. 3–17.
10. Khaustov A., Redina M. Anisotropy of the polyarenes distribution in the urban soil-plant systems under the conditions of transport pollution // Applied Geochemistry. 2022. № 143, pp. 105383.

УДК 556.3

**ПРОВЕДЕНИЕ РАМОЧНЫХ ГЕОМИГРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ
ДОЛГОВРЕМЕННОЙ РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПЗРО СКВАЖИННОГО ТИПА****М.Ю. Ширнин*¹, Г.Д. Неуважаев¹, Ф.В. Григорьев¹, В.Ю. Коновалов¹**¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия, E-mail: shirnin@ibrae.ac.ru**Аннотация**

В работе представлены результаты численного моделирования процессов распространения радионуклидов в геологической среде из референтного пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) скважинного типа в глинистой толще. Модель учитывала наличие инженерных барьеров безопасности и содержала около 1 млн ячеек неструктурированной локально сгущающейся в зоне источника расчетной сетки. Были проведены многовариантные расчёты и выполнен анализ чувствительности их результатов к различным геофильтрационным и геомиграционным параметрам. Расчёты проводились на высокопроизводительной ЭВМ с использованием расчетного комплекса (ПК) MOUSE [1] и ПК GeRa [2].

Продemonстрировано, что основное направление движения подземных вод и миграции радионуклидов из зоны захоронения определяется фокусировкой потока, возникающей в зоне деградации железобетонных инженерных конструкций (крепи). На основе разработанных моделей, исходя из требований радиационной безопасности, выполнено решение серии обратных геомиграционных задач с целью оценки предельно возможного количества радиоактивных отходов для безопасного размещения в ПЗРО.

Ключевые слова: анализ чувствительности, геомиграция, пункт захоронения, атомная энергетика, безопасность

**FRAMEWORK CONTAMINANT TRANSPORT COMPUTATIONS ON
THE LONG-TERM RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY
OF A WELL TYPE DISPOSAL FACILITY****M.Yu. Shirnin*¹, G.D. Neuvazhaev¹, F.V. Grigoriev¹, V.Yu. Konovalov¹**¹Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, E-mail: shirnin@ibrae.ac.ru**Abstract**

The article presents the results of numerical modeling of the transport of radionuclides from a well type radioactive waste disposal facility located in a clay layer. The model included safety

barriers and contained about 1 million cells of an unstructured grid. Multiple calculations have been made using MOUSE [1] and GeRa [2] software packages.

The results show that direction of groundwater flow and migration of radionuclides from the disposal area is determined by the focusing of the flow in degradation zone of reinforced concrete engineering structures. Based on the developed models, a series of inverse problems were solved in order to estimate the maximum possible amount of radioactive waste to be placed in the disposal facility.

Key Words: sensitivity analysis, disposal facility, atomic energy, safety assessment, contaminant transport

Введение

Разработка технических решений по захоронению радиоактивных отходов (РАО) является многоэтапным итерационным процессом, и на выбор окончательного варианта (технических решений ПЗРО) оказывает влияние много факторов, таких как характеристики отходов, условия площадки размещения ПЗРО, нормативные аспекты, которые могут предъявлять дополнительные требования непосредственно к его конструкции (например, требования к обеспечению возможности извлечения уже загруженных РАО в течение определенного периода) и т.д.

Одним из таких решений может быть ПЗРО скважинного типа, с загрузкой твердых РАО с поверхности земли. Критерием долговременной безопасности сооружаемого ПЗРО является потенциальная дозовая нагрузка на население в долгосрочной перспективе.

При создании сооружений для захоронения РАО (скважин большого диаметра), возведения железобетонной крепи/обсадки осуществляется на полную глубину скважин для обеспечения их гидроизоляции и устойчивости к нагрузке от массива горных пород и возводимых в скважине инженерных барьеров безопасности (ИББ). На период эксплуатации ПЗРО предусмотрена защита скважин от поступления подземных вод, поэтому упаковки РАО и ИББ в начальный момент времени после закрытия сооружения находятся в необходимом состоянии. После закрытия ПЗРО происходит постепенное поступление подземных вод в систему захоронения в результате последовательного просачивания через ИББ. Подземные воды вступают во взаимодействие с матричными материалами, содержащими РАО, способствуя их разрушению и выходу радионуклидов в ИББ ПЗРО.

Далее начинается процесс миграции (массопереноса) радионуклидов, растворенных в подземных водах, в ближней зоне. Миграция происходит за счет процессов конвекции и дисперсии (диффузии), сопряженными с физико-химическими взаимодействиями с материалами ИББ (с учетом их деградации) и продуктами деградации ИББ (например, солями и оксидами металлов, образовавшимися в результате коррозии), естественным радиоактивным распадом, приводящим к снижению концентрации одних радионуклидов и повышению

содержания других (дочерних) радионуклидов – продуктов распада. В конечном итоге, загрязнение с подземными водами попадает в геосферу, после чего начинается миграция в «дальней зоне», параметры которой считаются не измененными в результате сооружения, эксплуатации и закрытия ПЗРО.

Методы исследований

В настоящей работе рассматривалось создание модельного ПЗРО скважинного типа для захоронения высокоактивных РАО (ВАО) и долгоживущих среднеактивных РАО (САО), а также проведение предварительных геомиграционных расчетов распространения радионуклидов в геологической среде.

Размещение РАО предполагается в скважинах глубиной около 70 м (итоговый диаметр скважин после возведения железобетонной крепи составляет 4,8 м), ниже первого от поверхности водоносного горизонта, в мощной толще (около 65 м) глинистых отложений. В нижней части скважин предполагается размещение ВАО, а над ВАО размещение САО.

Между ярусами упаковок РАО предусмотрено возведение несущих перекрытий, опирающихся на железобетонную крепь скважины. По периметру упаковок РАО предусмотрено возведение инженерного барьера безопасности в виде слоя буферного материала, который обеспечивает дополнительную гидроизоляцию РАО от проникающих подземных вод и сорбцию радионуклидов, выходящих из упаковок РАО после их деградации (потери защитных свойств, Рис. 1).

Территория размещения ПЗРО условно принята площадью 0,5х1 км в плане, 100 м в разрезе (Рис. 2). Гидрогеологические условия моделируемой территории описаны в табл. 1.

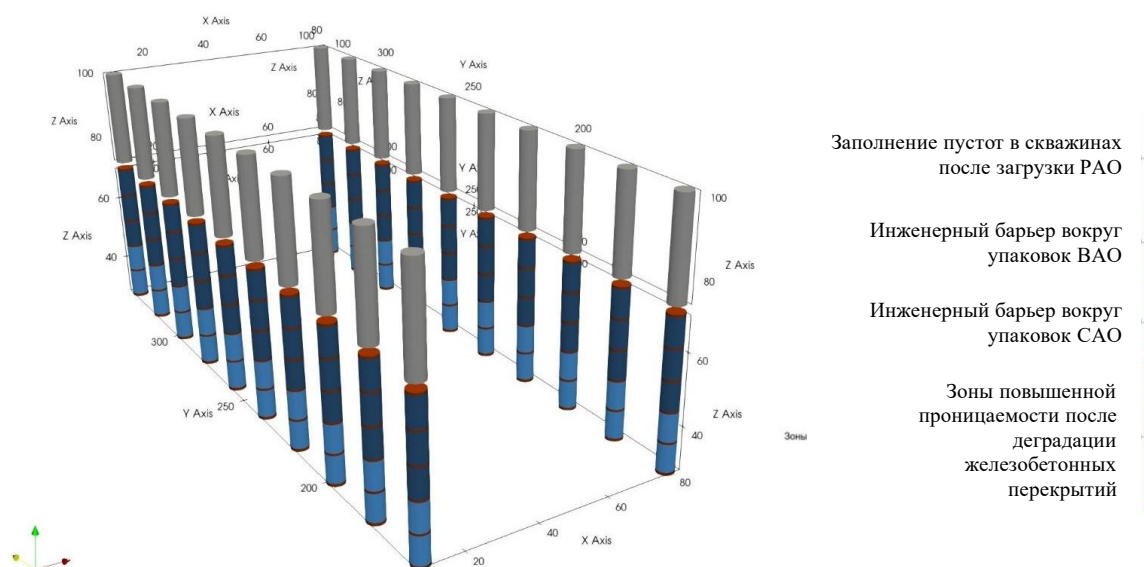


Рис. 1 Трехмерный вид скважин для захоронения РАО.

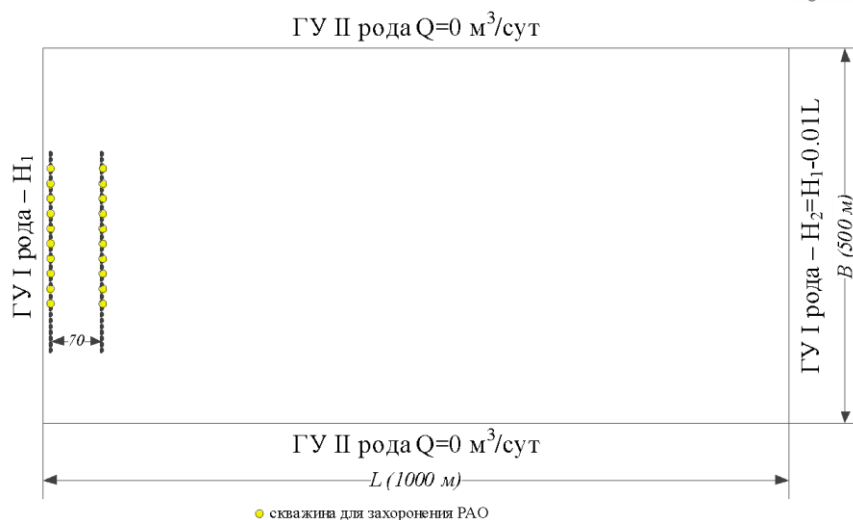


Рис. 2 Плановая схема территории размещения ПЗРО и граничные условия моделирования.

Табл. 1 Описание принятых гидрогеологических условий территории.

№ слоя	Литологический состав	Интервал глубин, м	Сведения о подземных водах	Кф, м/сут
1а	Пески/супеси	0-10	Зона аэрации	10
1	Пески/супеси	10-20	Безнапорный водоносный горизонт	10
2	Глины/суглинки	20-85	Слабопроницаемый водоупорный горизонт	Гориз.: 0,001 Верт.: 0,0001
3	Пески	85-100	Напорный водоносный горизонт	Гориз.: 10 Верт.: 1

Модельные расчеты фильтрации подземных вод и миграции радионуклидов выполнены с использованием программного комплекса GeRa/V2 [2]. Используемая в работе версия кода GeRa/V2 прошла государственную аттестацию в установленном порядке в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзору).

Моделирование фильтрации осуществлялось в напорно-безнапорном режиме. В ближней зоне учитывались зоны повышенной проницаемости, возникающие в результате деградации бетонных сооружений: обсадных колонн и перекрытий в скважинах, буферные материалы инженерного барьера безопасности. Выход радионуклидов из матрицы остеклованных ВАО моделировался процессом выщелачивания, константа выщелачивания была получена исходя из стандартных значений скорости выщелачивания для боросиликатного стекла и геометрии пеналов с отходами. Выход радионуклидов из цементной матрицы САО рассчитывался с учетом многостадийной модели деградации.

Дополнительно для оценки чувствительности численной модели к значениям геофильтрационных и геомиграционных параметров проведены многовариантные расчеты: в связке с ПК GeRa [2] использовался ПК MOUSE [1].

Для прогнозных расчетов миграции радионуклидов из ПЗРО в геологической среде до среды обитания человека, выполняемых для оценки долговременной безопасности, разработаны базовый (сценарий нормальной эволюции) и альтернативные сценарии эволюции системы захоронения РАО.

Базовый сценарий (СНЭ) – эволюционное протекание всех процессов. Предполагает утрату защитных функций ИББ в результате естественной деградации.

Альтернативный сценарий 1 (изменение химизма, учет коллоидных форм): модель соответствует СНЭ, но не учитывает сорбцию радионуклидов на породе ($K_d = 0$).

Альтернативный сценарий 2 (дефект бентонитового барьера): модель соответствует СНЭ, с зонами повышенной проницаемости в бентоните.

Альтернативный сценарий 3 (деградация бентонитовой засыпки): модель соответствует СНЭ, с деградацией бентонитовой засыпки – снижением ее противofильтрационных и противомиграционных свойств.

Альтернативный сценарий 4 («отказ» контейнеров): модель соответствует СНЭ, но принята ранняя деградация контейнера в результате интенсификации процессов коррозии.

Геомиграционные расчеты проводились для широкого перечня радионуклидов. Для нуклидов, образующих дочерние, расчеты проводили с учетом цепочек радиоактивного распада. Учитывались дочерние радионуклиды, для которых имеет смысл получать собственные коэффициенты перехода от потоков в геосферу к ожидаемым дозовым нагрузкам на население.

Удельные активности радионуклидов в дальней зоне рассматривались в контрольных точках на границе площадки и на расстоянии 1 км от нее.

Заключение

Основной переток в модельном ПЗРО между выше- и нижележащими горизонтами приурочен к зонам повышенной техногенной проницаемости, возникающим в результате деградации бетонных сооружений: обсадных колонн и перекрытий в скважинах. Объем претекания подземных вод, проходящего в зонах повышенной проницаемости, составляет около 98,5 % от общего потока. При нисходящем потоке фильтрации подземных вод результаты показывают, что не ожидается превышения уровней вмешательства радионуклидами в питьевой воде, кроме сценария А1, при моделировании которого происходит вынос долгоживущих радионуклидов на коллоидных частицах.

Интересным результатом моделирования является миграция изотопов углерода (^{14}C) к дальней модельной точке наблюдения (~ 1 км от ПЗРО) ранее, чем к ближней точке, выставленной на границе ПЗРО. Это объясняется тем, что изотопы углерода размещаются в верхней части зоны захоронения и начинают распространяться по слабопроницаемым глинистым формациям (3 модельный слой), далее траектория миграции проходит выше 1-ой точки

детектирования, и на момент погружения в 4-й модельный слой быстро «смывается» и достигает дальней точки детектирования (Рис. 3).

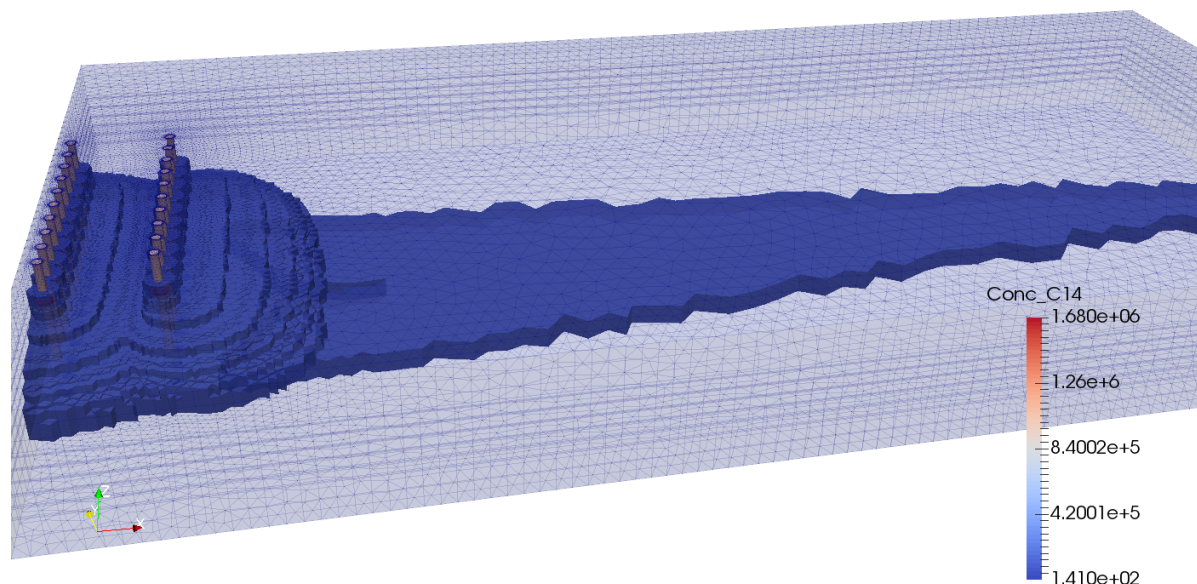


Рис. 3 Модельный фронт продвижения ^{14}C .

Анализ результатов моделирования показывает, что наибольшую потенциальную опасность представляют собой долгоживущие слабосорбируемые изотопы. При этом сконструированная многобарьерная система очень эффективна в отношении альфа-излучающих (в том числе трансурановых) изотопов при всех возможных сценариях эволюции ПЗРО.

Список литературы

1. Линге И. И., Уткин С. С., Свительман В. С., Дерябин С. А. Расчетное обоснование долговременной безопасности и оптимизация решений по захоронению РАО и выводу из эксплуатации: тенденции, потребности, возможности // Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (11). С. 85—98.
2. Капырин И.В. Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ. // Радиоактивные отходы, 2022, №2 (19), с.105-115.

УДК 556.388

СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ДРЕНАЖНЫХ РАССОЛОВ, РЕАЛИЗУЕМЫЕ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АК «АЛРОСА» В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КРИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ

А.М. Янников*¹¹Институт Якутнипроалмаз АК АЛРОСА (ПАО), Мирный, Россия, E-mail: yannikov90@mail.ru

Аннотация

Отработка глубоких горизонтов коренных месторождений алмазов сопровождается водопритокom высокоминерализованных дренажных вод с минерализацией, достигающей 350 г/дм³, что в свою очередь требует разработки технологий для экологически безопасного обращения с ними. В настоящее время на предприятиях АК «АЛРОСА» (ПАО) реализована закачка дренажных вод в недра, для этой цели используются два вида коллекторов: региональных подмерзлотных комплексов и формируемых в толще ММП в процессе закачки в пределах локальных участков интенсивного техногенного воздействия. В представленной статье рассматриваются обозначенные способы закачки, в привязке к криогидрогеологическим условиям конкретного кимберлитового поля. Рассмотрены аспекты и проблемы дальнейшего развития систем закачки, связанные с жизненным циклом обрабатываемых месторождений.

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, кимберлитовые трубки, природные рассолы, участки закачки.

METHODS OF DISPOSAL OF DRAINAGE BRINES IMPLEMENTED AT THE ENTERPRISES OF ALROSA DEPENDING ON THE CRYOHYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE KIMBERLITE FIELD

A.M. Yannikov*¹¹Yakutniproalmaz Institute of AK ALROSA (PJSC), Mirny, Russian Federation, E-mail: yannikov90@mail.ru

Abstract

The development of deep horizons of indigenous diamond deposits is accompanied by the formation of highly mineralized drainage waters with mineralization reaching 350 g/dm³, which in turn requires the development of technologies for environmentally safe handling of them. Currently, drainage water is pumped into the subsoil at ALROSA enterprises, two types of collectors are used for this purpose: regional permafrost complexes and MMP formed in the thickness during injection within local areas of intensive technogenic impact. The article discusses the described injection methods in

530

relation to the cryohydrogeological conditions of a particular kimberlite field. Aspects and problems of further development of injection systems related to the life cycle of the mined deposits are considered.

Key Words: Yakut diamond-bearing province, kimberlite pipes, natural brines, injection sites

Введение

Отработка кимберлитовых трубок Западной Якутии на всю глубину разведанных запасов возможна только при эксплуатации систем закачки формирующихся дренажных рассолов. В зависимости от криогидрогеологических условий конкретного кимберлитового поля, а именно объемов природных рассолов [1-2] поступающих в карьерное или шахтное поле и глубины залегания высокопроницаемых коллекторов, закачка рассолов осуществляется либо в коллектора регионально распространенных подмерзлотных водоносных комплексов, либо в толщу ММП, с формированием в ней природно-техногенных криопэггов. Необходимо отметить, что в зависимости от выбранного способа закачки дренажных вод, конфигурации репресссионных куполов и их площади существенно отличаются.

Процесс откачка-закачка является основообразующим для формирования изучаемых природно-техногенных систем, определяющих гидродинамический режим водоносных горизонтов и комплексов в пределах рассматриваемых кимберлитовых полей. Первые опытные участки были построены в пределах Далдынского и Мирнинского кимберлитовых полей в 80-х годах XX века. Показав свою эффективность, данная технология была не только внедрена и расширена в пределах Далдынского и Мирнинского кимберлитовых полей, но тиражирована на Алакит-Мархинское и Накынское кимберлитовые поля.

В настоящее время на разных стадиях освоения в АК «АЛРОСА» находится тринадцать участков закачки, а т.к. притоки природных рассолов с увеличением глубины отработки, как правило увеличиваются, требуется постоянное развитие созданных систем, а также поиски и разведка дополнительных площадей, пригодных для строительства.

Методы исследований

Выбору участков закачки предшествует комплекс изучения криогидрогеологических условий территории и годы научно-методических исследований [3]. На данном этапе наиболее важным фактором выступают криогидрогеологические условия конкретного кимберлитового поля. Например, наличие в пределах Мирнинского кимберлитового поля высокопроницаемых коллекторов в интервале ичерской свиты на относительно небольшой глубине (500-550 м от дневной поверхности), позволили реализовать систему обратной закачки дренажных вод, т.к. в виду криогидрогеологических особенностей метегеро-ичерский водоносный комплекс дает до 95% от суммарного объема дренажных вод трубок Мир и Интернациональная. Криогидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля, а именно

распространение высокопроницаемых коллекторов, пригодных для обратной закачки только на глубинах более 1200 м от дневной поверхности, предопределили необходимость использования на первоначальном этапе толщи многолетнемерзлых пород для закачки высокоминерализованных вод трубки Удачная.

Поиск и выбор участков, пригодных для закачки дренажных вод, сопряжены с определенными финансовыми затратами, непосредственно связанными со строительными, монтажными и эксплуатационными работами. Поэтому разработке методов выявления перспективных подземных структур с использованием целенаправленного комплекса поисковых признаков придается особое значение.

Для выбора перспективных криогенных и разрывных структур для закачки высокоминерализованных дренажных вод в АК «АЛРОСА» разработан и успешно применен на практике следующий комплекс поисковых критериев:

- тектонический критерий основан на том, что зоны динамического воздействия региональных разрывных нарушений создают высокопроницаемые зоны, позволяющие производить высокодебитную закачку в безнапорном режиме;

- структурный критерий – перспективными для строительства участков закачки, являются как правило неравномерно опущенные грабенообразные структуры;

- геофизический – пригодные для закачки структуры, как правило, формируют отрицательные гравитационные аномалии, линейные аномалии электрического сопротивления, локальные магнитные аномалии линейного и трубчатого типов.

- геоморфологический фактор наиболее важен для участков, где используют толщу ММП, т.к. выбираются участки с ее максимальной мощностью.

Дополнительно используются газодинамический, температурный, гидрогеологический и геохимический критерии. Каждый из перечисленных критериев основан на физических принципах, напрямую или косвенно связанных с фильтрационными и емкостными свойствами криогеологической среды: толщи ММП и подмерзлотных водоносных комплексов.

Результаты и их обсуждения

Рассмотрим выбранные способы закачки применительно к конкретным кимберлитовым полям: Алакит-Мархинскому, Далдынскому, Мирнинскому и Накынскому.

Для месторождений *Алакит-Мархинского кимберлитового поля* трубок Айхал, Заря, Юбилейная и ранее Комсомольская используется два участка закачки Заречный и Ноябрьский. Оба участка используют коллекторы толщи ММП. Из-за криогидрогеологических условий кимберлитового поля в планируемом интервале отработки отсутствуют высокодебитные водоносные комплексы. Например, текущий приток рассолов к шахтному полю Айхал не превышает 200 м³/сут, а на конец отработки не будет превышать 430 м³/сут. Приток рассолов к

карьеру Комсомольский в 2018-2020 гг. не превышал $20 \text{ м}^3/\text{сут}$ (в настоящее время месторождение отработано). Трубки Заря и Юбилейная в настоящее время отрабатываются открытым способом, и не формируют дренажных вод, требующих закачки. В будущем максимальные прогнозные притоки составят до $20 \text{ м}^3/\text{сут}$ для трубки Заря и до $1070 \text{ м}^3/\text{сут}$ для трубки Юбилейная. Относительно невысокие объемы дренажных вод позволяют использовать для закачки толщу ММП. Участок Ноябрьский предполагается использовать в перспективе с 2028 г. для трубок Айхал и Заря (также ранее на нём закачивались рассолы карьера Комсомольский. Участок Заречный строится для закачки дренажных рассолов, которые будут формироваться при отработке трубки Юбилейная. Глубина закачных скважин на участке Заречный составляет 200-250 м; а на участке Ноябрьский – 230 м. Эксплуатация участка закачки Заречный и Ноябрьский, к 2040-2050-х гг приведёт к образованию межмерзлотных техногенных водоносных горизонтов, объёмом $3,2 \text{ млн. м}^3$ и $5,5 \text{ млн. м}^3$ соответственно, что в дальнейшем обеспечит формирование зон дополнительного питания нижнеордовикского водоносного комплекса, активно дренируемого в настоящее время подземными горными выработками рудника Айхал и карьером Юбилейная (с 2028 года карьером Заря) [4-6].

Для закачки рассолов трубок *Далдынского кимберлитового поля* используются как коллекторы толщи ММП, так и коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса. В период 1985-2022 гг. в толщу ММП, на участках «Октябрьский», «Киенгский», «Левобережный» и «Левобережный – 2» было закачено 45 млн. м^3 дренажных рассолов трубки Удачная. Глубина закачных скважин составляет 260-280 м. Закачка такого объёма рассолов привела к формированию межмерзлотных техногенных горизонтов, приуроченных к перечисленным участкам. Причём в результате растворения льдистой составляющей были сформированы вертикальные зоны массопереноса в ниже залегающий подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс. Начиная с 2020 г. начато использование коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса, скважинами глубиной 1700 м. В настоящее время нижнекембрийский водоносный комплекс выработками рудника не вскрыт, поэтому формируется только реперссионный купол растекания, возникший в результате закачки $3,5 \text{ млн. м}^3$ дренажных рассолов трубки Удачная [7].

Использование обоих типов коллекторов связано с высокими притоками природных рассолов к шахтному полю трубки Удачная, в настоящее время составляя до $9\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$. При этом дальнейшее увеличение глубины отработки рудника приведёт к существенному росту притока – прогнозируемый расход на конец 50-х годов XXI века – до $40\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Для закачки дренажных рассолов месторождений *Мирнинского кимберлитового поля* используются коллекторы первого подмерзлотного метегеро-ичерского водоносного комплекса, испытывающего наибольшее техногенное воздействие, из-за отработки месторождений трубок Мир и Интернациональная. Техногенная нагрузка на гидродинамический режим комплекса в

предыдущие периоды тесно связана с этапами отработки трубки Мир. В настоящее время дополнительным, всё более значимым фактором выступает рудник Интернациональный. Пьезометрическая поверхность метегеро-ичерского водоносного комплекса в результате промышленного освоения будет представлять собой две депрессионные воронки от рудников Мир и Интернациональный, на которые накладываются репресссионные купола растекания, формируемые от участков закачки, расположенных в зонах динамического воздействия Восточного и Западного разломов. Процесс обратной закачки сформировал техногенную границу обеспеченного питания, полностью компенсирующую текущую откачку на месторождениях, и, как следствие формирует планово ограниченные депрессионные воронки [8-9]. Всего с 1989-2022 гг. в метегеро-ичерский водоносный комплекс было закачено 340 млн. м³ дренажных вод.

Необходимо отметить, что увеличение глубины отработки месторождений Мирнинского кимберлитового поля не приводит к существенному увеличению притока природных рассолов, т.к. основной вклад в приток остается за метегеро-ичерским водоносным комплексом (не менее 95% от суммарного расхода).

Дренажные воды месторождений *Накынского кимберлитового поля* – трубок Ботубобинская и Нюрбинская закачиваются на участке Ботубобинский в коллекторы толщи ММП. Глубина закачных скважин составляет 205-210 м [10]. В результате эксплуатации участка также будет сформирован техногенный водоносный горизонт объёмом 1,9 млн. м³, который выступит зоной дополнительного питания для межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса, дренируемого карьером трубки Нюрбинская. Необходимо отметить, что месторождения Накынского кимберлитового поля характеризуются наименьшими притоками. Суммарный прогнозный приток природных рассолов к карьерным полям трубок Ботубобинская, Нюрбинская и Майская не превысит 250 м³/сут.

Заключение

Для отработки кимберлитовых трубок Айхал, Ботубобинская, Зарница, Заря, Интернациональная, Комсомольская, Майская, Мир, Нюрбинская, Удачная и Юбилейная построено 13 участков закачки: 6 из которых используют коллектора региональных подмерзлотных водоносных комплексов, а 7 – толщу ММП.

Выбор способа закачки определяется криогидрогеологическими условиями конкретного кимберлитового поля, прежде всего с объёмом природных рассолов, поступающих к карьерным и шахтным полям, и глубиной залегания пригодных для закачки дренажных рассолов коллекторов.

Многолетняя эксплуатация участков закачки способствовала накоплению необходимого опыта, а также позволила разработать методику поиска структур, пригодных для строительства новых или расширения существующих узлов.

Список литературы

1. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
2. Дроздов А. В., Иост Н. А., Лобанов В. В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
3. Алексеев С. В., Алексеева Л.П. Итоги и перспективы захоронения дренажных вод кимберлитовой трубки Удачная в мерзлых породах // Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2003 С. 67-78
4. Янников А.М. Гидрогеология Алакит-Мархинского кимберлитового поля. Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2022. 132 с.
5. Янников А.М., Янникова С.А., Овчинникова М.Ю., Корепанов А.Ю. Использование ммп для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» // Вестник Пермского государственного университета. Пермь. 2021. №3. С. 284-299.
6. Янников А.М., Зырянов И.В., Янникова С.А. Корепанов А.Ю. Перспективы использования глубокозалегающих водоносных горизонтов для закачки слабоминерализованных вод // Горная промышленность. Москва. 2022. №1. С. 76-81.
7. Янников А.М., Зырянов И.В., Корепанов А.Ю., Стручкова А.С. Динамика и прогноз изменения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в пределах Далдынской флексуры // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 9. С. 60-73.
8. Янников А.М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля. Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2021а. 240 с.
9. Янников А.М., Бочаров В.Л. К проблеме экологически безопасного захоронения дренажных вод рудника «Интернациональный» // Вестник ВГУ серия геология. Воронеж. 2019. №4. С. 99-103.
10. Янников А.М., Ильков А.Т. Формирование рассолопоглощающих коллекторов в толще ММП, на примере участка "Ботуобинский" (Республика Саха (Якутия)) // "Геология и недропользование" ЕСОЭН. Москва. 2021. №4. С. 64-73.

НЕФТЯНАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ

УДК 556.3.01

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Н.И. Акзигитов*¹, В.Ю. Мастеркова¹

¹ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр», Россия, E-mail: dmvasilev@udn.rosneft.ru

Аннотация

В данной работе рассмотрены основные особенности гидрогеологического моделирования на нефтяных месторождениях. Кратко обозначены противоречия, возникающие при попытках схематизации гидрогеологической обстановки на нефтяных месторождениях. Выделены проблемные аспекты моделирования процессов закачки и добычи подземных вод в пределах нефтяных месторождений.

Ключевые слова: моделирование, ППД, размещение подтоварных вод, нефтяные месторождения, коллектор

FEATURES OF CREATING HYDROGEOLOGICAL MODELS IN OIL FIELDS

N.I. Akzigitov*¹, V.Y. Masterkova¹

¹CJSC «Izhevsk Oil Research Center», Russian Federation, E-mail: dmvasilev@udn.rosneft.ru

Abstract

In this paper, the main features of hydrogeological modeling in oil fields are considered. The contradictions arising from attempts to schematize the hydrogeological situation in oil fields are briefly outlined. The problematic aspects of modeling the processes of injection and extraction of groundwater within oil fields are highlighted.

Keywords: modeling, PPD, placement of raw water, oil fields, reservoir

Введение

При оценке запасов подземных вод для использования в системе поддержания пластового давления и в процессе подготовки отчётов по обоснованию возможности размещения в пластах излишков попутно-добываемых вод возникает необходимость в построении гидрогеологической модели. При этом существует два принципиально разных подхода к моделированию: использование действующей модели нефтяного месторождения с адаптацией её для гидрогеологических задач, либо создание отдельной модели месторождения подземных вод. В первом случае используются «нефтяные» программные комплексы: Petrel,

Irap, Stratamodal, DV-Geo, TimeZYX, PH-КИМ и PH-ГЕОСИМ и другие. Во втором случае используются программы для создания гидрогеологических моделей: MODFLOW, GFLOW, Geolink ModTech, Waterloo Hydrogeologic, Логос Гидрогеология («НИМФА») [1].

Проблема исследования

Несмотря на разнообразие программных продуктов, возможность воспроизведения реальной гидрогеологической обстановки нефтяного месторождения ограничена: «нефтяной» софт в целом не предназначен для моделирования фильтрации воды и при создании модели применяются несколько иные характеристики пласта, не учитывается физико-химическое воздействие закачиваемых вод на пласт и т.д. [2].

Гидрогеологические программы требуют большого объема информации о водоносном горизонте, который отсутствует в силу того, что вода не является целевым объектом изучения при разработке нефтяных месторождений [3]. Без требуемых параметров водоносного горизонта модель упрощается до варианта, при котором само по себе моделирование нецелесообразно и решение прогнозной задачи сводится к простейшим аналитическим схемам, а сама модель служит исключительно средством визуализации, искусственно подогнанным под аналитическое решение.

При построении гидрогеологических моделей месторождений, эксплуатируемых для систем ППД нефтяных месторождений существует ряд особенностей, которые создают дополнительные сложности при адаптации и верификации модели.

1. Исходными данными является проницаемость вместо коэффициента фильтрации или проводимости пласта, причем часто полученная по результатам ГИС. В отсутствие актуальных данных о вязкости и плотности пластовой и закачиваемой вод возникает погрешность в расчетных значениях коэффициента фильтрации и проводимости.

2. Дискретность значений проницаемости: в разрезе пласты разделяются на «коллектор – не коллектор» по некоторым пороговым значениям проницаемости, зачастую не соответствующим реальному движению воды. Расхождетрия в интервале залегания водоносных горизонтов как правило не выполняется и каким-либо образом оценить качество данных о проницаемости пласта и провести отбраковку некорректных значений затруднительно. Не учитывается «двойная пористость» карбонатных трещиноватых водоносных горизонтов. При схематизации происходит либо объединение всех проницаемых зон в одну с использованием осреднённых значений коэффициента проницаемости, либо чрезмерное дробление водоносных горизонтов. Первый подход упрощает моделирование, но может давать заниженные значения скорости потока подземных вод, т.к. вместо фильтрации по наиболее проницаемым зонам в модели задаётся фильтрация через всё сечение пласта. Второй подход перегружает модель и

также может привести к некорректному распределению скоростей потока при отсутствии данных расходомерии.

3. Не учитывается взаимодействие воды и породы. В реальном пласте вследствие процессов растворения-осаждения при закачке жидкости с отличным от пластовой воды химическим составом происходит изменение конфигурации проницаемых зон. Однако, так как сведения о химическом составе пластовой воды и породы-коллектора недостаточны для прогноза данных изменений. Как правило отсутствуют данные о газовом составе подземных и закачиваемых вод, не проводится химический анализ керна в интервале залегания водоносных горизонтов, нет истории изменения химического состава подземных вод. Летучие и нестабильные компоненты определяются с нарушением сроков доставки проб в лабораторию, пробы отбираются «с крана», выполняется только сокращённый химический анализ и анализ на требования ОСТ 39-225-88 [4]. Соответственно, при недостаточности изученности состава воды, породы и растворённых газов прогноз миграции закачиваемых вод не учитывает физико-химических процессов в пласте.

Прогнозы осложнений при закачке сводятся к номинальному определению совместимости пластовых и закачиваемых вод, результат которого не используется в дальнейшем на промысле, а ликвидация неблагоприятных последствий происходит по опыту соседних месторождений. История проведения мероприятий на водозаборных и нагнетательных скважинах также не учитывается при разработке модели, отслеживания изменения проницаемости в прискважинной зоне по результатам СКО не ведётся. В результате всего вышеперечисленного, добавление в модель гидрогеохимической информации приводит к росту неопределённости параметров, затрудняет калибровку модели и может существенно исказить прогноз.

4. Низкая достоверность информации об уровнях подземных вод: на скважинах зачастую отсутствуют приборы учёта, измерение уровней ведётся нерегулярно и с существенной погрешностью, нет представлений о первоначальном поле напоров (до начала эксплуатации месторождения нефти) и взаимодействии водоносных горизонтов между собой.

5. Отсутствие информации о граничных условиях: пласты принимаются неограниченными в плане и изолированными в разрезе, при гидродинамических расчетах и ограниченными условиями второго рода при гидродинамическом моделировании.

6. Постоянное изменение поля давлений в пластах из-за добычи нефти, которое сложно учесть при использовании гидрогеологических программ. Гидрогеологическая модель, как правило, не рассматривает нефтяные пласты, но из-за перераспределения давлений на месторождении может измениться и гидродинамическая, и гидрохимическая обстановка в водоносных горизонтах. Для крупных месторождений нефти со сложным строением практически невозможно учесть взаимодействие между всеми водозаборными,

нефтедобывающими и нагнетательными кустами, отразить реальное время простоя и учесть мероприятия на скважинах [3].

7. Отсутствие инструментов в программах для гидрогеологического моделирования для отражения процессов, происходящих на нефтепромысле. Для получения корректного результата при моделировании необходимо учитывать историю разработки нефтяного месторождения, что затруднительно сделать в «стандартных» гидрогеологических программах [5].

8. Недостаточность и низкая достоверность данных опытно-фильтрационных работ. При оценке запасов подземных вод для системы ППД основным методом исследований являются одиночные откачки и свабиrowание. При редких кустовых исследованиях наблюдательные скважины выбираются исходя из возможностей недропользователя, а не нужд гидрогеолога, наблюдения за уровнями в смежных горизонтах не ведутся. Уровни подземных вод определяются с погрешностью до 0,5 м. В результате проведение опытных работ носит несколько утилитарный характер, полученные значения коэффициентов фильтрации/проводимости в лучшем случае характеризуют прискважинную зону, данные о коэффициенте пьезопроводности принимаются исходя из «справочной информации» [4]. Аналогично поставлены работы при обосновании закачки излишков попутно-добываемых вод.

Выводы и предложения

Таким образом, гидрогеологическая модель нефтяного месторождения в большинстве случаев является сложной с точки зрения схематизации и зачастую искажает представления о происходящих в водоносных горизонтах процессах. С одной стороны, существует огромный объём накопленной информации по нефтяному месторождению, с которым должны коррелироваться полученные при моделировании результаты, с другой – слабая изученность водоносных горизонтов не позволяет задать адекватные значения фильтрационных и тем более миграционных параметров, позволяющих выполнить качественную адаптацию модели.

Создание гидрогеологической модели нефтяного месторождения должно начинаться с актуализации и верификации информации, отбраковки лишних и некорректных данных. Необходимым инструментом при работе с моделью является база информации по нефтяному месторождению, в которую должны своевременно вноситься сведения об энергетическом состоянии нефтяных пластов, вводе и выводе скважин, химическом и термическом воздействии на пласты, изменении объёмов добычи и закачки.

При построении модели необходимо объединять инструментарий гидрогеологических и нефтяных программ гидродинамического моделирования, чтобы наилучшим образом отразить реальную ситуацию на месторождении. Модель должна создаваться гидрогеологами совместно

со специалистами по моделированию месторождений нефти, и учитывать историю и планы разработки нефтяного месторождения [6].

В настоящее время в Компании ведётся работа над программным комплексом «РН-АКВА», разработка которой позволит объединить функционал нефтяных и гидрогеологических программ для моделирования и упростить работу над гидрогеологической моделью на существующих нефтяных месторождениях. На сегодняшний день подготовлен прототип программного обеспечения, в котором реализованы следующие функции:

- Автоматическая выгрузка сведений из геологической модели как основы для гидрогеологического моделирования. Планирование геометрии модели, задание сетки, воспроизведение кубов пористости, проницаемости и литологии пород-коллекторов.
- Добавление в модель данных ГИС и физических свойств пластовых флюидов с возможностью отбраковки лишней или некорректной информации.
- Учёт истории работы водозабора или полигона размещения: в модель выгружаются сведения о геометрии, интервалах перфорации, режиме работы, дебитах и приёмистости, уровнях в водозаборных и поглощающих скважинах.
- Расчёт прогнозных понижений/повышений уровня.
- Визуализация результатов моделирования.
- Автоматическое формирование типовых карт, форм, разделов отчёта [6].
- В дальнейшем планируется доработка программного комплекса «РН-АКВА» с реализацией следующих функций:
 - Добавление результатов лабораторных и опытно-фильтрационных работ.
 - Учёт взаимодействия воды и породы, изменения проницаемости при закачке несовместимых или агрессивных вод.
 - Возможность моделирования химического и термического воздействия на призабойную зону пласта.
 - Добавление граничных условий в гидрогеологическую модель.
 - Реализация расчётных схем для сложных гидрогеологических условий.

Разработка программного продукта осуществляется программистами Компании совместно с гидрогеологами и специалистами по геологическому моделированию.

Список литературы:

1. Семендяева Л.В. Анализ современного состояния компьютерных технологий для численного моделирования гидрогеологических процессов // Разведка и охрана недр – 2015 – № 8 – С. 78 – 82.
2. Ахметшин Р.З., Полшкова И.Н. Информационные технологии в гидрогеологии // Недропользование XXI век – 2019 – № 6 (82) – С. 76 – 83.
3. Нестеренко Ю.М и др. Влияние разработки месторождений углеводородов на геодинамику и водные системы Южного Предуралья // Литосфера – 2010 – № 4 – С. 128 – 141.

4. Корзун А.В., Мастеркова В.Ю. Значимость гидрогеологической информации при разработке нефтяных месторождений // Сборник научных трудов III научно-практической конференции по вопросам гидрогеологии и водообеспечения. Ижевск, 2021. С. 98 – 102.
5. Попков В.И., Шакшин В.П. Интегрированное геолого-гидродинамическое моделирование в системном управлении разработкой нефтегазовых месторождений // Вестник СамГТУ – 2009 - № 1 (18) – С. 239 – 250.
6. Вахрушева Н.О. и др. Цифровая трансформация в области гидрогеологии – актуальное направление развития ПАО «НК «Роснефть» // Нефтяное хозяйство – 2021 - № 11 – С. 2 – 5.

УДК 551.35, 556.3.01, 556.388

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА НЕОПЛЕЙСТОЦЕНА В РЕГИОНЕ РАЗРАБОТКИ АСТРАХАНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (АГКМ)

О.В. Голованова*¹¹Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия, E-mail: golovanova2000@mail.ru

Аннотация

Развивается модель формирования водоносного комплекса неоплейстоцена крупного региона на Юго-Востоке Русской плиты, показывающая значительный вклад седиментогенных вод в структуру баланса до настоящего времени. Основой являются материалы многолетних гидрогеохимических, литолого-геохимических, гидрогеофильтрационных и гидрогеомиграционных исследований. Установлены закономерности осадконакопления и формирования геофильтрационных свойств пород, с высокой детальностью проведены схематизация и районирование строения водоносного комплекса и химического состава подземных вод. Выявлена взаимосвязь распространения областей наибольшей проводимости верхнего водоносного пласта с межкупольными депрессиями системы соляных штоков, имеющей организованный характер гексагональных структур. Анализ ландшафтно-геоморфологических условий и материалов дешифрирования аэрофотоснимков позволил с высокой вероятностью предполагать, что специфический ландшафтно-геоморфологический рисунок земной поверхности маркирует зоны геодинамической нестабильности масштаба от первых сотен метров до километров. Полученные результаты актуальны как для развития теоретической модели формирования водоносного комплекса неоплейстоцена, так и для управления природно-техногенными системами АГКМ, для понимания закономерностей формирования коллекторских свойств пород, выявления зон распространения интенсивных массопотоков, прогноза устойчивости фундаментов и прочих.

Ключевые слова: неоплейстоцен, Северный Прикаспий, гидрогеофильтрация, гидрогеомиграция, моделирование, управление

THE NEOPLEISTOCENE AQUIFER SYSTEM FORMATION MODELS IN THE REGION OF THE DEVELOPMENT OF THE ASTRAKHAN GAS CONDENSATE FIELD (AGKF)

O.V. Golovanova*¹¹Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, E-mail: golovanova2000@mail.ru

Abstract

An original model of the formation of the Neopleistocene aquifer system in the Northern Caspian region is being developed, showing a significant contribution of sedimentogenic waters to the structure of water balance up to the present time. Materials of many years of hydrogeochemical, lithological-geochemical, hydrogeofiltration and hydrogeomigration studies are the basis of the model development. Regularities of sedimentation, diagenesis, and formation of geofiltration properties of rocks and the chemical composition of groundwater has been revealed. The use of geophysical and geothermics research showed a certain correlation between the spread of the areas of the highest conductivity of the uppermost Neopleistocene aquifer with the deep inter-dome depressions of the early-Permian salt system, organized hexagonal structures. In the upper part of the litho-hydrosphere an analysis of landscape-geomorphological conditions and materials of interpretation of aerial photographs has allowed to assume with high probability that specific landscape-geomorphological pattern of the Earth's surface marks the zones of geodynamic instability of the scale of the first hundred meters. The results obtained are relevant for management of the development of AGCF, understanding the patterns of formation of reservoir properties of rocks, identifying areas of distribution of intense mass flows, forecasting the stability of foundations and others.

Key Words: Neopleistocene, Northern Caspian, hydrogeofiltration, hydrogeomigration, modeling, management

Введение

Значительный научно-практический интерес к водоносному комплексу неоплейстоцена в регионе Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ) обусловлен как спецификой условий формирования Мезо-Кайнозойских водо-породных комплексов, так и необходимостью организации надежной системы управления разработкой АГКМ.

Северный Прикаспий характеризуется специфическими природными условиями, к которым относятся: аридный климат, абсолютные высотные отметки ниже уровня Мирового океана, весьма полого-наклонный и слаборасчлененный рельеф. В ходе многократных трансгрессивно-регрессивных событий и оледенений неоплейстоцена, значительные перемещения береговой линии Каспийского моря происходили даже при малых изменениях объема воды в бассейне. Регион исследования являлся ареной деятельности ветра и разновозрастных, изменяющих русла поверхностных водотоков в континентальных условиях. В морских условиях осадконакопление происходило на относительно небольших глубинах, до 50 м, при импульсном, часто лавинном характере седиментации. Все это обусловило сложность фациального состава и строения водоносного комплекса неоплейстоцена, неоднородность соотношений песчаных и глинистых пород и пластов, значительную изменчивость химического состава высокоминерализованных подземных вод.

Мы разработали модель формирования подземных вод, суть которой может быть изложена в следующих основных позициях [2]:

- отложения водоносного комплекса неоплейстоцена накапливались преимущественно в морских условиях лавинной седиментации с нарушением механической дифференциации материала в ходе циклической трангрессивно-регрессивной деятельности Каспия, что обусловило отсутствие типичной системы водоносных и слабопроницаемых пластов;
- весьма низкие значения скорости геофильтрации и геомиграции по латерали определили в изучаемой системе сохранность седиментогенных вод морских бассейнов неоплейстоцена;
- геохимические изменения пород и вод неоплейстоценового комплекса происходят согласно классической схеме раннего диагенеза, широкий разброс значений компонентов химического состава подземных вод обусловлен литолого-фациальной неоднородностью, ландшафтно-геоморфологическими условиями и условиями залегания подземных вод.

Развитие модели формирования водоносного комплекса неоплейстоцена предполагает углубление представлений о формировании ландшафтно-климатических и геоморфологических особенностей самой верхней части гидролитосферы. Мы стремимся найти новые действующие факторы и системы организации изучаемого комплекса. Регион исследования характеризуется значительной степенью унаследованности строения вышележащих и глубинных структур [1]. Утоненная земная кора, интенсивный тепловой поток, кунгурский галокинез [4], – все это создает предпосылки эндогенного воздействия в залегающих выше элементах гидролитосферы. Требуется оценка возможных путей проявления многоуровневных геодинамических систем и эндогенных потоков вещества и энергии в водоносном комплексе неоплейстоцена. Мы пытаемся оценить возможности влияния геодинамических факторов на ландшафтно-геоморфологические особенности региона и рассматриваем соотношение закономерностей строения изучаемого водоносного комплекса с глубинными структурами.

Методы исследований

Фундаментальный фактический материал получен в ходе многолетних исследований природных вод и взаимосвязанных с ними сред АГКМ, используются данные Астраханской партии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, материалы гидрогеологической, инженерно-геологической съемки, аэрофотосъемки и геофизических исследований (Л.Ф. Кривко, А.Е. Лютницкий, И.К. Акуз, В.В. Силантьев), материалы Астрахань НИНПГАЗа, ТИСИЗа, ГИПРОВОДХОЗа и др. [2; 3].

Мы рассматриваем формирование пород и вод неоплейстоценового комплекса, начиная с этапа седиментации. Большое внимание уделяется анализу развития неоплейстоценовых бассейнов Каспия и обстановок осадконакопления, механизмов дифференциации осадочного материала, а также фациальному, палеогеографическому и палеогидрогеологическому анализу.

Использованы статистические методы систематизации данных, методы схематизации, типизации, районирования, математическое моделирование. Для анализа проявлений многоуровневых геодинамических систем в верхней части гидrolитосферы и ландшафтно-геоморфологических условий, включая вопросы геотермии, привлечены литературные данные.

Результаты и их обсуждения

Анализ развития неоплейстоценовых бассейнов Каспия и обстановок осадконакопления позволил сделать фундаментальный вывод о гетерогенном характере строения изучаемого водоносного комплекса. Генерализацией выявленных закономерностей является типизация литолого-геофильтрационного строения водоносного комплекса и районирование региона исследования по типам строения водоносного комплекса неоплейстоцена [2]. Нами была выявлена закономерная взаимосвязь мощности водоносного пласта с его проводимостью, химическим составом и комплексом показателей литолого-геохимических и водно-физических характеристик, которую мы интерпретируем как следствие деятельности стоковых течений в обстановках палеоделът и аванделът. В этой связи необходимо выяснить происхождение ландшафтно-геоморфологических особенностей региона. С этой целью мы анализируем проявления геодинамических систем разных уровней.

Неравномерность увлажнения территории определяется изменениями баланса инфильтрационно-конденсационного питания и испарения, которые зависят от геоморфологических условий, характера почв и растительности, литологического состава и фильтрационных свойств пород зоны аэрации, антропогенного воздействия и других факторов [3]. Детальная схема, составленная по данным дешифрирования аэрофотоснимков, позволяет наблюдать ландшафтно-геоморфологический рисунок, по всей видимости, отражающий систему зон геодинамической неоднородности в масштабе от нескольких сотен метров до первых километров (Рис. 1). Линейно вытянутые структуры неустойчивого напряженно-деформационного состояния геологической среды чередуются с относительно стабильными блоками и составляют своеобразную сеть. Это необходимо учитывать в модели формирования водоносного комплекса.

По данным электроразведки, в солевом комплексе (P_{1kg}) выявлена система линейно вытянутых солянокупольных структур и межкупольных депрессий (Рис. 2). Она имеет неплохо выраженную периодичность с шагом 4–8 км, ориентирована, как и речная сеть, с северо-запада на юго-восток.

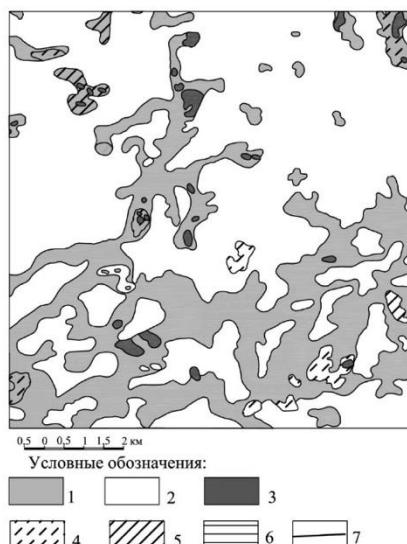


Рис. 1 План-схема распределения морских закрепленных отложений неоплейстоцена, озерных и незакрепленных эоловых отложений голоцена в районе эксплуатационных скважин АГКМ: 1 — морские отложения Q_{IIIkv} , ассоциирующие с понижениями рельефа; 2 — эоловые отложения, преимущественно песчаные, перемещаемые ветром; 3 — озерные отложения, часто с солями, в наиболее пониженной геоморфологической позиции; 4–6 — литологический состав отложений: 4 — супеси, 5 — суглинки, 6 — глины, 7 — границы морских, эоловых и озерных отложений.

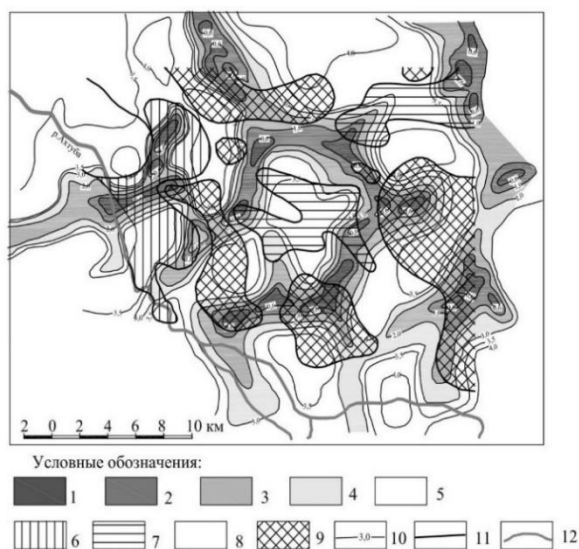


Рис. 2 Схема соотношения мощности верхнего водоносного пласта комплекса неоплейстоцена и структур солевого комплекса P_{1kg} : 1–5 — отложения P_{1kg} : 1–3 — купола-диапиры; 4–5 — мульды; глубина залегания кровли P_{1kg} в условиях 1–5, км (1 — < 0,6; 2 — от 0,6 до 1,0; 3 — от 1,0 до 2,0; 4 — от 2,0 до 3,0; 5 — > 3,0); 6–9 — районы различного строения водоносного комплекса неоплейстоцена, с разной мощностью верхнего водоносного пласта [2]: 6 — тип I.1, мощность > 20–30 м; 7 — тип II.1.1, мощность 7,5–15 м; 8 — типы строения с мощностью 2,5–7,5 м; 9 — тип II.3, мощность < 2,5 м; 10 — изогипсы залегания кровли солевого комплекса, км; 11 — границы районов разного строения водоносного комплекса неоплейстоцена; 12 — реки современной сети.

Существенные значения амплитуды глубины залегания надсолевого комплекса вверх по разрезу значительно сокращаются. Мы провели совмещение схем структур галокинеза и строения неоплейстоценового комплекса (Рис. 2). В центральной части схемы наблюдается практическое совпадение области наибольшей мощности верхнего водоносного пласта с областью Аксарайской мульды. В западной части схемы область однопластового строения водоносного комплекса во многом совпадает с областями Ширяевской и Ахтубинской мульд.

Заключение

Выявленные особенности указывают на участие геодинамических факторов в формировании водоносного комплекса неоплейстоцена региона АГКМ. Для оценки масштаба неустойчивости в подвижных зонах требуются специальные исследования (анализ движения грунтовых реперов, газовая съемка и др.). Для количественных оценок гидрогеофильтрации, выявленное строение геологической среды позволяет применять наряду с моделью сплошной среды также и модель гетерогенно-блоковой среды потока подземных вод. Для управления АГКМ полученные результаты актуальны при решении задач подтопления, загрязнения, утилизации отходов, устойчивости фундаментов сооружений при просадках и в результате воздействий агрессивных подземных вод, прогнозирования риска аварийных ситуаций.

Инициатором исследования является Клара Ефимовна Питьева, профессор кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ, возглавлявшая многолетние гидрогеологические исследования региона разработки АГКМ. Работа посвящается светлой памяти К.Е. Питевой.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ГИН РАН.

Список литературы

1. Астраханский карбонатный массив: строение и нефтегазоносность / Под ред. Ю.А. Воложа, В.С. Парасыны. М.: Научный мир, 2008. 221 с.
2. Голованова О.В., Питьева К.Е. Водоносный комплекс неоплейстоцена в регионе разработки Астраханского газоконденсатного месторождения: специфика, структуры, модели формирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. №5. С. 61-70.
3. Питьева К.Е., Голованова О.В., Меламед И.Г., Чеховских М.М. Гидрогеохимические условия водоносного комплекса плейстоцена в Нижнем Поволжье. Статья 2 // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2005. № 3. С. 62–68.
4. Хуторской М.Д., Антипов М.П., Волож Ю.А., Поляк Б.Г. Температурное поле и трехмерная геотермическая модель Прикаспийской впадины // Геотектоника. 2004. № 1. С. 63–72.

УДК 550:552.52(571.1)

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАСТОВЫХ ВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КЕРНА И ШЛАМА ЛЕСКИНСКОЙ СКВАЖИНЫ ЗАПАДНО-ТАЙМЫРСКОГО ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РАЙОНА

Е.С. Казак^{*1,2}, А.С. Семанова¹, Н.В. Морозов³, А.В. Мосеев⁴, Д.А. Севрюков⁴

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, E-mail: kanigu@mail.ru

²ООО «Фарватер», Москва

³ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург

⁴ООО «Газпромнефть-ГЕО», Санкт-Петербург

Аннотация

Западно-Таймырский потенциально нефтегазоносный район является одним из крупных поисковых кластеров компании «Газпром нефть» в Арктике. Отсутствие комплексных обобщающих научно-исследовательских работ на данной территории, в том числе гидрогеологических исследований, не позволяет надежно оценивать ее ресурсный углеводородный потенциал. Обобщение материалов гидрогеохимических исследований, полученных в результате бурения Лескинской скважины в малоизученном, но потенциально перспективном районе Западного Таймыра. Для исследования использовалась комплексная методика, включающая сочетание прямых и косвенных методов анализа. Определение содержания свободной и связанной воды было выполнено методом испарения с последующим изотопным анализом ($\delta^{18}\text{O}$ и δD). Модифицированный метод водной вытяжки позволил получить диапазон минерализации пластовой воды как по керну, так и по шламу. Верификация полученных результатов для образцов шлама проводилась по данным, полученным для свежего керна, и по результатам прямого опробования пластовых вод. Получена гидрогеохимическая характеристика пластовых вод рассматриваемого разреза Лескинской скважины Западно-Таймырского потенциально нефтегазоносного района. Совместная интерпретация полученных результатов позволила установить прямую гидрогеохимическую зональность с увеличением общей минерализации пластовых вод вниз по разрезу. Верхняя часть рассматриваемого разреза до отложений нижнего девона промыта инфильтрационными водами. Глубже залегают древние седиментационные воды различной степени метаморфизации с более тяжелым изотопным составом, имеющие низкую гидрогеологическую сообщаемость с вышезалегающими водоносными комплексами.

Ключевые слова: Палеозой, пластовая вода, изотопный состав, минерализация, водная вытяжка, керн, шлам

FORMATION WATER GEOCHEMISTRY ACCORDING TO THE INTEGRATED STUDY OF THE CORE AND CUTTINGS SAMPLES OF THE LESKINSKAYA WELL (WEST TAIMYR POTENTIAL OIL AND GAS BEARING AREA)

E.S. Kazak*^{1,2}, A.S. Semanova¹, N.V. Morozov³, A.V. Moseev⁴, D.A. Sevryukov⁴

¹Moscow State University M. V. Lomonosov, Moscow, E-mail: kanigu@mail.ru

²Fair Water LLC, RF, Moscow Gazprom-neft

³STC LLC, RF, Saint Petersburg

⁴Gazpromneft-GEO LLC, RF, Saint Petersburg

Abstract

The West Taimyr potential oil and gas bearing area is one of the major Arctic exploration clusters of Gazprom Neft. The lack of comprehensive research work in this area, including hydrogeological studies, does not allow to reliably evaluate the hydrocarbon resource potential. Analysis of hydrogeochemical research materials obtained within the Leskinskaya well drilling stage, which is a low-studied but the high potential productive region of the West Taimyr. Materials and methods. We used an integrated solution for the complex characterization of formation water using both core and cuttings samples. The workflow includes the free and bound water content measurements by the evaporation method (EM) with isotopic analysis ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of the released water and the formation of water salinity estimation using a modified method of aqueous extracts. The results of the cutting using core data were accurately verified by direct analysis of the formation water composition. For the first time, a chemical composition of the formation waters of the Mesozoic-Paleozoic deposits along the Leskinskaya well of the West Taimyr potential oil and gas bearing area was obtained. The complex interpretation of the obtained results shows that there is direct hydrogeochemical zoning with the formation water total salinity increasing down the section. The upper part of the section (up to the Lower Devonian) is washed out by the surface infiltration waters. The deeper part of the section has low hydrogeological connectivity with the overlying aquifers and includes the ancient relict waters of varying degrees of metamorphization stage and with a heavier isotopic composition.

Key Words: Paleozoic, formation water, isotopic composition, salinity, aqueous extracts, core, cuttings

Введение

Западно-Тамырский нефтегазоносный район (НГР) – труднодоступная для проведения геолого-разведочных работ северная область России, по которой на сегодняшний день накоплен сравнительно небольшой объем геологической информации. Отдельно следует отметить, что гидрогеология рассматриваемой территории в настоящее время остается практически неизученной.

Целью данной статьи является обобщение гидрогеохимических материалов исследований, полученных в пределах Лескинской скважины на этапе бурения, малоизученной и интересной области Западного Таймыра. Оценка и определение минерализации пластовой воды были выполнены с использованием разработанного комплексного подхода, комбинирующего сочетание прямых и косвенных методов определения на керне и шлама. В результате впервые удалось получить гидрогеохимическую характеристику пластовых вод по разрезу Лескинской скважины от мезозоя до палеозоя.

Методы исследований

Исследования выполнялись на целевой коллекции образцов керна, шлама и воды, полученных в ходе бурения Лескинской скважины. Целевая коллекция включала в себя 19 образцов шлама, отобранных с глубин распространения меловых (K_{1-2}), триасовых (T_1), нижнепермских (P_1) и средне-верхнедевонских отложений (D_2-D_3), 3 образца неполноразмерного керна средне-верхнедевонских отложений (D_2-D_3) без сохранения начальной водонасыщенности, 5 проб пластовых вод, 2 пробы полноразмерного керна с сохраненной водонасыщенностью и 1 пробу бурового раствора.

Оценка минерализации пластовых вод верхней части разреза проводилось на образцах шлама, из которых отбирались нераздробленные кусочки породы различного размера. С помощью трехкамерных пробоотборников поршневого типа с азотной компенсацией давления были отобраны пробы пластовых вод – 3 пробы из средне- и верхнедевонского комплекса (D_2-D_3), 2 пробы из силурийско-девонского комплекса (S_2-D_1). Для характеристики химического состава и минерализации пластовых вод нижнепалеозойских отложений использовались 2 образца полноразмерного керна, отобранных из интервала верхнего (O_3) и среднего (O_2) ордовика. Образцы сразу после отбора были запарафинированы для максимального сохранения начальной водонасыщенности.

Для исследования использовалась комплексная методика, включающая сочетание прямых и косвенных методов определения водосодержания, химического и изотопного состава пластовой воды [Kazak и Kazak, 2021].

Извлечение свободной и связанной воды из образцов шлама, керна и бурового раствора выполнялось с помощью прямого метода испарения (ИМ) на устройстве УДАВ 1.2-5, специально разработанном для слабопроницаемых пород с изначально низким водосодержанием (менее 5 масс. %) [Казак и др., 2019]. Для оценки минерализации пластовых вод использовалась модифицированная для горных пород методика водных вытяжек [Kazak и Kazak, 2021]. Содержания Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Br^- , Cl^- , SO_4^{2-} в пробах вод определялись методом жидкостной ионной хроматографии на высокоэффективном ионном жидкостном хроматографе LC-20 (Shimadzu, Япония). Содержания HCO_3^- , CO_3^{2-} измерялись титриметрическим методом с потенциометрическим фиксированием конечной точки титрования по ГОСТ 31957-2012 на системе автоматического титрования «Титрион». Измерение изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, δD) выполнялось стандартным методом на масс-спектрометре Finnigan-MAT 252 (253), воспроизводимость результатов составила в среднем $\pm 0,1$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 0,7$ ‰ для δD .

Результаты и их обсуждения

Проба воды, выделенная из бурового раствора, имеет минерализацию 10,75 г/дм³, в составе преобладают гидрокарбонат и хлорид анионы, катион натрия. Тип воды по Сулину – гидрокарбонатно-натриевый. Состав бурового раствора был сформирован в ходе смешения поверхностной воды с различными химическими реагентами, коагулянтами, ингибиторами, бентонитовыми структурообразователями и пр., содержащими карбонатные, сульфатные и хлоридные соли. Изотопный состав воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) бурового раствора ожидаемо находится на линии метеорных вод (рис. 1).

Полученный изотопный состав вод из образцов шлама из К–Р₁ комплекса и из фрагментов образцов керна D₂–D₃ комплекса характерен для подземных вод осадочных бассейнов зоны активного водообмена, где имеет место питание атмосферными и поверхностными источниками (Рис. 1). Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) вод из шлама находится рядом с линией метеорных вод (Рис. 1) и сформирован за счет смешения подземных и технических вод бурового раствора. В ходе оценки установлено, что доля природных вод в пробах воды шлама из интервала К–Р₁ изменяется от 9 до 28 %. Ниже примеси пластовой воды в пробах шлама интервала D₂–D₃ не обнаружено, что связано с поглощением бурового раствора породой при прохождении данных отложений.

Получить точную оценку минерализации и состава пластовых вод по шламу достаточно сложно, результаты требуют верификации по керну или по прямому анализу пробы пластовой воды. Однако, имеющаяся авторская методика позволяет с помощью свежего шлама оценить нижний порог минерализации пластовой воды и получить общие представления о ее химическом составе. В результате оценки обнаружено, что величина минерализации

пластовых вод по шламу изменяется для водоносных комплексов меловых отложений от 2,5 до 5 г/дм³, триасовых – от 4 до 6 г/дм³, пермских – от 7,9 до 18 г/дм³. Основными солеобразующими компонентами являются ионы натрия и хлора, содержание гидрокарбонат-иона увеличивается вниз по разрезу с 0,5 г/дм³ в меловых комплексах до 1 г/дм³ в пермских.

Определение минерализации и состава пластовых вод водоносных средне- и верхнедевонского комплексов проводилось путем прямого анализа 3-х отобранных проб воды, сепарированных из глубинных прободоборников. Пробы 1 и 3 имеют гидрокарбонатно-натриевый тип воды по Сулину и могут быть как глубинными, так и поверхностными. Результаты изотопного анализа показали (рис. 1), что в их составе присутствует техническая поверхностная вода (до 90 % и до 40 % в пробах 1 и 2, соответственно).

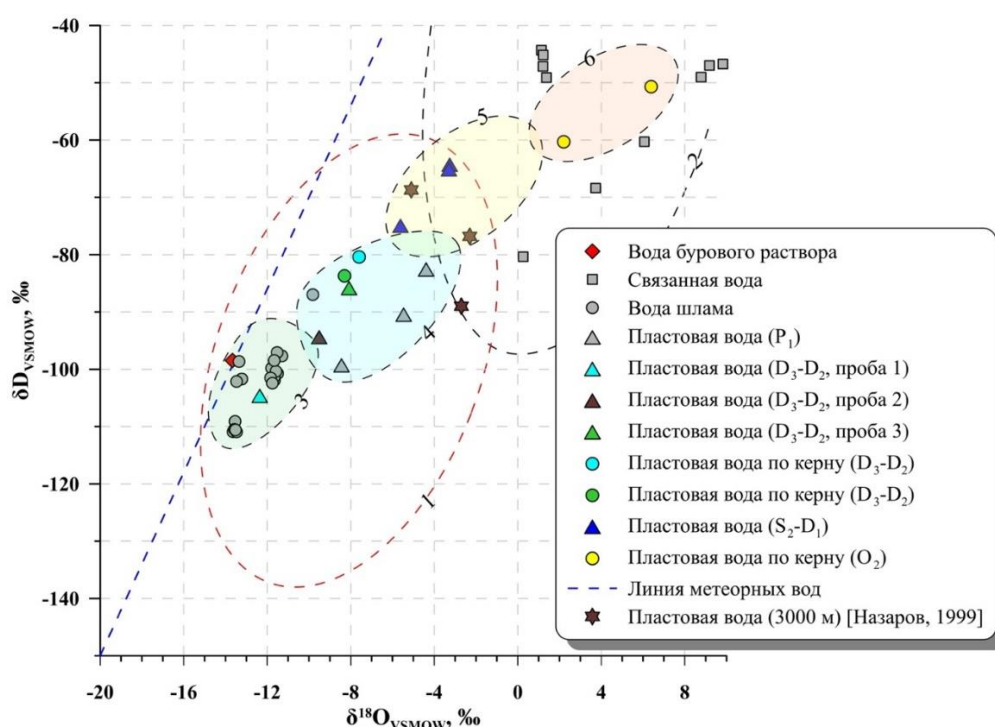


Рис. 1 Результаты изотопного анализа исследуемых вод. Ореолы: 1 — пластовые воды юрских и доюрских образований Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна [8]; 2 — пластовые воды преимущественно морского происхождения в закрытых бассейнах [9]; 3 — поверхностные воды; 4 — пластовые воды пермских и меловых комплексов (K-P₁); 5 — воды верхне-среднедевонского (D₂₋₃) комплекса; 6 — воды нижнепалеозойских отложений (ордовикский (O₃) и силурийско-девонский (S₂-D₁) комплексы).

Проба 3 имеет более тяжелый по сравнению с вышеуказанными пробами изотопный, который попадает в диапазон значений пластовых вод Западной Сибири и, важно отметить, – верифицируется с данными по воде из керна D₂-D₃ (Рис. 1). Вода имеет хлоридно-кальциевый тип по Сулину, в составе преобладают ионы натрия и хлора. По значению pH вода является слабощелочной (8,1), содержание Br⁻ составляет 28,16 г/дм³, общая минерализация – 11,91 г/дм³.

Используя изотопный состав пластовой воды, полученной из кусочков породы из шлама и фрагментов керна, и содержание Cl^- в водах бурового раствора ($2,9 \text{ г/дм}^3$), допуская смешение пластовых вод и бурового раствора только в рассматриваемом интервале, с помощью уравнения смешения был оценен диапазон минерализации пластовой воды на глубине распространения средне- и верхнедевонских отложений. Получилось, что воды по составу преимущественно хлоридно-натриевые с повышенным содержанием гидрокарбонат-иона, общая минерализация изменяется от 10 до 16 г/дм^3 . Полученные значения соотносятся с составом вод на рассматриваемых глубинах полуострова Гыдан [Битнер и Поздняков, 2017; Глаголев и др., 1994].

Пластовые воды, отобранные из силурийско-девонского комплекса $\text{S}_2\text{--D}_1$, имеют утяжеленный изотопный состав, характерный для глубинных пластовых вод закрытого осадочного бассейна преимущественно морского происхождения (рис. 1). Воды бессульфатные, с преобладанием в составе ионов натрия и хлора, с повышенным содержанием кальция. Минерализация пластовых вод составляет в среднем $52,82 \text{ г/дм}^3$, pH воды слабокислый – 6,1. В водах обнаружено высокое содержание стронция ($168,3\text{--}173,4 \text{ г/дм}^3$), аммония ($83,9\text{--}90,7 \text{ г/дм}^3$), брома ($110\text{--}113 \text{ г/дм}^3$), фтора ($0,7 \text{ г/дм}^3$). Воды характеризуются хлоридно-кальциевым типом по Сулину. Отношение rNa/rCl составляет 0,68, $\text{Ca/Cl} = 0,23$, $\text{r(CO}_3\text{+HCO}_3\text{)/r(Ca+Mg)} = 0,04$, $\text{Br}\cdot 1000/\text{Cl} = 3,5$. Рассматриваемый рассол находится на начальной стадии метаморфизации своего химического состава.

Результаты анализа полноразмерного керна отложений верхнего ордовика (O_3) показали, что он в своем составе содержит преимущественно кварцевые (61 масс.%) и карбонатные минералы (30 масс.%), количество глин крайне мало (менее 5 масс.%). Образец не содержит свободной воды, количество связанной воды менее 0,1 масс.%, имеет очень низкое содержание водорастворенных солей (минерализация водной вытяжки $0,08 \text{ г/дм}^3$). Все это указывает на его водоупорные свойства в разрезе скважины.

По данным метода испарения образец керна из отложений среднего ордовика (O_2) характеризуется содержанием воды около 1,23 масс.%, при этом содержание связанной воды составляет 0,28 масс.%. Минеральный состав пород представлен кварцевыми (56 масс.%), карбонатными (37 масс.%) и глинистыми минералами (около 7 масс.%). Минерализация вод по данным модифицированного метода водных вытяжек составляет $75,21 \text{ г/дм}^3$, при этом вода преимущественно хлоридная натриевая с повышенным содержанием кальция, имеет хлоридно-кальциевый тип по Сулину. Вода характеризуется существенным изотопным сдвигом по кислороду и водороду в область утяжеления (Рис. 1), что указывает на ее преобразование в ходе длительного взаимодействия захороненных седиментационных вод с вмещающей породой (в том числе содержащей карбонатные минералы) при высокой температуре и малых отношениях вода/порода.

Для оценки релевантности полученных значений минерализации пластовой воды в интервале отложений D₁₋₂ выполнено сопоставление водонасыщенности, рассчитанной по методике Арчи-Дахнова, с водонасыщенностью на керне. Данное сопоставление показало хорошую сходимость оценок водонасыщенности по электрической модели с использованием полученного значения минерализации пластовой воды с остаточной водонасыщенностью на керне.

Заключение

Безусловно, сложность геологических условий Гыданского полуострова находит свое отражение в гидрогеохимических особенностях вертикального распространения вод различной минерализации и состава. Приведенные выше данные показывают, что в целом в исследуемом районе Лескинской скважины наблюдается нормальный тип вертикальной гидрогеохимической зональности, сопровождающийся увеличением минерализации пластовых вод с глубиной. В верхней части разреза, в области распространения пород К–Р₁ подземные воды солоноватые, с общей минерализацией <7 г/дм³. Далее в отложениях верхнего и среднего девона их минерализация увеличивается до 16–18 г/дм³. По результатам изотопного анализа верхняя часть разреза на исследуемой территории промыты инфильтрационными водами. В нижележащей части геологического разреза в отложениях силурийско-девонского (S₂ – D₁) комплекса минерализация пластовых вод увеличивается до 52,82 г/дм³, а уже в отложениях среднеордовикского комплекса O₂ – до 75,21 г/дм³, кроме того, наблюдается рост степени метаморфизации химического состава вод с глубиной. Изотопный состав вод на данной глубине более утяжелен и сформирован в ходе изотопно-литогенного обмена седиментационных вод с породой при изменяющихся РТ-условиях. Такое различие в величинах солёности и изотопном составе подземных вод говорит о низкой гидрогеологической сообщаемости рассматриваемых водоносных комплексов и указывает на наличие выдержанных водоупорных отложений между ними. Так, между ордовикским и силурийско-девонским комплексом обнаружены выдержанные водоупорные глинисто-карбонатно-кремнистые отложения нижнесилурийской нефтегазоматеринской породы усть-енисейской свиты (S_{1ue}) мощностью более 200 м. Силурийско-девонский комплекс отделен региональной водоупорной толщей аргиллитов, переслаивающихся с плотными известковистыми доломитами, общей мощностью более 100 м. Средне-верхнедевонский комплекс от вышележащих отложений перекрыт, скорее всего, локальным водоупором, сложенным плотными карбонатно-глинистыми отложениями нижнего карбона. Обнаруженный по данным изотопного анализа (Рис. 1) след инфильтрационных вод в составе пластовых вод D₁₋₂ комплекса может указывать на наличие гидрогеологических окон в локальном водоупоре нижнего карбона.

Список литературы

1. Битнер А. К., Поздняков В. А. Новые технологии геологической разведки. Месторождения углеводородов Сибирской платформы и прилегающих территорий, Красноярск, СФУ. – 2017. – 322 с.
2. Глаголев П. Л., Мазанов В. Ф., Михайлов М. П. Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского прогиба, М., ИГиРГИ. – 1994. – 118 с.
3. Казак Е. С., Казак А. В., Сорокоумова Я. В., Алексеев А. Д. Оптимальный метод определения водосодержания нефтегазоматеринских пород баженовской свиты Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. – 2019. – Т. 7. – С. 73-78.
4. Kazak E. S., Kazak A. V. An Integrated Experimental Workflow for Formation Water Characterization in Shale Reservoirs: A Case Study of the Bazhenov Formation // SPE J. – 2021. – Vol. 1. – P. 1-16.

УДК 551.263

МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ В РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НА ПРИМЕРЕ РАВНИННОГО ДАГЕСТАНА

М.М. Меликов^{*1}, Я.М. Меликов²

¹Институт геологии ДФИЦ РАН, E-mail:melikov1958@yandex.ru

²ДГУ(ИЭи УР), E-mail:yasin3@inbox.ru

Аннотация

В работе с целью обоснования рекомендаций методов и технологий повышения нефтегазоотдачи месторождений углеводородов Дагестана проведен анализ результатов и опубликованных данных по разработке месторождений, также были использованы данные Государственного баланса запасов. Разработка рекомендаций выполнена исходя из физико-химических свойств углеводородов (УВ), особенностей динамики подземных вод, а также с учетом вибросейсмического воздействия на пласты и теплофизических условий.

Ключевые слова: нефтегазоотдача, гидродинамические, вибросейсмические методы, балансовые и остаточные запасы, ресурсы, нефть, газ, газоконденсат, обводненность, энергетический потенциал, фильтрация, динамика.

METHODS FOR INCREASING OIL RECOVERY IN PRODUCED OIL AND GAS FIELDS ON THE EXAMPLE OF PLAIN DAGESTAN

M.M. Melikov^{*1}, Ya.M. Melikov²

¹Institute of Geology of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
E-mail:melikov1958@yandex.ru

²DSU (IE&UR), E-mail:yasin3@inbox.ru

Abstract

The paper analyzes the development of deposits in Dagestan and the published material, and also uses data from the State balance reserves to substantiate the recommendations of methods and technologies for increasing oil and gas recovery from deposits, based on the physicochemical properties of hydrocarbons and groundwater dynamics, in particular, hydrodynamic, vibroseismic effects on formations and heat-physical.

Key Words: oil and gas recovery, hydrodynamic, vibroseismic methods, balance and residual reserves, resources, oil, gas, gas condensate, water cut, energy potential, filtration, dynamics

Введение

Негативные тенденции, отмечаемые специалистами нефтегазового комплекса России, связанные с отставанием воспроизводства минерально-сырьевой базы и продолжающимся падением показателей нефтеотдачи, вызывают особую тревогу. В отрасли уже ряд десятилетий идет постоянное падение среднего проектного коэффициента извлечения нефти (КИН), который с 51% в 1960 г. уменьшился до 25-28% в последние 10-15 лет нашего столетия. Только за счет низкого КИН потенциальные извлекаемые запасы нефти в РФ уменьшились на 15 млрд тонн [7]. Такая ситуация сложилась из-за многолетнего недофинансирования и снижения объемов геологоразведочных работ (ГРП). Тенденция роста в высокой потребности УВ сырья и мировых цен на нефть приводят к активизации исследований методов повышения нефтегазоотдачи в разрабатываемых месторождениях и пластах. Извлечение остаточной нефти из эксплуатируемых пластов в современном мире является актуальной проблемой [2].

Эффективность извлечения нефти из нефтеносных пластов современными, промышленно освоенными методами разработки во всех нефтедобывающих странах на современном этапе считается неудовлетворительной. В среднем, нефтеотдача пластов по различным странам и регионам колеблется в пределах 25-40%.

Остаточные или неизвлекаемые промышленно освоенными методами разработки запасы нефти достигают в среднем 55-75% от первоначальных геологических запасов в недрах (Рис.1) [7].

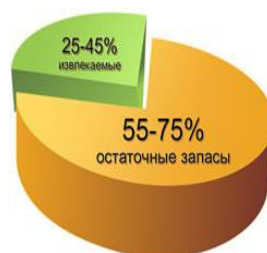


Рис. 1 Соотношение извлекаемых и остаточных запасов УВ в мире [2].

Для решения проблемы прироста запасов УВ необходимо инвестирование поисково-оценочных и геолого-геофизических работ, а также применение самой совершенной геофизической аппаратуры, широкой комплексности проводимых исследований и системного подхода в анализе и обобщении обширного фактического материала с использованием всех имеющихся данных по сейсморазведке и бурению, а на разрабатываемых месторождениях данных по разработке. В последние годы, к сожалению, в Дагестанском секторе Восточного Предкавказья такие работы не проводятся.

Максимального значения (пик Хабберта) добыча УВ в Дагестане достигла в 1970 г. (нефть – 1600 тыс.т., газ – 2,178 млн. м³), после чего стабильно начала падать. В Дагестане, практически все месторождения находятся на последней стадии разработки, а падение добычи происходит по аналогии графика Хабберта (Рис. 2), в связи с чем требуется применение новых

методов и технологий по увеличению нефтегазоотдачи. В такой ситуации необходимо провести поиски третичных методов.

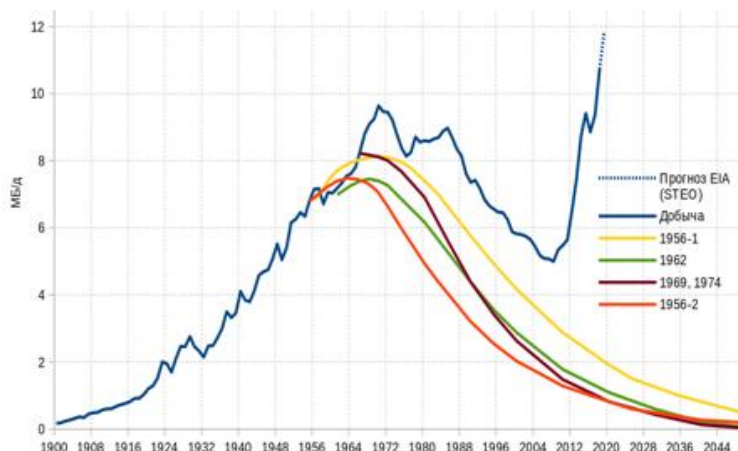


Рис. 2 График Хабберта (добыча нефти в США.) [2].

Научно-исследовательскими институтами нефтегазовой отрасли разработано, испытано и сдано более 60 методов и технологий, направленных на повышение нефтеотдачи пластов физико-химическими методами и на вытеснение нефти разнообразными составами, растворами и соединениями.

С целью рекомендуемых методов увеличения нефтеотдачи (МУН) нами проведен анализ опубликованных и фондовых материалов по разработке и технико-экономическим показателям, данных Государственного баланса запасов (ГБЗ) за последние 2 года, который свидетельствует о падении количества разрабатываемых месторождений, а также высокой степени их обводненности (от 85 до 98%) и большой выработанностью (50-70%) их запасов, при этом текущий КИН составляет всего доли единиц. Эта тенденция будет нарастать, если не принимать радикальные меры, в частности, не проводить доразведку с применением высокоточной сейсмики или новых методов и технологий по МУН.

Краткая характеристика технико-экономических показателей и состояние разработки месторождений Дагестана

В 2018-19 гг. коэффициент эксплуатации действующего фонда скважин составил 0,95, при плановом — 0,97. Невыполнение плана связано со снижением дебитаовнефти в скважинах ряда месторождений из-за высокой обводненности пластов.

В качестве примера рассмотрим три месторождения. Для месторождения Восточно-Сухокумское текущие коэффициенты извлечения нефти (КИН) низкие — 0,178, степень выработанности — 51 %, обводненность, практически, достигает 100%. А для месторождения Восточно-Юбилейное КИН — 0,30 долей единиц, степень выработанности — 80 %, обводненность — 85-90 %. Для месторождения Русский Хутор текущий КИН — 0,43 доли единиц, степень

выработанности составляет 50-60 %, обводненность – 90-95 %. Практически, на всех месторождениях проводят размещение воды попутной воды. И такая ситуация характерна для большинства месторождений Равнинного Дагестана.

Таким образом, КИН для месторождений Дагестана характеризуется низкими долями единиц и выработанностью – 50-85 %, а также высокой обводненностью – до 98%. (Рис. 3-4).

При водонасыщенности более 20 % фазовая проницаемость для нефти резко снижается, хотя и продолжается получение безводной нефти. Это объясняется тем, что за счет молекулярно-поверхностных сил вода удерживается в мелких порах и на поверхности зерен песка в виде тонких пленок, тем самым уменьшая площадь сечения фильтрационных каналов. При достижении водонасыщенности 80% фильтрация нефти прекращается, хотя еще в пласте имеется нефть. Поэтому нельзя допускать преждевременного обводнения скважин, необходимо предупреждать попадание воды в призабойную зону при вскрытии пласта в процессе проведения ремонтных работ [2].

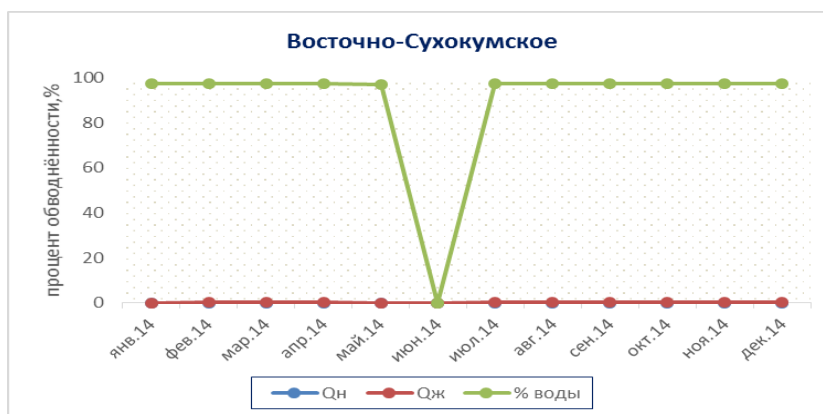


Рис. 3 Изменение добычи нефти, жидкости, содержания воды в продукции.



Рис. 4 Изменение добычи нефти, жидкости, содержания воды в продукции.

Картина высокой обводненности месторождений наблюдается на всей территории

Прикумской нефтегазоносной области. Очень часто происходят аварии в скважинах, в результате чего приходится остановить и проводить ремонтные работы, еще чаще останавливают скважины из-за высокой обводненности, или из-за затрубных перетоков воды из выше- или нижележащих пластов [2; 4- 6; 8-10].

С целью повышения нефтеотдачи проводится, в основном, кислотная (СКО) обработка эксплуатационных скважин, что в данной ситуации является малоэффективным.

Рекомендуемые методы увеличения нефтеотдачи

Исходя из физико-химических свойств УВ, пористости, проницаемости и литологического типа коллекторов, динамики подземных вод (схематическая карта энергетических потенциалов (Рис. 5) [4], предлагаются гидродинамические методы увеличения нефтеотдачи, т.к. этот метод является одним из самых эффективных и актуальных в данной ситуации. Гидродинамические методы имеют несколько видов, из которых основными являются: циклическое заводнение, изменение направлений фильтрационных потоков, форсированный отбор жидкости. Суть нестационарного (циклического) заводнения заключается в создании в пластах искусственного нестационарного давления методом периодического изменения режима эксплуатации залежи периодической остановкой и возобновлением закачки воды, что способствует проникновению воды в области пласта, ранее не подвергнутые воздействию. Метод изменения направлений фильтрационных потоков применяется для вовлечения в разработку застойных (или менее интенсивного движения), не охваченных заводнением зон пласта, для чего необходимо изменить общую гидродинамическую обстановку в залежи, достигающуюся перераспределением отборов и закачки воды по скважинам. В результате изменения закачки меняются направленность и величины градиентов давления, за счет чего, на ранее не охваченные заводнением участки, воздействуют более высокие градиенты давления, и нефть из них вытесняется в заводненную, проточную часть пластов, вследствие чего и достигается увеличение нефтеотдачи. Метод форсированного отбора жидкости основывается на увеличении градиентов давления и скорости фильтрации, вследствие чего текущая добыча и нефтеотдача возрастают [5-8].

С целью обоснования применения гидродинамических методов повышения нефтеотдачи нами использовались результаты гидродинамических исследований для мезозойского гидрогеологического этажа, горизонты и комплексы которого являются нефтегазоносными. Мезозойская водонапорная система рассматривается как совокупность фильтрационно-анизотропных блоков, ограниченных разрывными нарушениями с сочетанием горизонтального и вертикального типов водообмена.

Поскольку мы принимаем положение, что зоны разгрузки (пъезоминимумы) являются потенциальными участками скопления УВ, для оценки возможных зон их скоплений и

выяснения общей картины направления движения подземных вод выполнен сравнительный анализ энергетических потенциалов пластовых вод и нефти и построены схематические карты с использованием гидродинамических показателей для первоначального этапа разработки месторождений УВ (Рис. 5) [3].

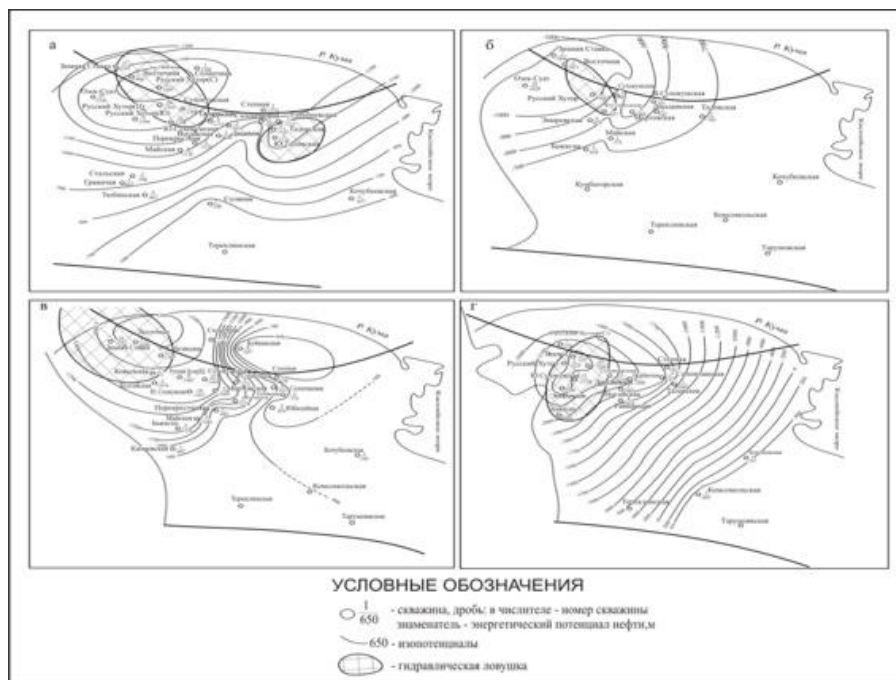


Рис. 5 Схематические карты энергетических потенциалов нефти мезозойского гидрогеологического этапа [7]. Водоносные горизонты: а – неокомский; б – верхнеюрский карбонатный; в – келловейский; г – байос-батский.

Анализ и сопоставление карт приведенных напоров подземных вод и энергетических потенциалов УВ водоносных комплексов мезозойских отложений позволяет в первом приближении рекомендовать применение всех трех, вышеперечисленных методов: циклическое заводнение, изменение фильтрационных потоков и форсированный отбор жидкости. Однако, для более точного и окончательного решения о применении этих методов, необходимо детально изучить гидрогеологию Прикумской нефтегазоносной области с позиций разработки месторождений УВ.

Распределение напоров и энергетических потенциалов, характеризующих область сочленения Предкавказской эпигерцинской платформы и Терско-Каспийского передового прогиба, свидетельствует о снижении их величин от краевого прогиба к платформенной части, исходя, из чего можно рекомендовать метод «изменения фильтрационных потоков».

Также, одним из перспективных методов повышения нефтеотдачи для обводнённых месторождений, находящихся на поздней стадии разработки, является вибросейсмическое

воздействие (ВСВ) на нефтегазовые пласты, разработанный в ИПНГ РАН (Рис. 6). В течение последних лет, по данным опубликованной научно-технической литературы, ВСВ применялось на 12 месторождениях РФ, и в результате обеспечивалась дополнительная добыча нефти на участке, охваченном ВСВ [9].



Рис. 6 Вибрационный метод увеличения нефтеотдачи [4].

Остаточная нефть в пластах удерживается главным образом в трех видах:

- пленочная нефть на стенках капилляров и трещин;
- нефть в виде рассеянных ганглий (узел, скопление), зацементированных в породе;
- нефть в виде не вовлеченных в разработку нефтенасыщенных зон (целиков), обтекаемых со всех сторон вытесняющим агентом (водой) или запертых в тупиках контура нефтеносности.

Одним из немногих методов, воздействующих на все три вида остаточной нефти, является ВСВ. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что флюидонасыщенный пласт можно рассматривать как блочно-иерархическую структуру с различными размерами геоблоков (для карбонатных коллекторов – до 30 см, для терригенных – до 1-3 м), разделенные трещинами, заполненными флюидом, и находящимся в различном напряженном состоянии. Такая структура обладает следующими свойствами [6]:

- существуют доминантные (квазирезонансные) частоты, на которых происходит увеличение амплитуд колебаний геоблоков;
- в структуре геоблоков возникают низкоскоростные (300-600 м/с) деформационные и маятниковые волны;
- возникает эффект аномально низкого трения из-за уменьшения площади контакта в режиме маятниковой волны и из-за соразмерности рельефа шероховатости поверхности геоблока с амплитудно-фазо-частотными характеристиками деформационных волн.

Полная методика применения ВСВ приводится в работе [9].

Для месторождений, содержащих нефти с высокой вязкостью и высоким содержанием смол, асфальтенов и парафина, нами рекомендуются комплекс методов из ВСВ и теплофизических методов.

Выводы

Исходя из вышеизложенного и состояния изученности региона, к задачам ближайшего будущего нефтегазовой геологии и гидрогеологии следует отнести разработку и усовершенствование гидродинамических методов увеличения нефтеотдачи, учитывая направление движения подземных вод и геолого-промысловых параметров месторождений.

Остаточные запасы УВ в республике Дагестан есть, но новых методов и технологий применения МУНа нет. Необходимо провести более детальное исследование гидрогеологических условий нефтегазообразования и геолого-промысловых характеристик разрабатываемых месторождений с учетом физико-химических свойств УВ.

Применяя все вышеперечисленные методы и технологии по повышению конечной нефтегазоотдачи, имеются реальные возможности извлечения остаточных запасов нефти и газа и, тем самым способствовать приросту запасов УВ и наращиванию топливно-энергетического потенциала республики.

Список литературы

1. Алексеев, А. С. и др. Вынужденные колебания трещиновато-блочных флюидонасыщенных слоев при вибросейсмических воздействиях //ФТПРПИ. – 2001. –№ 6. – С. 3–13.
2. Бойко В.С. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений: учеб. для вузов. - М.: Недра, 1990. - 427 с.
3. Боксерман А.А., Мищенко И.Т. «Пути преодоления негативных тенденций развития НГК России» //«Технологии ТЭК», №4 (29), с.30, 2006.
4. Бурьян Ю. А., Сорокин В. Н. Вибросейсмическое воздействие на нефтегазовые пласты – технология XXI века //«Национальные приоритеты России». № 1, 2009. С. 78-83.
5. Источник: Neftegaz. RU
6. Курленя, М. В. И др. Волны маятникового типа. Ч. II. Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования. //ФТПРПИ. – 1996. – № 4. – С. 3-39.
7. Меликов М.М. Гидрогеологические условия формирования и размещения залежей углеводородов мезозойских отложений Прикумской нефтегазоносной области Восточного Предкавказья. «Проблемы гидрогеологии XXI в: Наука и образование» //Сб. докладов конференции, посвященной 60-летию кафедры гидрогеологии МГУ им М.В.Ломоносова. Макс-пресс, Москва, 2013г.С.113-123.
8. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи. - М.: Недра, 1985. - 308 с.
9. Сургучев М.Л., Горбунов А.Т. Методы извлечения остаточной нефти. - М.: Недра, 1991. -347
10. Сургучев М.Л., Шарбатова И.Н. Циклическое воздействие на неоднородные нефтяные пласты. - М.: Недра, 1988. - 121 с.

УДК 533.98

МЕТАЛЛОНОСНЫЕ РАССОЛЫ И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ ДОПЛИТНОГО КОМПЛЕКСА СКИФСКО-ТУРАНСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

И.В. Попков*¹, В.И. Попков¹

¹Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия, E-mail: geoskubsu@mail.ru

Аннотация

Приведены результаты исследований макро- и микрокомпонентного состава пластовых вод нефтегазоносных бассейнов Скифско-Туранской платформы. Рассматриваются особенности распространения и условия формирования глубинных металлоносных рассолов в нижних структурных этажах молодой платформы. Обосновывается их глубинный генезис. Показано, что поступление металлоносных рассолов и опресненных вод в осадочный чехол платформы является составной частью единого и непрерывного процесса дегазации Земли.

Ключевые слова: гидрогеология, гидрохимическая инверсия, флюидодинамика, глубинная дегазация, нефтегазоносность

METAL-BEARING BRINES AND OIL AND GAS POTENTIAL OF THE ADDITIONAL COMPLEX OF THE SCYTHIAN-TURANIAN PLATFORM

I.V. Popkov*¹, V.I. Popkov¹

¹Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, E-mail: geoskubsu@mail.ru

Abstract

The results of studies of the macro- and micro-component composition of reservoir waters of oil and gas basins of the Scythian-Turanian platform are presented. The features of distribution and conditions of formation of deep desalinated waters and metal-bearing brines in the lower structural floors of the young platform are considered. Their deep genesis is substantiated. It is shown that the flow of metal-bearing brines and desalinated waters into the sedimentary cover of the platform is an integral part of a single and continuous process of degassing the Earth.

Key Words: hydrogeology, hydrochemical inversion, fluid dynamics, deep degassing, oil and gas content

Введение

Попутные и пластовые воды нефтяных и газовых месторождений могут содержать в повышенных количествах промышленно ценные компоненты и их соединения. В основном это йод, бром, бор, стронций, литий, рубидий, цезий, германий, калий, натрий, магний, кальций и др. Более того, эти воды могут служить источником хлоридов натрия, кальция, реже калия и магния, стоимость которых в единице объема исходного сырья зачастую во много раз превышает суммарную стоимость редких элементов. В них также в повышенных концентрациях также обнаружены ртуть, галлий, хром, марганец и другие редкие и рассеянные элементы [1–5].

Учитывая важность этих вопросов, а также факт наличия притоков воды из доюрских горизонтов Скифско-Туранской платформы с промышленной концентрацией ряда щелочных и щелочноземельных металлов, было продолжено начатое нами в предыдущие годы [2–7] изучение генезиса подземных вод.

Методы исследований

В основу работы положены многие сотни данных химических анализов макро- и микрокомпонентного состава пластовых флюидов, испытаний поисково-разведочных скважин, замеров пластовых давлений и температур. Для изучения емкостно-фильтрационных свойств пород проанализированы данные петрофизики, каротажные диаграммы. Детально исследованы особенности строения отдельных месторождений нефти и газа.

Результаты и их обсуждения

В вертикальном разрезе Скифско-Туранской платформы выделяется два гидрогеологических этажа: верхний, где получили развитие инфильтрационные водонапорные системы, и нижний, преимущественного развития седиментационных и литогенных вод. В верхнем этаже, охватывающим юрско-неогеновый стратиграфический интервал, происходит увеличение минерализации и содержания большинства микро- и макрокомпонентов. В нижнем палеозойско-триасовом гидрогеологическом этаже на многих площадях отмечено резкое понижение минерализации вод [2; 4; 5]. Наиболее контрастно инверсия вертикальной химической зональности подземных вод выражена в западной части Прикумской нефтегазоносной области Восточно-Предкавказского артезианского бассейна (ВПАБ), Жетыбай-Узенской и Песчаномысско-Ракушечной зонах нефтегазонакопления Южно-Мангышлакского артезианского бассейна (ЮМАБ). Степень понижения минерализации пластовых вод в триасовых и палеозойских коллекторах по сравнению с вышележащими горизонтами достигает 7–8 раз, а на отдельных площадях – на порядок и выше.

Наблюдаемая инверсия носит сложный характер и проявляется в пределах разбуренных площадей в разной степени. Как правило, это мозаичный характер распространения вод пониженной минерализации как в плане, так и в разрезе отложений триаса и палеозоя. Например, для ВПАБ отмечены зоны, в пределах которых минерализация пластовых вод нефтекумской свиты нижнего триаса меняется от 20–30 до 120–130 г/л. Для ЮМАБ также свойственна мозаичная гидрохимическая зональность доюрского комплекса, причем минерализация вод триасовых отложений меняется в пределах региона от 5 - 20 до 160 г/л [2; 4], нередко на незначительном расстоянии по простиранию пласта.

В частности, на месторождении Южный Жетыбай (ЮМАБ) в юрской серии регионально выдержанных водоносных горизонтов и комплексов получили развитие хлоркальциевые высокоминерализованные рассолы с минерализацией 129,1–165,3 г/л, в которых отмечены высокие концентрации (мг/л): калия – до 1500, брома – 156–560, бора – до 52, йода – 15–43, аммония – 47–159, нефтяных кислот – до 7,5.

Подземные воды триасовых отложений в пределах этого месторождения вскрываются на глубинах от 2900 до 4100 м и характеризуются значительными колебаниями минерализации – от 1,1 (скв. 22) до 157 г/л (скв. 15). Воды, как правило, имеют повышенные содержания гидрокарбонатов, сульфатов, повышенные значения рН и пониженные концентрации кальция, магния, йода, брома и относятся к различным генетическим типам: гидрокарбонатно-натриевому и хлоркальциевому. В отличие от вод юрских горизонтов, в которых не проявляется каких-либо закономерностей в распределении минерализации, как по площади, так и по разрезу, для вод доюрского комплекса установлена довольно четко выраженная плановая зональность [6].

В пределах месторождения хорошо фиксируются два «купола» с минимумом минерализации: западный, Каржауский и восточный Нормаульский, совпадающими с локальными поднятиями, к западу и востоку от которых минерализация вод возрастает до 25–48,5 г/л, а к северу – до 157–159 г/л (скв. 31, 15, 14). На юге эта закономерность нарушается крупным разломом, осложняющим южное крыло, и являющимся тектоническим экраном. При этом одновременно с ростом минерализации происходит и изменение типов вод. Так, в центральной части месторождения (скв. 26, 22, 25, 23) получили развитие воды гидрокарбонатно-натриевого типа, который при удалении к крыльям и периклиналям изменяется на хлоркальциевый.

Отмеченная выше плановая гидрохимическая зональность пластовых вод доюрского комплекса наблюдается на многих детально разбуренных месторождениях нефти и газа: Северо-Ракушечное (Песчаномысско-Ракушечный свод), Тасбулат (Жетыбай-Узеньская ступень), Северное Карагие (Карагийнская седловина) и многих других (Тенге, Западное Тенге, Каменистое) [6].

Помимо этого, в пределах перечисленных выше месторождений отмечается также плановая гидродинамическая зональность, проявляющаяся в постепенном снижении величины коэффициента негидростатичности (Кнг) от свода к крыльям и периклиналям. В сводовых скважинах, в которых зафиксированы минимальные значения минерализации пластовых вод триасового комплекса, отмечаются максимальные величины коэффициента негидростатичности, составляющие 1,1–1,4. К крыльям структур рост минерализации вод сопровождается снижением Кнг до 1,0–0,98 [2; 6].

Примечательно, что для ВПАБ и ЮМАБ не отмечено связи между глубиной залегания доюрских коллекторов и минерализацией пластовых вод. В нижней части осадочного разреза и породах фундамента данных бассейнов отмечены как положительные, так и отрицательные гидрохимические аномалии по стронцию, литию, рубидию, цезию и йоду относительно рассолов перекрывающих юрских горизонтов сходной минерализации и химического состава. В целом же для вод отложений триаса и палеозоя, в случае снижения минерализации, доминирующей является тенденция к уменьшению концентрации перечисленных элементов (за исключением редких щелочных металлов). Однако в пределах ряда структур отмечены контрастные гидрохимические аномалии (КГА), характеризующиеся резким (до двух порядков) возрастанием содержания рубидия, цезия, стронция, а в некоторых случаях и йода, независимо от изменения минерализации и микрокомпонентного состава пластовых вод [3; 4; 5].

Наиболее ярко выраженные КГА ЮМАБ и ВПАБ (структуры Стальская, Мартовская, Байджан, Эбелекская и Оймаша) отмечены в зонах прорыва фундамента гранитными интрузивами. В вышележащих юрских и меловых коллекторах аномалии подобного рода не обнаружены за исключением тех случаев, когда доюрские осадочные породы в разрезе отсутствуют (структура Стальская, ВПАБ).

Проведенные исследования [4–7] позволяют говорить о том, что формирование КГА не связано с изменением химического состава пластовых вод в процессе катагенетических преобразований. В рассматриваемых случаях в природе КГА следует предположить ее глубинную (ювенильную или метаморфогенную) составляющую. Увеличение концентраций цезия и рубидия на порядок и два в водах отложений триаса и палеозоя по сравнению с пластовыми рассолами аналогичного химического состава и равной (или большей) минерализации свидетельствует только о наличии источника этих металлов вне области формирования химического состава подземных вод, так как в противном случае наблюдалась бы связь между изменениями содержаний микрокомпонентов с минерализацией и макрокомпонентами этих вод. В зонах же КГА исследуемых регионов никаких связей между этими величинами не установлено [6].

Примечательно, что КГА характерны только для доюрской части разреза (исключением является, как отмечалось выше, Стальская площадь), в то время как для вышележащих

горизонтов и комплексов свойственна сравнительная однородность микро- и макрокомпонентного состава пластовых вод. Как правило, в верхней части разреза НГБ (юра–мел) редкие щелочные металлы и стронций образуют устойчивые корреляционные связи с макрокомпонентами и друг с другом, в то время как в нижней они либо ослабевают, либо отсутствуют [4].

В пределах ВПАБ, ЮМАБ и других бассейнов молодой платформы в верхних горизонтах платформенного чехла наиболее распространенными являются корреляционные связи редких щелочных металлов и стронция с минерализацией и глубиной (h). Исключение составляют пары Sr-H (ВПАБ), Rb-H (ЮМАБ). Для нижних частей разреза отмечено отсутствие значимых корреляционных связей (коэффициенты парной корреляции не достигают критического значения) между литием и цезием, рубидием и цезием, литием и стронцием, цезием и стронцием, в то время как для верхней части НГБ в целом эти связи весьма устойчивы [4].

Инверсионная зональность химического состава подземных вод рассматриваемых НГБ проявляется и в изотопном составе водорода [4]. Если воды юрских горизонтов ВПАБ и ЮМАБ характеризуются значениями $\delta D = -42...-44$ ‰, то для вод доюрских отложений отмечено обеднение дейтерием: $\delta D = -55...-60$ ‰. Фигуративные точки изотопного состава пластовых вод юрских и триас-палеозойских толщ попадают, в основном, в область состава талассогенных вод. Наблюдаемый сдвиг изотопного состава вод нижней части разреза артезианского бассейна в сторону линии Крейга может быть связан с изотопным обменом седиментационных вод с глубинными углекислотой и водородом, приводящим, как известно [1; 4; 8; 9], к облегчению изотопного состава кислорода и водорода воды.

Конкретная геологическая обстановка территории не позволяет связывать аномально высокие концентрации редких щелочных металлов в пластовых водах глубоких горизонтов с их привносом в инфильтрогенных водах [4]. Наблюдаемый сдвиг изотопного состава кислорода и водорода металлоносных вод ВПАБ и ЮМАБ связан с их глубинным генезисом [6; 7].

Заключение

1. Проведенные исследования показали, что поступление металлоносных (интрателлурических) флюидов в верхние горизонты земной коры является составной частью единого и непрерывного процесса глубинной дегазации Земли [7].

2. Попутные воды месторождений углеводородов могут представлять практический интерес. По сравнению с традиционными видами сырья подземные промышленные воды обладают таким преимуществом, как минимальные затраты на их освоение и возможность отбирать одной скважиной огромные объемы поликомпонентных водных растворов с большой площади. При этом добыча их может осуществляться попутно с разработкой основного

полезного ископаемого, а затраты на строительство скважин в таких случаях относятся к основному производству.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00037.

Список литературы

1. Креницкий А.А., Самодуров Л.К. Геохимия щелочных металлов в процессе регионального метаморфизма // Геохимия. 1979. № 10. С. 1146–1148.
2. Ларичев В.В., Попков В.И. Гидрогеология доюрских отложений Южного Мангышлака / Ставрополь: СевКавГТУ, 2003. 144 с.
3. Ларичев В.В., Попков В.И., Попков И.В. Гидрохимический облик пластовых вод месторождения Оймаша // Геология, география и глобальная энергия. 2020. № 2 (77). С. 51–59.
4. Медведев С.А., Попков В.И. Генезис вод глубоких горизонтов нефтегазоносных бассейнов молодой платформы юга СССР // Советская геология. 1986. № 6. С. 118–125.
5. Попков В.И., Ларичев В.В., Медведев С.А. Металлоносные рассолы и опресненные воды глубоких горизонтов нефтегазоносных бассейнов // Георесурсы. 2012. № 5 (47). С. 32–36.
6. Попков В.И., Ларичев В.В., Попков И.В. Структура глубокопогруженных комплексов осадочных бассейнов: гидрогеологические аномалии и нефтегазоносность как следствие внедрения глубинных флюидов (на примере месторождений Южного Мангышлака) // Геотектоника. 2023. № 3. DOI: 10.31857/S0016853X23030050
7. Попков В.И., Медведев С.А. Эволюция тектонической проницаемости земной коры Мангышлака и Восточного Предкавказья // Доклады АН СССР. 1986. Т. 290. № 3. С. 690–693.
8. Селецкий Ю.Б. Изотопы кислорода и водорода в выявлении природы гидрохимической инверсии подземных вод // Водные ресурсы. 1983. № 2. С. 117–123.
9. Тарасов М.Г. Изотопная диагностика глубокозалегающих опресненных вод артезианских бассейнов // Водные ресурсы. 1982. № 6. С. 157–162.

УДК 556

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПОРОВЫХ ВОД СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРОД АЧИМОВСКОЙ СВИТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.С. Семанова*¹, Е.С. Казак^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, E-mail: kanigu@mail.ru

²ООО «Фарватер», Москва

Аннотация

Ачимовская свита является одним из наиболее перспективных видов трудноизвлекаемых запасов нефти. Сегодня ведётся активное изучение и разработка ачимовских отложений, но данных о составе поровых вод на участках с низким водосодержанием практически нет, а традиционные методы оценки водонасыщенности и минерализации воды не работают для слабопроницаемых отложений. В данной работе для исследования использовалась авторская комплексная методика, включающая сочетание прямых и косвенных методов анализа. Определение содержания свободной и связанной воды было выполнено методом испарения с последующим изотопным анализом выделенной воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD). Модифицированный метод водной вытяжки позволил получить диапазон минерализации поровой воды. Верификация полученных результатов проводилась по данным анализа пластовых вод, отобранных из ачимовских отложений и прошедших гидрогеохимический контроль. В результате получена гидрогеохимическая характеристика поровых вод ачимовской свиты и сделаны выводы о процессах формирования их состава.

Ключевые слова: Ачимовская свита, изотопный состав, минерализация, водная вытяжка, керн, метод испарения

FORMATION OF THE COMPONENT COMPOSITION OF PORE WATER OF WEAKLY PERMEABLE ROCKS OF THE ACHIMOV FORMATION OF WESTERN SIBERIA

A.S. Semanova*¹, E.S. Kazak^{1,2}

¹ Moscow State University M. V. Lomonosov, Moscow, E-mail: kanigu@mail.ru

² Fair Water LLC, RF, Moscow

Abstract

The Achimov formation is one of the most promising types of hard-to-recover oil reserves. The Achimov deposits are being actively studied and developed today, but there is practically no data on the composition of pore waters in areas with low water content. A comprehensive methodology was used for the study, including a combination of direct and indirect methods of analysis. Determination of the content of free and bound water was performed by the evaporation method followed by isotope analysis ($\delta^{18}\text{O}$ and δD). The modified method of water extraction helped to obtain a range of pore water salinity. Verification of the obtained results was carried out according to the analysis of formation waters taken from the Achimov deposits and passed hydrogeochemical control. As a result, the hydrogeochemical characteristics of the pore waters of the Achimov formation were obtained and find the main processes of formation of the waters composition.

Key Words: Achimov formation, isotopic composition, salinity, aqueous extracts, core, evaporation method

Введение

Ачимовская свита (АС) – один из сложнейших нефтегазоносных объектов, представленный прослаиванием песчаников и аргиллитов и характеризующийся непростым геологическим строением [4]. В отложениях АС встречаются интервалы с низким водосодержанием (менее 5 масс.%), следовательно, прямое извлечение вод и их изучение представляет определенные трудности. Однако изучение состава и минерализации поровых вод слабопроницаемых пород имеет важное значение как для понимания процессов формирования залежей углеводородов, так и для оценки начальной нефтегазонасыщенности по данным геофизических исследований скважин. Соответственно, актуальность исследования состоит в необходимости изучения минерализации ачимовской свиты для интерпретации геофизических исследований скважин и определения насыщения интервалов.

Целью данной работы было изучение процессов формирования химического состава поровой воды низкопористых и низкопроницаемых пород ачимовской свиты Западной Сибири путем комплексного подхода.

Методы исследований

Исследования проводились на 80 образцах керна ачимовской свиты (Рис. 1), представленной светло-серыми песчаниками и тёмно-серыми аргиллитами. Образцы для исследования были предоставлены сотрудниками компании НТЦ «Газпромнефть» и были отобраны из центральной части и севера Западной Сибири.

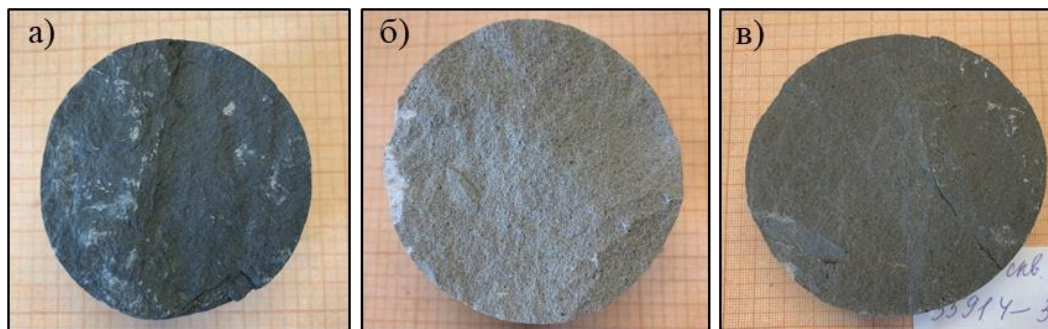


Рис.1 Керн исследуемых образцов: а, в) аргиллит ачимовской свиты; б) песчаник ачимовской свиты.

Для изучения состава поровых водах в образцах пород АС была использована комплексная методика, подробно описанная в статье [5]. Она включает в себя сочетание прямых и косвенных методов определения водосодержания, химического и изотопного состава пластовой воды.

Извлечение свободной и связанной воды из образцов керна выполнялось с помощью прямого метода испарения на устройстве УДАВ 1.2-5 (устройство для анализа водосодержания), специально разработанном для слабопроницаемых пород с изначально низким водосодержанием [2]. Для характеристики порового состава использовался модифицированный метод водной вытяжки [5]. В полученных растворах водных вытяжек методом объемного титрования определялось содержание HCO_3^- (погрешность измерений $\pm 3\%$). Концентрация Na^+ , K^+ , Mg^+ , Ca^+ , Cl^- , SO_4^{2-} измерялась с помощью системы капиллярного электрофореза КАПЕЛЬ®-105/105M. Погрешность измерений составляет $\pm 10\%$. Измерение изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, δD) выполнялось стандартным методом на масс-спектрометре Finnigan-MAT 252 (253). Минеральный состав был определен с применением рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском дифрактометре «Дрон-3М».

Результаты и их обсуждения

Валовый минеральный состав аргиллитов ачимовской свиты по данным РФА представлен в основном глинистыми минералами. Содержание кварца плагиоклаза (альбита) составляет в среднем 22 масс. %, пирита – до 2 масс.%. Содержание органического углерода составляет (ТОС) от 0,2 до 2 масс.%. Валовый минеральный состав песчаников ачимовской свиты представлен в основном минералами кремнистой группы, а именно – кварцем, содержание которого составляет от 30 до 50 масс.%, плагиоклазом – от 26 до 42 масс.%, КППШ – от 3 до 18 масс.%. Содержание глинистых минералов в данных породах составляет – от 4 до 26 масс.%.

В большинстве проб водных вытяжек из песчаников АС среди катионов преобладает Na^+ , среди анионов – HCO_3^- , Cl^- , из аргиллитов - среди катионов преобладает Na^+ , среди анионов – HCO_3^- , SO_4^{2-} (рис. 2).

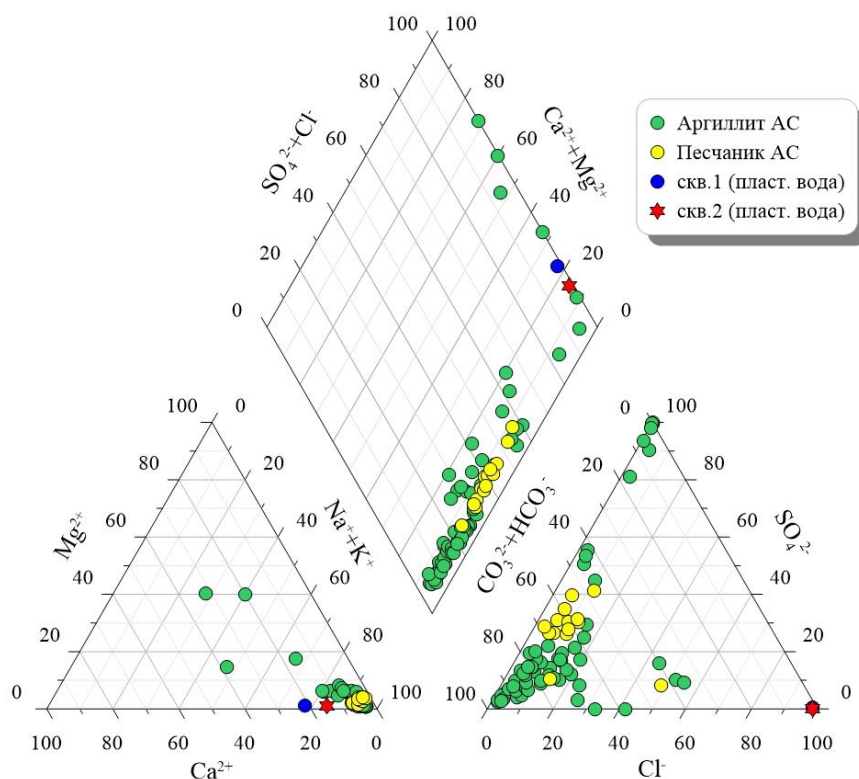


Рис.2 Тройная диаграмма Пайпера химического состава исследуемых проб водных вытяжек из образцов пород АС.

При приготовлении водной вытяжки порода истирается в порошок фракцией <0.1 мм. При смешивании с водой некоторые минералы могут частично раствориться, увеличив содержание в растворе гидрокарбонат-иона, сульфат-иона, катионов кальция, натрия, магния и железа. Рассчитанные в программе PHREEQC отрицательные значения индексов насыщения по кальциту (-1), доломиту (-2), пириту (-90), альбиту (-0,8) как раз указывают на недонасыщенность растворов водных вытяжек к данным минералам. Изотопный состав водных вытяжек из образцов аргиллитов АС ($\delta^{18}\text{O}$ -10,8 – -13,5 и $\delta^2\text{H}$ -73,1 – -90,3) кардинально отличается от состава выделенных поровых вод ($\delta^{18}\text{O}$ 1,69 – -9,3 и $\delta^2\text{H}$ -71 – -91,2), он близок к изотопному составу дистиллированной воды и линии метеорных вод. Таким образом, по водным вытяжкам достоверно можно определить содержание Cl^- (через хлор рассчитать минерализацию как NaCl) [1] и Br^- и I^- в поровых водах, остальные компоненты не будут отражать реальной картины их состава.

Полученная минерализация как NaCl в поровых водах песчаников АС изменяется от 4 до 6 г/л. Выделяется прослой с большей минерализацией – 8 г/л. Минерализация как NaCl в поровых водах аргиллитов ачимовской свиты в среднем составляет 10 г/л. Минерализация

поровой воды аргиллитов по керну АС из северной части Западной Сибири изменяется от 1 до 13 г/л.

Содержание Γ в поровых водах песчаников АС изменяется от 5 до 100 мг/л, а в аргиллитах АС от 0,8 до 32 мг/л. Содержание $B\Gamma$ в поровых водах песчаников АС изменяется от 6,2 до 8,2 мг/л, в аргиллитах АС – от 5,1 до 9,3 мг/л. Значения $Cl/B\Gamma$ коэффициента для рассматриваемых проб поровых вод изменяются от 60 до 886.

Данные результаты по водным вытяжкам необходимо было верифицировать прямым анализом пластовых вод. Для этого проводился гидрогеохимический контроль химического анализа пластовых вод ачимовской свиты, предоставленного компанией НТЦ «Газпромнефть» из этого же месторождения. Результаты определения минерализации по керну показали хорошую сходимость с минерализацией пластовой воды. Например, в пласте Ач17-0 минерализация по керну в среднем составила 11 г/л, а минерализация пластовой воды в Ач17-0 составила 10,87 г/л. Таким образом, данным, полученным по косвенному методу водной вытяжки можно доверять.

Известно по данным изотопного состава углеводородов в коллекторах ачимовской свиты, что они мигрировали из нижележащих отложений баженовской свиты, которые распространены на всей территории Западно-Сибирского мегабассейна и являются нефтематеринскими отложениями [3]. Наряду с углеводородами при увеличении температуры и давления происходила миграция поровых вод с растворенными в них минеральными веществами из отложений баженовской свиты в более проницаемые отложения песчаников ачимовской свиты. Скорее всего именно с этим связано более высокое содержание йода в поровых водах песчаников ачимовской свиты по сравнению с баженовской свитой.

Заключение

Выделить реальный поровый раствор из пород некоторых участков АС из-за их низкой проницаемости и малого водосодержания достаточно сложно, поэтому для анализа состава поровой воды в работе использовался косвенный метод водных вытяжек. В ходе расчётов индексов насыщения установлено, что растворы водных вытяжек недонасыщены по отношению к кальциту, доломиту, пириту, альбиту. То есть при приготовлении водных вытяжек наблюдается растворение данных минералов, истертых в порошок, и обогащение раствора катионами кальция, магния, натрия, железа, сульфата. Концентрации Cl^- и $B\Gamma$, Γ и минерализации как $NaCl$ могут быть очень близки к их реальному содержанию в поровых водах пород при учете коэффициента разбавления.

В результате удалось определить минерализацию поровых вод как для песчаников ачимовской свиты, так и для аргиллитов АС. Из-за сложного геологического строения АС, неоднородности и разрозненности пластов наблюдается широкий диапазон изменения

минерализации. Также в ходе исследования были сделаны выводы о том, что химический состав поровых вод ачимовской свиты частично сформирован при участии поровых вод пород баженовской свиты, мигрирующих при их уплотнении.

Список литературы

1. Казак Е.С. Вода баженовской свиты. Опыт и результаты комплексных исследований — М.: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2022. — 151 с.
2. Казак Е. С., Казак А. В., Сорокоумова Я. В., Алексеев А. Д. Оптимальный метод определения водосодержания нефтегазоматеринских пород баженовской свиты Западной Сибири // Нефтяное хозяйство. — 2019. — Т. 7. — С. 73-78.
3. Матусевич В.М. Гидрогеология нефтегазовых бассейнов: Учеб. Для вузов. -М.: Недра. 1986 г., с.224.
4. Сердюк З.Я., Слепокурова Л.Д., Зубарева Л.И. и др. Обзор и сопоставление моделей осадконакопления ачимовской толщи неокома // Геофизика, 2006. С. 67-70.
5. Kazak E. S., Kazak A. V. An Integrated Experimental Workflow for Formation Water Characterization in Shale Reservoirs: A Case Study of the Bazhenov Formation // SPE J. — 2021. — Vol. 1. — P. 1-16.

ИСТОРИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРЕПОДАВАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 556.3(571.5)

ВЫПУСКНИКИ МГУ В СИБИРСКОЙ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЕ. 40 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВАЖНЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ

С.В. Алексеев^{*1}, Л.П. Алексеева¹

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, E-mail: salex@crust.irk.ru

Аннотация

Представлены важнейшие результаты гидрогеологических исследований двух выпускников МГУ за сорокалетний период их работы в Институте земной коры СО РАН (г. Иркутск). Они стали качественно новым звеном в теории развития подземной гидросферы и мерзлых толщ. Общий список научных трудов авторов статьи насчитывает более 200 российских и зарубежных публикаций, в том числе 6 монографий.

Ключевые слова: выпускники МГУ, подземные воды, многолетнемерзлые породы, криогидрогеологические системы, генезис рассолов, стабильные изотопы, гидроминеральное сырье.

GRADUATES OF MSU AT THE SIBERIAN HYDROGEOLOGICAL SCHOOL. 40 YEARS OF RESEARCH AND MAJOR ACHIEVEMENTS

S.V. Alexeev^{*1}, L.P. Alexeeva¹

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation, E-mail: salex@crust.irk.ru

Abstract

The most important results of hydrogeological studies of two Moscow State University graduates over the forty-year period of their work in the Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk) are presented. They were a qualitatively new level in the theory of the development of the underground hydrosphere and permafrost. The general list of scientific articles includes more than 200 Russian and foreign units including 6 monographs.

Key Words: MSU graduates, groundwater, permafrost, cryohydrogeological systems, brine genesis, stable isotopes, hydromineral raw material.

Введение

1981 год ознаменовался небывалым количеством выпускников геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, в том числе по специальности «гидрогеология и инженерная геология». В научные и производственные геологические организации СССР

целевым назначением было направлено около 70 молодых специалистов. Часть студентов поступила в очную аспирантуру на кафедрах гидрогеологии, инженерной геологии и мерзлотоведения факультета, впоследствии успешно защитив кандидатские диссертации. Но, в целом, научная или производственная судьба выпускников сложилась по-разному. Кто-то нашел себя в науке, кто-то на производстве, а кто-то оставил лишь светлые воспоминания о годах учебы на геологическом факультете МГУ.

В настоящей статье приводятся важнейшие научные результаты двух выпускников геологического факультета МГУ, посвятивших сорокалетнюю научную деятельность гидрогеологии – науке о подземной гидросфере.

Методы исследований

В многолетних исследованиях сочетались теоретическое обобщение, интерпретация литературных, фондовых данных и огромного фактического (натурного и экспериментального) материала. В методическом плане широко использовались современные методы гидрогеологии, гидрохимии (традиционные аналитические и изотопные) и геокриологии. Фактологической основой изучения подземных вод явились материалы полевых и лабораторных исследований авторов, данные глубокого опорного бурения и др.

Результаты и их обсуждение

80-е годы прошлого столетия в Восточной Сибири характеризуются завершением строительства Байкало-Амурской магистрали, масштабной разведкой и разработкой месторождений алмазов, золота, нефти, газа и других полезных ископаемых. Для реализации научных и производственных программ государственного значения требовались молодые специалисты-геологи высокой квалификации. Поэтому целевое распределение выпускников геологического факультета МГУ в лабораторию формирования подземных вод Иркутского Института земной коры СО АН СССР не было случайным. Молодые стажеры-исследователи (авторы настоящей статьи), позднее ставшие аспирантами, были ориентированы научным руководителем - профессором Е.В. Пиннекером на изучение подземных вод в регионах с контрастными климатическими условиями. Объектами исследований явились алмазные месторождения Западной Якутии и рифтовая часть зоны БАМ.

На основе использования новейших методов исследований, глубокого обобщения и систематизации гидрогеологических и геокриологических данных были существенно расширены представления об главных закономерностях и результатах многолетнего **криогенеза** подземных вод и скальных горных пород севера Сибирской платформы. Впервые была получена эмпирическая зависимость температуры замерзания природных подземных соленых вод и рассолов хлоридного кальциево-магниевого и магниево-кальциевого состава:

$$T = -0002M^2 - 0,0454M - 0,2857, R^2 = 0,9994,$$

где T – температура замерзания воды, °С; M – минерализация воды, г/дм³; R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации.

Многие годы формула активно используется для решения широкого круга научных и практических задач.

На основе натурных и экспериментальных наблюдений вскрыты геохимические эффекты, происходящие в ходе криогенной метаморфизации состава подземных вод с различной минерализацией, определены палеотемпературы охлаждения геологического разреза криоартезианских бассейнов. Итогом кропотливой работы стала кандидатская диссертация на тему «Криогенез подземных вод и горных пород (на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии)» и последующее издание монографии [1].

Начало работы в ИЗК СО АН СССР совпало с выходом в свет шеститомника «Основы гидрогеологии» (отв. ред. Е.В. Пиннекер), удостоенного Государственной премии СССР. Это фундаментальное систематизированное изложение учения о подземной гидросфере. В монографии обобщены классические представления и новейшие (на тот период) данные о жизни воды в земной коре, уделено внимание кардинальным проблемам и тенденциям развития гидрогеологии как фундаментальной, так и прикладной науки. Активное участие в написании одного из томов монографии принимала Л.П. Алексеева [2].

Одной из важнейших стратегических задач, требующих скорейшего решения, явилось обеспечение водой объектов БАМ. В этой связи был выполнен большой объем работ, направленных на оценку запасов наледеобразующих подземных вод (потенциального источника питьевых вод) в пределах Верхнеангарской, Северо-Муйской и Чарской впадин, впервые типизированы мерзлотно-гидрогеологические условия этих геологических структур и дана их картографическая оценка.

Установлено, что ресурсы подземных вод, идущих на наледеобразование, составляют для Чарского артезианского бассейна 10,6 м³/с (более 60 % от естественных ресурсов подземных вод); для Муйско-Куандинского артезианского бассейна – 15,5 м³/с (более 40 %); для бассейна р. Верхней Ангары – 8,6 м³/с (12 % от естественных ресурсов подземных вод). Построенные схемы распределения очагов разгрузки этих вод в пределах впадин позволили оценить обеспеченность территории пресными подземными водами и обосновать перспективы их использования для водоснабжения населенных пунктов.

По результатам исследований защищена кандидатская диссертация в 1990 г. [3]. Кроме того, материалы о закономерностях распространения и формирования подземных вод в области развития многолетней мерзлоты региона вошли главой в монографию, удостоенную Премии Совета Министров СССР [4].

Во второй половине XX в. гидрогеология и геокриология вступили в качественно новый этап развития, связанный с освоением огромной массы нового фактического материала и пересмотром многих теоретических положений. Как предмет исследований рассматривались конкретные материальные системы, а в научном мире стали достаточно широко использоваться понятия гидрогеологическая система, геокриологическая система и/или их подсистемы. Поскольку многолетнее промерзание литосферы трансформировало гидрогеологические системы, было определено содержание термина **криогидрогеологическая система** как совокупность взаимосвязанных водоносных, водоупорных или воздушно-сухих горных пород, образующих целостную структуру и претерпевших существенные изменения под влиянием циклических процессов криогенеза [5].

Впервые были предложены принципы систематизации и **классификация криогидрогеологических систем (КГГС)**. По характерным признакам выделены таксономические единицы (типы, классы, группы и т.д.), сформирована полная группа эталонных типов систем, а также разрезов, отвечающих различным ландшафтно-климатическим, геолого-структурным, мерзлотно-гидрогеологическим условиям [6].

Уточнены и детально охарактеризованы гидрогеологический и геокриологический разрезы основных КГГС Якутской алмазоносной провинции. В соответствии с разработанной классификацией в пределах Якутской алмазоносной провинции выделены Анабарская, Оленек-Мархинская и Вилуй-Ботуобинская КГГС. Согласно схеме геокриологического районирования, Анабарская, Оленек-Мархинская, Вилуй-Ботуобинская КГГС находятся в северной геокриологической зоне и характеризуются сплошным распространением многолетнемерзлых пород.

Анабарская КГГС относится к подтипу субэкранных КГГС и представляет собой закрытый КГМ сплошного промерзания с надмерзлотными, возможно существующими подмерзлотными пресными, рассольными холодными и криогалинными порово-трещинными, трещинными, трещинно-жильными подземными водами.

Оленек-Мархинская и Вилуй-Ботуобинская субэкранные КГГС являются сложнопостроенными закрытыми КАБ (КАДБ – криогидрогеологическими артезианскими бассейнами) сплошного промерзания с надмерзлотными пресными, межмерзлотными, внутримерзлотными, подмерзлотными, солоноватыми, солеными, рассольными холодными, криогалинными поровыми, порово-каверновыми, порово-трещинными подземными водами. Гидрогеохимическая зональность КГГС характеризуется различным сочетанием типов подземных вод – гидрокарбонатных, сульфатных и хлоридных.

Проблемы генезиса и процессов эволюции системы «вода-порода» исследовались на основе комплексного использования изотопных мультитрассеров ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{37}\text{Cl}$, $\delta^{81}\text{Br}$,

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), что позволило привести больше доказательств происхождения хлоридных кальциевых рассолов в результате метаморфогенного преобразования захороненной морской рапы [6; 7].

Установлено, что вариации $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ связаны с изменением минерализации рассолов, вскрытых как в осадочных отложениях, так и в обводнённых зонах кимберлитов в направлении разделения всех вод на две группы:

1. Слабые рассолы хлоридного натриевого и кальциевого состава с пониженным содержанием тяжелых изотопов, что свойственно поверхностным водам.

2. Крепкие хлоридные кальциевые рассолы, обогащённые тяжелыми изотопами ^{18}O и ^2H .

Значения стабильных изотопов хлора и брома в подземных солёных водах и рассолах севера Сибирской платформы перекрывают диапазон величин $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ для кимберлитов и кристаллических пород Канадского, Фенноскандинавского щитов, но совпадают с диапазоном для осадочных пород бассейна Уиллистон в Северной Америке. Для сибирских рассолов в кимберлитах и осадочных отложениях характерна линейная зависимость между $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$, что может указывать на единый источник поступления элементов в подземные воды и одинаковое влияние эволюционных геохимических процессов на преобразование состава подземных вод в системе «вода-порода».

Диапазон изменения стронциевого отношения в рассолах осадочных отложений и кимберлитов (от 0,70803 до 0,70938) укладывается в диапазон изменения этого показателя в породах. К водам палеоокеана на рубеже венда и кембрия (560-550 млн. лет назад) ближе всего стронциевые отношения в подземных водах кембрийских карбонатных пород, которые обогащались радиогенным стронцием в течение длительного геологического времени, взаимодействуя с карбонатными вмещающими породами с повышенным значением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Всё это указывает на закрытость системы «вода-порода» и подтверждает гипотезу о сингенетичности подземных вод вмещающим породам, а также формировании рассолов в результате захоронения маточной рапы древних солеродных бассейнов.

Впервые разработаны принципиальные схемы **взаимодействия жидкой и твердой фаз в неравновесной системе «рассол-лед» при отрицательной температуре**. Система «рассол-лед» – это единственная в своем роде гетерогенная система, твердая и жидкая фазы которой состоят из одного и того же вещества – воды. Непосредственный контакт льда с рассолом при отрицательной температуре, более высокой, чем температура замерзания рассола, нарушает термодинамическое равновесие системы. В результате происходит полное или частичное плавление льда, опреснение и стратификация жидкой фазы по плотности, образование «вторичного» солоноватого льда, высвобождение дополнительного объема за счет фазовых переходов воды и включений газа во лед.

В природной обстановке взаимодействие рассолов с текстурообразующими подземными льдами приводит к восстановлению проницаемости мерзлых пород, нарушению

их устойчивости, структурных связей и несущей способности, формированию техногенных межмерзлотных и сквозных таликов.

Полученные уникальные данные позволили решить проблему изоляции дренажных рассолов алмазодобывающих карьеров АК «АЛРОСА» (ПАО) в многолетнемерзлых породах.

В последние десятилетия получены новые данные о **промышленных рассолах Сибирской платформы** в пределах Ангара-Ленского, Якутского, Оленёкского и Тунгусского артезианских бассейнов, охарактеризованы закономерности формирования и локализации месторождений литий-бром-содержащих подземных вод. Выявлены перспективные участки для их освоения, а также выполнена оценка прогнозных запасов гидроминерального сырья на юге Сибирской платформы [8]. На этой основе в 2021 г. «Газпром», «Иркутская нефтяная компания» (ИНК) и Министерство промышленности и торговли подписали трехсторонний план мероприятий («дорожную карту») по реализации проекта по производству соединений лития из подземных рассолов Ковыктинского газоконденсатного месторождения «Газпрома» в Иркутской области. Этот проект позволит возродить литиевую отрасль полного цикла в России с хорошим экспортным потенциалом.

Заключение

Важным этапом научной деятельности авторов явились защиты докторских диссертаций. Поэтому выпускники МГУ – специалисты высшей квалификации – востребованы как эксперты РАН и консультанты многих важнейших проектных решений.

Список литературы

1. Алексеев С.В. Криогенез подземных вод и горных пород (на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии) / Новосибирск. 2000. 119 с.
2. Основы гидрогеологии. Использование и охрана подземных вод / Новосибирск: Наука, 1983. 231 с.
3. Алексеева Л.П. Типы мерзлотно-гидрогеологических условий и использование подземных вод для водоснабжения рифтовой части зоны БАМ. Автореф. дисс...канд. геол.-мин. наук / Иркутск. 1990. 21 с.
4. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Гидрогеология / Новосибирск. 1984. 168 с.
5. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы. Формирование понятия и классификация // Криосфера Земли. 2005. Т. IX (2). С. 85-93.
6. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции / Новосибирск. 2009. 319 с.
7. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов Западной Якутии / Новосибирск. 2019. 214 с.
8. Алексеев С.В., Вахромеев А.Г., Коцупало Н.П., Рябцев А.Д. Промышленные рассолы Сибирской платформы (гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация) / Иркутск. 2014. 172 с.

УДК 556.3

**ЗВЕНИГОРОДСКИЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ПОЛИГОН КАФЕДРЫ
ГИДРОГЕОЛОГИИ – ЗАПОВЕДНЫЙ ИСТОЧНИК
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ
РАЗМЫШЛЕНИЙ****С.О. Гриневский*¹, А.В. Лехов¹, В.А. Лехов¹, Е.В. Кортуннов¹, Я.В. Сорокоумова¹**¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: sogrinev@mail.ru**Аннотация**

Звенигородский учебно-научный полигон кафедры гидрогеологии МГУ уже более 50 лет является местом проведения уникальной по своему содержанию и техническому оснащению учебной практики по полевым методам гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических, инженерно-геофизических и эколого-геологических исследований, а также полигоном для научных экспериментов и отработки методики проведения полевых изысканий. В докладе рассматриваются гидрогеологическое содержание учебной практики и основные направления научно-исследовательских работ на полигоне.

Ключевые слова: полевые методы, учебная практика, откачки, расходометрия, трассер, инфильтрационное питание

**ZVENIGOROD EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC POLYGON OF
THE HYDROGEOLOGY DEPARTMENT IS A RESERVED SOURCE
OF PRACTICAL KNOWLEDGE AND THEORETICAL THOUGHTS****S.O. Grinevskiy*¹, A.V. Lekhov¹, V.A. Lekhov¹, E.V. Kortunov¹, Y.V. Sorokoumova¹.**¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: sogrinev@mail.ru**Abstract**

For more than 50 years, the Zvenigorod educational and scientific training ground of the Department of Hydrogeology of Moscow State University has been a venue for training on field methods of hydrogeological, engineering-geological, geocryological, engineering-geophysical and ecological-geological studies, unique in its content and technical equipment, as well as a testing ground for scientific experiments and development of field methods. The report discusses the hydrogeological content of educational practice and the main directions of research work at the test site.

Key Words: field methods, educational practice, pumping, flow measurement, tracer, infiltration

Введение

Звенигородский учебно-научный полигон расположен в Одинцовском р-не Московской области, на правом берегу р. Москва, на территории Звенигородской биологической станции МГУ (ЗБС). Здесь для студентов 3-го курса инженерного потока проходит уникальная по своему содержанию и техническому оснащению учебная практика по полевым методам гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических, инженерно-геофизических и эколого-геологических исследований [7], а также проводятся научные эксперименты и отрабатывается методика проведения полевых изысканий.

Первая практика состоялась в далеком 1969 г и в течение 1 недели проходила только по инженерно-геологическим методам исследований, а гидрогеологические задачи изучались на полигоне ВСЕГИНГЕО и только с 1973 г – на ЗБС [8]. Постепенно содержание практики расширялось за счет добавления геокриологических и геофизических методов исследования и в настоящий момент она включает 26 задач, из которых 8 – гидрогеологических.

Большинство учебных задач и научно-методических исследований проходят на 1-й террасе р. Москва, которая сложена современными и верхнечетвертичными аллювиальными отложениями мощностью 5-7 м – в верхней части (2-3 м) супесчано-суглинистыми, а в нижней – песчаными. Ниже по разрезу залегают неравномерно трещиноватые и кавернозные подольско-мячковские известняки мощностью 52-54 м. Гидрогеологический разрез представлен двумя водоносными горизонтами – аллювиальным и подольско-мячковским, взаимосвязь которых осложнена наличием в кровле известняков карбонатной глины коры выветривания мощностью до 0.3 м, а также сохранившимися в тыловом шве террасы юрскими глинами мощностью до 1 м. Разгрузка водоносных горизонтов происходит в р. Москва; при этом подольско-мячковский горизонт разгружается также перетеканием в аллювий на площади поймы и части 1-й террасы, о чем свидетельствует разница напоров двух горизонтов, достигающая на пойме 1 м [1].

Для проведения учебных задач и научных исследований на Звенигородском полигоне в разное время пробурено 49 скважин: 20 - на аллювиальный и 29 – на подольско-мячковский горизонты, большинство которых сгруппировано в 4 куста.

Гидрогеологическое содержание практики

Практика начинается с проведения маршрутов по прилегающей к ЗБС территории, в ходе которых происходит знакомство с геолого-гидрогеологическими условиями района и приобретение навыков работ в составе гидрогеологической съемки – гидрогеологических наблюдений, характеристики современных геологических процессов и их проявлений (заболачивания, овраго- и оползнеобразования, речной эрозии), описания и опробования родников, колодцев и скважин, полевых определений коэффициента фильтрации и экспресс-анализа химического состава воды. При проведении маршрутных работ используются

водосливные рамки Томсона, трубки СпецГео, гидрогеологические хлопушки, термометры, кондуктометры, pH и Eh-метры. По результатам пятидневных маршрутных работ студенты составляют карту четвертичных отложений территории практики с геолого-гидрогеологической характеристикой основных подразделений.

В задаче «Гидрогеохимия», которая проводится на основе отобранных студентами проб воды из поверхностных источников и из разных водоносных горизонтов района практики, происходит освоение правил отбора, фильтрации и консервации проб, а также методов определения нестабильных компонентов и показателей в подземных водах. Определяя содержание общего железа с помощью полевого спектрофотометра и концентрацию гидрокарбоната титрованием с использованием микродозатора, отслеживается изменение этих компонентов во время проведения откачки.

Задача «Кустовая откачка» проводится на кусте №1, который включает 10 скважин на подольско-мячковский и 11 пьезометров на аллювиальный горизонты и состоит из 2-х лучей скважин: параллельного руслу р. Москва, на расстоянии порядка 30 м от него и перпендикулярного, включающего также «заречную» скважину на другом берегу реки. Откачка длительностью до 1 сут с дебитом от 25 до 40 л/с проводится из совершенной скважины на пойме р. Москва погружным насосом ЭЦВ-8. В процессе откачки с помощью гидрогеологических хлопушек, а также электроуровнемеров (производства ГИДЭК и ОТТ Hydromet) студенты проводят измерения уровней подземных вод в скважинах на оба горизонта, ведут наблюдения за уровнем реки и с интервалом 1-2 часа производят замер дебита откачки с помощью бака объемом 1 м³. Параллельно регистрация снижения уровней осуществляется с помощью установленных в скважины автономных датчиков давления Solinst Levelogger и стационарных датчиков LMP-307 производства ЗАО «Геолинк-Консалтинг» [1]. Последние, объединенные в единую сеть, позволяют в реальном времени наблюдать на экране монитора за развитием понижений и обсуждать его со студентами. Специфика гидрогеологических условий опытного участка с определенными допущениями позволяет использовать для обработки данных откачки три расчетные схемы – изолированного неограниченного пласта (в начале опыта), пласт с перетеканием (Хантуша) и у несовершенной реки. Это дает студентам навыки различной интерпретации результатов собственных наблюдений и расчета широкого спектра гидрогеологических параметров – проводимости и пьезопроводности горизонта известняков, фактора перетекания и коэффициента перетока, характеризующих его связь с аллювиальным горизонтом, а также параметра несовершенства ложа водотока ΔL .

Ранее на кусте №2, состоящем из 5-ти скважин на подольско-мячковский горизонт и 1-й – на аллювиальный, проходила задача «Откачка из несовершенной скважины», а на кусте №4, расположенном на 2-й террасе и включающем 6 скважин на аллювиальные пески и 1 скважину на известняки – опыты по наливу в сухие скважины.

Задача «Экспресс-налив», которая проводится в аллювиальных скважинах, позволяет оценить инерционность пьезометров и фильтрационные свойства пород прискважинной зоны. Это дает представление о слабой информативности экспресс-методов оценки фильтрационных параметров, широко используемых на практике инженерно-геологических изысканий.

Изучение методов оценки проницаемости пород зоны аэрации проводится в задаче «Налив в шурф», которая осуществляется с применением двухкольцевых инфильтрометров ПВН по методу Н.С. Нестерова.

Задачи «Расходомерия» и «Трассер» проводятся на компактно расположенном кусте № 3, состоящем из 11 совершенных скважин с открытым стволом на известняки. Эти задачи, которые ранее дополнялись геофизическим каротажем (КС, ПС, ГК и др.), по сути представляют единый комплекс методов, направленных на изучение вертикальной неоднородности закарстованного массива известняков и оценку миграционных параметров этой сложно построенной фильтрационной среды. Подача воды для проведения опытов с дебитом до 6 л/с осуществляется по водоводу из реки.

Методика проведения задачи «Расходомерия», которая была разработана и отлажена на Звенигородском полигоне, включает кавернометрию и расходомерию в статической и динамической постановках [7] с использованием скважинных приборов КМ-2 и РЭТС-2. Ранее она проводилась при помощи каротажной станции СКВ-69 на базе ГАЗ-66. В настоящее время используется лебедка с электрическим приводом и современная аппаратура, представленная скважинным каверномером КМ 43-1 и цифровым регистратором Вулкан V3. Новая аппаратура позволяет получать более четкий цифровой сигнал и проводить динамическую расходомерию в широком диапазоне скоростей, что обеспечивает высокую дискретность расчленения разреза подольско-мячковских известняков и выделения высокопроницаемых зон.

Запуск трассера, раствора NaCl, происходит при помощи насоса из емкости 3 м³ в скважину, в которой предварительно методом расходомерии определено положение высокопроницаемых зон в известняках, по которым начинает распространяться трассирующий раствор. С помощью подвижного датчика электропроводности засекается время начала опыта для каждой зоны. Регистрация времени прихода трассера проводится в наблюдательных скважинах, расположенных вверх и вниз по потоку на расстояниях 5-10 м от центральной, с помощью кос стационарных датчиков, размещенных на разных глубинах, исходя из предпосылки об субгоризонтальности высокопроницаемых зон. Интерпретация выходных кривых проводится по схеме радиального потока с учетом его естественной составляющей или без нее, в результате чего определяются емкостные параметры зон [7]. Данная задача позволяет продемонстрировать неоднородность миграционных параметров водоносного горизонта известняков в плане и в разрезе, определяющую различную скорость пространственного распространения вещества с потоком подземных вод. В комплексе с задачей «Расходомерия»

это дает представление о том, что карбонатный водоносный горизонт представляет собой серию субгоризонтальных относительно тонких зон высокой проводимости, разделенных интервалами низкопроницаемых пород. Данные зоны имеют различные фильтрационные и миграционные параметры, и характеризуются разными расходами и скоростями движения подземных вод.

Задача «Гидрометрия и русловая геофизика» направлена на изучение методов оценки взаимосвязи подземных и поверхностных вод и проводится на р. Дубешня. Комплекс русловой геофизики, включающий термометрию донных отложений, резистивиметрию речной воды и метод естественного электрического поля [7], проводится профилированием на 2-3 км участке русла реки с шагом 20-50 м. На границах исследуемого участка производится измерение расхода воды с использованием гидрометрических вертушек разных модификаций (ГР-21, ИСП-1М, ОТТ Hydromet), а также индукционного измерителя скорости потока ОТТ Nautilus, что позволяет оценить погрешность измерения скорости. По результатам комплексной интерпретации данных геофизического профилирования выделяются участки с различной интенсивностью и направленностью водообмена подземных и поверхностных вод, а приращение расхода реки между створами интегрально характеризует его интенсивность.

Задача «Режимные наблюдения» проходит в течение всей практики и заключается в регулярном измерении студентами уровней подземных вод аллювиального и подольско-мячковского горизонтов в скважинах перпендикулярного луча куста №1, уровней р. Москва и наблюдениях за метеоусловиями. Интерпретация полученных данных, дополненных проводящимися на полигоне стационарными наблюдениями, направлена на выявление основных факторов, определяющих закономерности формирования режима подземных вод двух горизонтов. Кроме того, в данной задаче приобретаются практические навыки оценки геофильтрационных параметров по периодам стационарного (квазистационарного) и нестационарного режима уровней – пьезо-(уровне)проводности и параметра ΔL .

Проведение каждой задачи осуществляется для бригады из 5-6 студентов, что позволяет всем участвовать в практических работах. Такой же подход использован и при обработке данных – по результатам каждой задачи бригада составляет и сдает отчет, что дополнительно формирует важные навыки работы в коллективе.

Научно-методические исследования на полигоне

Звенигородский полигон с его уникальными гидрогеологической инфраструктурой и оборудованием является источником фактических данных для научных исследований, отработки методики проведения полевых экспериментов и их интерпретации.

На базе полигона проводятся исследования в рамках грантов РФФИ и РНФ. Благодаря их финансовой поддержке оборудованы 2 ландшафтные площадки («лесная» и «полевая») для изучения влияния ландшафтных факторов на формирование инфильтрационного питания

подземных вод. С 2009 г на площадках ведутся автоматизированные часовые измерения температуры и влажности пород по глубине зоны аэрации (0,25, 0,5, 0,8 и 1,5 м), уровней грунтовых вод (Solinst Levellogger), метеорологических характеристик (метеостанция Vantage Pro 2), а зимой - регулярные измерения высоты снега и содержания воды в нем. Накопленный фактический материал использован для разработки, калибрации и верификации моделей трансформации осадков на поверхности земли и водного баланса в зоне аэрации [5; 6], на основе которых было получено, что среднемноголетнее инфильтрационное питание на лесном ландшафте (61 мм/год) существенно выше, чем на полевом (21 мм/год). Разработанные модели в настоящий момент используются для анализа «ландшафтной» чувствительности питания к различным сценариям прогнозных климатических изменений.

Другим направлением научных исследований, развивающимся на базе Звенигородского полигона, является разработка методики и интерпретации опытно-фильтрационных и опытно-миграционных работ, направленных на изучение неоднородности фильтрационного строения закарстованного массива. Методика фильтрационной и трассерной томографии подразумевает последовательное и посменное возмущение пласта из разных скважин откачками, наливками и запусками трассера с измерением возмущения во всех других скважинах. При этом каждая скважина опробуется и работает как наблюдательная во всех остальных опытах. Такой подход позволяет «просветить» неоднородность карбонатного пласта с разных сторон и получить больше информации о пространственном распределении его параметров [4; 10]. Однако, обработка и интерпретация результатов данных экспериментов требует совершенствования и модификации алгоритмов оценки параметров по результатам опытных работ на основе современных методов решения обратных задач.

В рамках аспирантских и магистерских исследований на полигоне в течение нескольких лет проводилось термометрическое зондирование по руслу р. Москва в естественных условиях разгрузки подземных вод и при длительных 10-суточных откачках. Проведенные исследования позволили отработать методику термометрии и количественно охарактеризовать неоднородность естественной субаквальной разгрузки подземных вод. Они также показали эффективность термометрии донных отложений при проведении опытно-фильтрационных опробований у реки. Термометрические наблюдения в этом случае позволяют: однозначно диагностировать начало гидрогеодинамического влияния реки и поступление питания из нее, определять размеры зоны притяжения речных вод на разные моменты времени, а также количественно характеризовать его интенсивность [2]. Кроме того, детальные и прецизионные наблюдения за уровнями подземных вод в аллювиальных пьезометрах и в заречной скважине показали, что даже при 10-суточных откачках из центральной скважины, расположенной в 30 м от реки, полная стабилизация понижений не достигается. Это явилось основанием для пересмотра методических подходов к интерпретации результатов опробования.

Огромный фактический материал экспериментальных работ, накопленный за 50 лет проведения практики, а также данные многолетних (с 2007 г) автоматизированных режимных наблюдений на полигоне за уровнями подземных и речных вод используются и при написании курсовых и бакалаврских работ, что придает им исследовательский характер.

Так, например, интересные результаты получены при сопоставительном анализе архивных данных 37 откачек, проведенных из одной и той же скважины в период 1986-2017 гг. Несмотря на однотипность проведения удельные понижения по одним и тем же скважинам в разных опытах могут различаться в 2 раза, что проявляется в вариации расчетных значений проводимости подольско-мячковского горизонта более 30%. Детальный анализ данных откачек и режимных наблюдений за состоянием подземных и поверхностных вод р. Москва показал, что основным фактором, определяющим существенную погрешность оценки проводимости, является нестационарное состояние потока, и при его стабильности различия расчетной проводимости пласта не превышают 7% [3]. Также было проанализировано различие графиков снижения и восстановления уровней по скважинам, которое устойчиво наблюдается во всех опытах на этапе перетекания из аллювиального горизонта. На основе имитационного моделирования было показано, что эти различия связаны с нелинейными процессами перетекания между горизонтами при смене субнапорных условий в аллювиальном горизонте на безнапорные при откачке, и наоборот – при восстановлении [9].

Разносторонний многолетний фактический материал и данные проведенных исследований лежат в основе непрерывного совершенствования и детализации гидрогеологической модели Звенигородского полигона.

Заключение

К сожалению, вектор развития современной отечественной гидрогеологии непропорционально смещен в сторону методов обработки и анализа информации на основе моделирования. При этом методике корректного получения исходной информации и развитию полевых методов исследования, по мнению авторов, уделяется недостаточно внимания не только в практических работах, но и в научно-методических исследованиях, и в образовательном процессе. В этих условиях значимость Звенигородского полигона кафедры гидрогеологии и других подобных экспериментальных гидрогеологических площадок сложно переоценить.

Список литературы

1. Гриневский С.О., Маслов А.А., Поздняков С.П. Опыт создания и применения комплекса режимных гидрогеологических наблюдений в условиях Звенигородского учебного полигона МГУ им. М.В.Ломоносова // Инж. изыскания. 2011. №5, с. 20 – 24.
2. Гриневский С.О., Ивашкова Е.И., Лехов В.А. Оценка взаимодействия подземных и поверхностных вод методом термометрии донных отложений при откачке / Инженерные изыскания в строительстве // Материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: ООО «Геомаркетинг». 2018. с. 406-412.

3. Даниленко А.С. Сопоставительный анализ многолетних данных опытных откачек на Звенигородском полигоне // Курсовая работа. МГУ, каф. гидрогеологии, 2019, 33 с.
4. Лехов А.В., Кортуннов Е.В., Лехов В.А., Самарцев В.Н., Шарапута М.К. Детализация гидрогеологических характеристик водоносного горизонта в карстующихся известняках (Звенигородский полигон МГУ имени М.В. Ломоносова) // Инж. геология. 2019. т. 14, № 16 с. 72-87.
5. Поздняков С.П., Гриневский С.О., Дедюлина Е.А., Кореко Е.С. Чувствительность результатов моделирования сезонного промерзания к выбору параметризации теплопроводности снежного покрова // Лед и снег, 2019. Т.59 №1, с. 67-80
6. Поздняков С.П., Гриневский С.О., Дедюлина Е.А. Влияние климатических изменений на многолетнюю динамику сезонного промерзания в Московском регионе: ретроспективный анализ и неопределенности прогноза на вторую половину XXI века // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 4, с. 26–35
7. Полевые методы гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических, инженерно-геофизических и эколого-геологических исследований. // Под ред. Королева В. А., Гордеевой Г. И., Гриневского С. О., Богословского В. А. М.: Изд-во МГУ, 2000. 352 с.
8. Учебная практика по полевым методам гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических, инженерно-геофизических и эколого-геологических исследований в Звенигороде. К 40-летию создания практики. / Коллектив авторов. // Под редакцией В.Т. Трофимова и В.А. Королева / М.: Изд-во ОАО «ПНИИИС», 2010. 88 с.
9. Халеский В.В. Сопоставительный анализ снижения и восстановления уровней подземных вод при откачках на Звенигородском полигоне // Курсовая работа. МГУ, каф. гидрогеологии, 2021, 27 с.
10. Экспериментальные исследования и теоретические модели переноса загрязнения в неоднородных карбонатных пластах. / Ред. Лехов А.В. // Проект РФФИ № 16-05-00807, 2018, 108 с.

УДК 556.3.01

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА HYDROGEO В НАУЧНОМ И УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Е.М. Дутова*¹, К.И. Кузеванов¹, А.Н. Никитенков¹

¹Томский политехнический университет Томск, Россия, E-mail: dutova@tpu.ru

Аннотация

Программный комплекс HydroGeo был разработан профессором ТПУ М.Б. Букаты. Опыт его практического использования насчитывает более 30-ти лет. Проведено множество различных расчетов, включая моделирование различных природно-техногенных условий, которые охватывают широкий спектр практических и научных задач.

Результаты некоторых перечисленных исследований, а также примеры использования HydroGeo в учебном процессе будут представлены в докладе.

Ключевые слова: преподавание, гидрогеохимия, гидродинамика, моделирование, HydroGeo

EXPERIENCE OF USING THE HYDROGEO SOFTWARE COMPLEX IN THE SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL PROCESS

E.M. Dutova*¹, K.I. Kuzevanov¹, A.N. Nikitenkov¹

¹Tomsk Polytechnic University Tomsk, Russian Federation, E-mail: dutova@tpu.ru

Abstract

The HydroGeo software package was developed by TPU professor M.B. Bukaty. Experience of its practical use totals more than 30 years. Many different calculations have been carried out, including modeling of various natural and technogenic conditions, which cover a wide range of practical and scientific problems.

The results of some of these studies, as well as examples of using HydroGeo in the educational process, will be presented in the report.

Key Words: teaching, hydrogeochemistry, hydrodynamics, modeling, Hydrogeo

Введение

В основе ПК HydroGeo лежит принцип равновесного физико-химического моделирования «по константам стехиометрических уравнений реакций». В современных версиях комплекса был создан блок численного моделирования геофильтрации и геомиграции, который предусматривал одновременное решение геофильтрационных и геомиграционных задач в одно-, двух- и трехмерной постановке. Существенно расширился спектр прикладного

применения программного комплекса, прежде всего, за счет задач геохимии радиоактивных элементов и геотемпературных расчетов [1; 2].

Методы исследований

Структурно ПК HydroGeo предусматривает обработку информации по двум основным направлениям – гидрогеохимическому и гидродинамическому. Первое из них позволяет выполнять настройку гидрогеохимической системы и проведение разнообразных расчетов на основе результатов химического анализа воды и породы, включая как относительно простые пересчеты концентраций в практически любые единицы измерения, балансировку анализов, расчет pH, коэффициентов активности по методам К.В. Дэвис (C.W. Davies) или К.С. Питцера (K.S. Pitzer) и т.п. (в том числе с учетом Eh), так и более сложные расчеты – моделирование комплексообразования, расчет степени насыщения раствора по отношению к заданным минералам, моделирование растворения-осаждения минералов и солей, смещения и испарения. Относительно самостоятельный раздел данного блока позволяет выполнять расчеты и моделирование фазовых равновесий в системе вода-газ. С помощью гидродинамического блока могут выполняться расчеты по оценке фильтрационно-ёмкостных свойств пород по результатам опытно-фильтрационных исследований в скважинах.

Процедуры гидродинамического и гидрогеохимического блоков совместно используются в блоке моделирования геомиграции, который предусматривает одновременное решение геофильтрационных и геомиграционных задач в одно-, двух- и трехмерной постановке. Поскольку учет протекающих при этом гидрогеохимических процессов резко замедляет расчеты, в соответствующих опциях предусмотрена возможность динамического включения-отключения в ходе моделирования смещения водных растворов, а также включения-отключения их взаимодействия с породой, что позволяет для выбранных этапов расчетов сводить задачу геомиграции к моделированию только геофильтрации, либо к случаю, когда все компоненты раствора могут рассматриваться как консервативные (Рис. 1).

Результаты и их обсуждения

Благодаря использованию термодинамического моделирования, достигнуто более глубокое понимание и объяснение значения процессов, которые связаны с физико-химическим взаимодействием в основополагающей для земной коры системе «вода – порода – газ – органическое вещество».

1. Проведено моделирование взаимодействий подземных вод с различными типами алюмосиликатных, карбонатных и карбонатно-алюмосиликатных пород, применительно к условиям зоны гипергенеза, показан минеральный состав образующейся вторичной твердой фазы и изменчивость содержаний химических элементов в водах в ходе эволюции системы «вода-порода», получена количественная оценка этих преобразований [3].

2. Выполнены прогнозы разнообразных процессов, протекающих в недрах и на технологическом оборудовании при эксплуатации месторождений подземных вод, дренажных сооружений, объектов захоронения сточных вод и заводнения пластов при эксплуатации нефтяных месторождений [4-7].

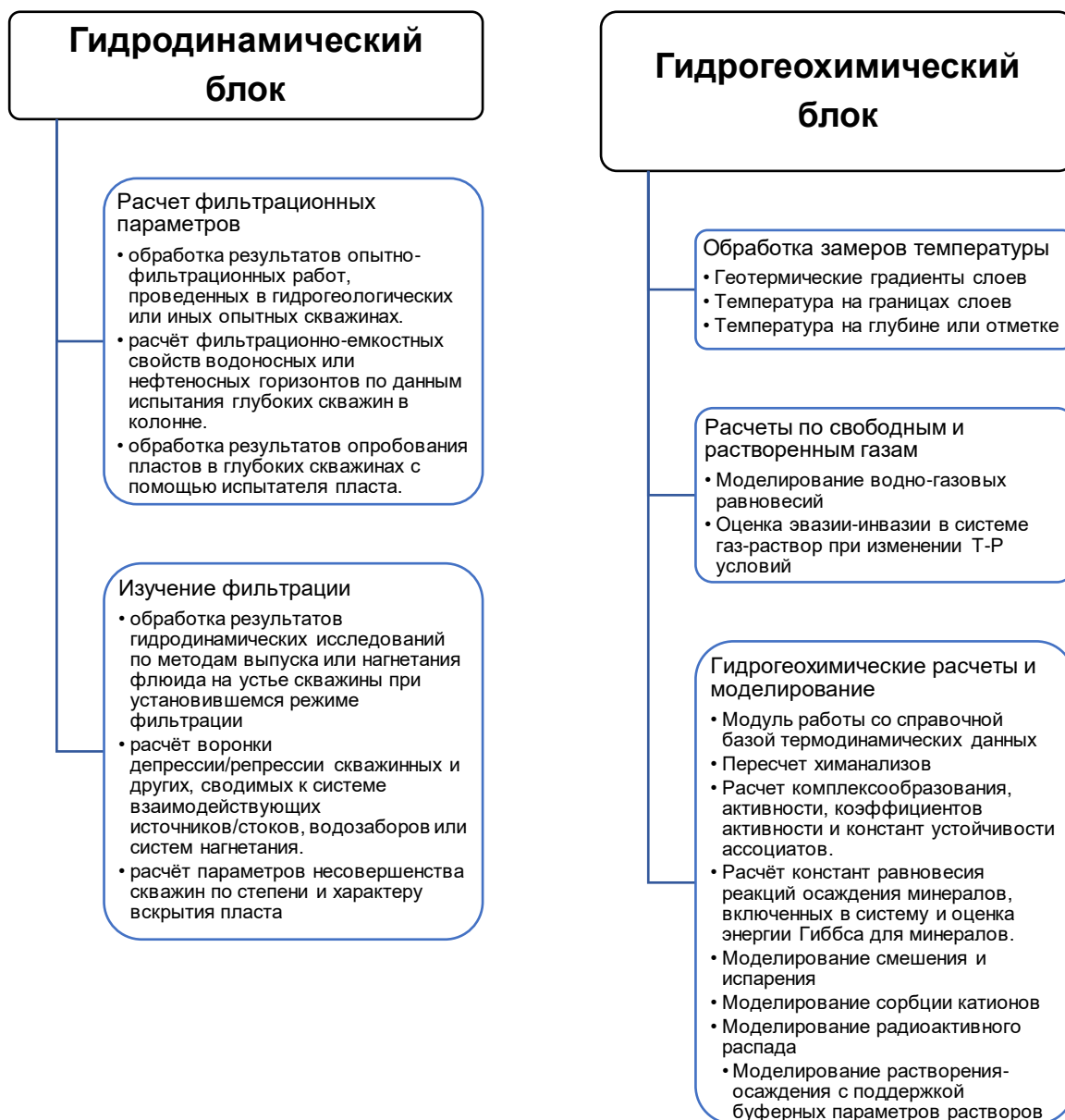


Рис.1 Блоки программного комплекса HydroGeo.

3. Выявлены новые механизмы мобилизации и концентрирования Au, U дополнены некоторые аспекты теории инфильтрационных урановых и россыпных золоторудных месторождений [8-10].

4. Начаты разработки геомиграционных моделей эксплуатирующихся месторождений подземных вод.

5. Осуществлены региональные обобщения по геохимии подземных вод зоны гипергенеза Алтае-Саянской складчатой области и прилегающих структур Западно-Сибирской плиты [3].

В учебном процессе программный комплекс HydroGeo используется для проведения ряда лабораторных работ по курсам «Информационные системы в природообустройстве и водопользовании» и «Гидрогеохимия», читаемым магистрам Томского политехнического университета. Рассмотрим эти работы далее.

Лабораторная работа «Обоснование системы моделирования; пересчет состава природных вод и оценка форм нахождения в природных водах элементов переменной валентности на примере урана и железа». Работа позволяет получить представление о критериях создания системы моделирования; освоить пересчет химического состава природных вод и расчет форм миграции химических элементов средствами программы HydroGeo; произвести оценку форм нахождения урана при различных значениях Eh (Рис. 2).

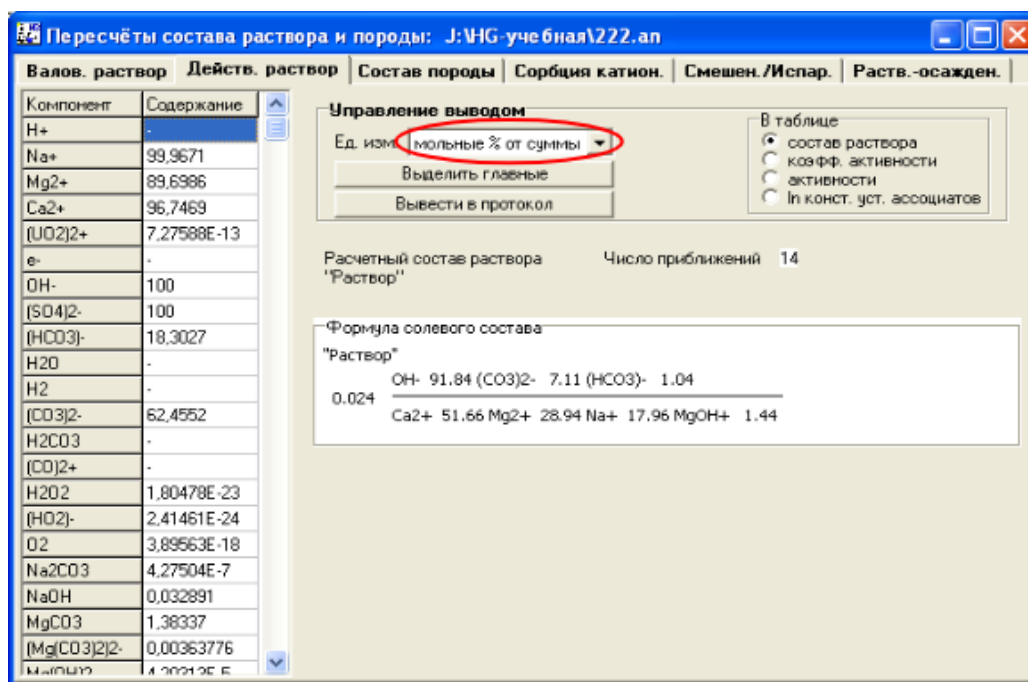


Рис. 2 Пример окна программного комплекса HydroGeo при анализе форм миграции химических элементов.

Лабораторная работа «Моделирование изменения ТР-условий. Моделирование смешения природных вод». Предполагает освоение моделирования изменения термодинамических условий и смешения природных вод различного химического состава средствами программы HydroGeo (Рис. 3).

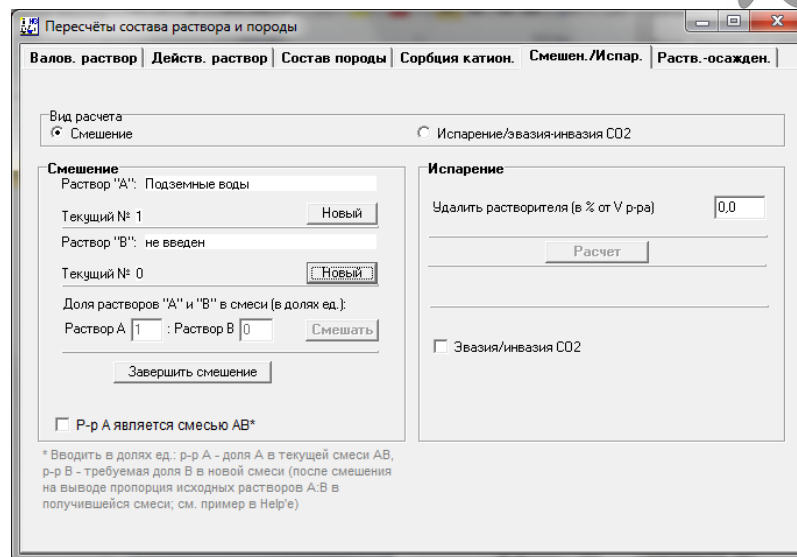


Рис. 3 Пример окна программного комплекса HydroGeo при смешении вод.

Лабораторная работа «Настройка модели 3D сеточной дискретизации. Расчет геофильтрационной 3D модели» (Рис. 4). В ходе работы проводится настройка параметров трехмерной модели, описывающей условный водоносный горизонт, затем производится моделирование прокачки воды через описываемый водоносный горизонт путём ее нагнетания через одну скважину и откачки через другую. В результате выполнения оцениваются напоры подземных вод в водоносном горизонте через разные сроки его эксплуатации (проведения закачек-откачек).

Рис. 4 Пример окна программного комплекса HydroGeo при решении геофильтрационных задач.

В рамках данной работы также решаются геомиграционные задачи с учётом процессов, происходящих в системе «вода-порода».

Заключение

Результаты гидрогеохимических исследований, полученные с использованием физико-химических программ, позволяют раскрыть природу процессов взаимодействий воды с породой в различных условиях, для различных исходных составов раствора и породы. Использование программного комплекса HydrpGeo в учебном процессе позволяет популяризовать и внедрить в практику современные методы исследований.

Список литературы

1. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия Томского политехнического университета. 2002. Т. 305. № 6. С. 348–365.
2. Dutova, E.; Nikitenkov, A.; Kuzevanov, K. The HydroGeo Software Package and Its Usage. E3S Web Conf. 2019, 98, 04005.
3. Dutova, E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai–Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 120. 104673
4. Vologdina, I.V., Dutova, E.M., Pokrovsky, D.S., Pokrovsky, V.D., Radyuk, I.V., 2015. Natural and technogenic mineral new growths at water intakes in Tomsk region Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geol. Geogr. 3, 58–72.
5. Khrushcheva, M.O., Dutova, E.M., Tishin, P.A., Arkhipov, A.L., Nikitenkov, A.N., Chernyshov, A.I. Taloe—sedimentation in an intermittent lake (Russian federation, Republic of Khakassia) // Minerals 2021, 11(5), 522.
6. Хрущева М.О., Дутова Е.М., Тишин П.А., Никитенков А.Н., Чернышов А.И., Архипов А.Л. Минералогические особенности осадков соленого озера Усколь (республика Хакасия) // Геосферные исследования. – 2021.– № 2. –С. 29-43.
7. Dutova E.M. et al. / Hydrodynamic justification of changes in hydrogeochemical conditions of Strezhevoy underground water field (Tomsk region)/ Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2019. V. 330. 9. 204–220/ DOI 10.18799/24131830/2019/9/2274
8. Shvartsev, S.L., Dutova, E.M., 2001. Hydrochemistry and mobilization of gold in the hypergenesis zone (Kuznetsk Alatau, Russia). Geol. Ore Deposits 43 (3), 224–233.
9. Dutova, E.M., Bukaty, M.B., Nevol'ko, A.I., Pokrovsky, D.S., Shvartsev, S.L., 2006. Hydrogenic concentration of gold in alluvial placers of the Egor'evsk area (Salair). Geol. Geofiz. 47 (3), 364–376.
10. Dutova, E.M., Nikitenkov, A.N., Pokrovskiy, V.D., Banks, D., Frengstad, B.S., Parnachev, V.P., 2017. Modelling of the dissolution and reprecipitation of uranium under oxidising conditions in the zone of shallow groundwater circulation. J. Environ. Radioact. 178–179, 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.07.016>.

УДК 556.3

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ И СТРУКТУРА ПРЕПОДАВАНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ «ГИДРОГЕОХИМИЯ» НА КАФЕДРЕ ГИДРОГЕОЛОГИИ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Т.А. Киреева¹, А.В. Лехов¹, Н.А. Харитонов¹, Е.С. Казак^{1,2}, Е.И. Барановская¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: ta_kireeva@mail.ru

²ООО «Фарватер», Москва, Россия, E-mail: Kanigu@mail.ru

Аннотация

Направление «Гидрогеохимия» на кафедре гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова начало развиваться достаточно давно и претерпевало множество изменений. В настоящее время на кафедре сформирована сильная школа гидрогеохимии под руководством профессора А.В. Лехова, куда входят кандидаты и доктора наук, инженеры, аспиранты и студенты разных курсов. Преподавание курсов направления «Гидрогеохимия» включает в себя как практические, так и лекционные занятия. Помимо этого, на кафедре ведется активная научно-исследовательская работа по самым различным гидрогеохимическим направлениям, позволяющим изучать не только природные воды зоны активного водообмена, но и поровые воды донных осадков водоемов, пластовые воды месторождений нефти и газа и различные виды техногенных вод.

Ключевые слова: гидрогеохимия, подземные воды, преподавание, лекции, практические занятия

BRIEF HISTORY AND STRUCTURE OF TEACHING THE "HYDROGEOCHEMISTRY" AT THE HYDROGEOLOGY DEPARTMENT OF THE LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY

T.A. Kireeva¹, A.V. Lekhov¹, N.A. Khatittonova¹, E.S. Kazak^{1,2}, E.I. Baranovskaya¹

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: ta_kireeva@mail.ru

²LLC «Fairwater», Moscow, Russian Federation, E-mail: Kanigu@mail.ru

Abstract

The direction of "Hydrogeochemistry" at the Department of Hydrogeology of the Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University began to develop quite a long time ago and has undergone many changes. Currently, a strong school of hydrogeochemistry has been formed at the department under the leadership of Professor A.V. Lekhov, which includes candidates and doctors of sciences, engineers, postgraduates and students of various courses. Teaching courses in the field of

598

"Hydrogeochemistry" includes both practical and lecture classes. In addition, the department conducts active research work on a variety of hydrogeochemical directions, which allows studying not only natural waters of the zone of active water exchange, but also pore waters of bottom sediments of reservoirs, reservoir waters of oil and gas fields and various types of process ~~man-made~~ waters.

Key Words: hydrogeochemistry, groundwater, teaching, lectures, practical classes

Направление «Гидрогеохимия» на кафедре гидрогеологии было создано и долгие годы поддерживалось проф., д.г.-м.н. К.Е. Питьевой. Она заложила основы таких дисциплин, как «Общая гидрогеохимия», «Региональная гидрогеохимия», «Полевые методы химического анализа подземных вод». В преподавании этих дисциплин в разные годы принимали участие с.н.с. к.х.н. Брусиловский С.А., доц., к.г.-м.н. Семенова В.М., инж. Смирнова С.А., с.н.с., к.г.-м.н. Всеволожская М.А., с.н.с., к.т.н. Чеховских М.М., тех. Тяпкина Н.И., к.г.-м.н. Галицкая И.В., инж. Волохова Е.В.

Знакомство с задачами гидрогеохимии у студентов кафедры начиналось с 4-го семестра и осуществлялось в рамках курса «Общая гидрогеология», в котором был предусмотрен гидрохимический практикум, включавший знакомство с макрокомпонентным составом подземных вод и основными полевыми методами гидрохимических исследований. Преподавание гидрогеохимии продолжалось на 3-ем курсе в рамках дисциплин «Гидрогеохимия» (5-ый семестр) и «Гидрогеохимия. Дополнительные главы» (6-ой семестр). В этих курсах рассматривались общие вопросы формирования химического состава подземных вод, а также основы региональной гидрогеохимии. Кроме того, в магистерскую программу 1 курса был включен курс «Физико-химическая гидрогеодинамика», который был разработан и преподавался Леховым А.В.

Однако, начиная с 2010 г преподавание дисциплины «Гидрогеохимия» стало перестраиваться, согласно требованиям времени: в курс вошли новые направления, и значительное внимание стало уделяться изучению методов гидрохимического моделирования.

Теоретическую часть и прикладные аспекты «общей гидрогеохимии» стала преподавать доц., к.г.-м.н. Киреева Т.А. в рамках курса «Гидрогеохимия» (5-й семестр). В 6-м семестре проф., д.г.-м.н. Лехов А.В. начинал читать более узкую дисциплину «Гидрогеохимическое моделирование». Часть общих вопросов химического состава подземных вод, их генетических типов и гидрохимической зональности были вынесены в курс «Общая гидрогеология». Закономерности формирования и трансформации газохимического облика минеральных и термальных вод рассматриваются в рамках курса «Гидроминеральные и гидротермальные ресурсы России», читаемые для магистрантов кафедры сначала доц., к.г.-м.н. Семеновой В.М. (до 2015 г.), а впоследствии проф., д.г.-м.н. Харитоновой Н.А.

В 2014 г. доц. к.г.-м.н. Киреева Т.А. разработала программу совершенно нового для кафедры направления - нефтепромысловой гидрогеохимии, и начала преподавать (совместно с доц., к.г.-м.н. Корзун А.В., освещающей «динамическую» часть курса) дисциплину «Основы промысловой гидродинамики и гидрогеохимии» для студентов кафедры «Теоретических основ разработки нефтегазовых месторождений» геологического факультета МГУ. Одновременно в этом же году проф., д.г.-м.н. Харитонов Н.А. в рамках курсов «Изотопный состав подземных вод» и «Изотопные методы исследования в гидрогеологии» создала программу также новых для кафедры курсов, связанных с изучением изотопного состава подземных вод. Расширение новых направлений гидрогеохимии было продолжено в 2021 году, когда в. н. с. кафедры к.г.-м.н. Казак Е.С. существенно модернизировала программу гидрохимического практикума и включила в нее детальное изучение новых лабораторных и экспериментальных методов гидрохимических исследований. Особенности прикладной гидрогеохимии освещаются в новом для кафедры курсе в.н.с. к.г.-м.н. Казак Е.С. «Экспериментальная гидрогеохимия», который читается магистрам в 3-ем семестре.

Гидрохимические темы освещаются сотрудниками кафедры в рамках преподавания дисциплин гидрогеологического профиля студентам отделений «Геология», «Геофизика», «Геохимия» геологического факультета, студентам инженерного потока, а также на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова.

Кроме того, курс «Гидрогеохимия» с 2013 г читается студентам геологического факультета филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе. Формат этого курса предусматривает, как лекционные, так и лабораторные занятия, и практически полностью повторяет темы и объем гидрохимических тем, которые преподаются студентам 2 и 3 курсов кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Данная дисциплина до 2018 г читалась доц. Киреевой Т.А., а затем стала преподаваться проф. Харитоновой Н.А.

Значительная «гидрохимическая» часть предусмотрена в курсах «Гидрогеоэкология» (7-й семестр) и «Гидрогеоэкология городов» (для магистрантов во 2-м семестре), посвященных экологическим вопросам, которые на кафедре гидрогеологии читались с 1987 г. доц., к.г.-м.н. М.С. Орловым, а в настоящее время читаются н.с., к.г.-м.н. Е.И. Барановской.

Таким образом, на кафедре гидрогеологии сложилось многоплановое преподавание гидрохимического направления. Остановимся кратко на основных вопросах, которые освещаются в каждом из подразделов.

В рамках курса «Гидрогеология» предусмотрено знакомство с первыми теоретическими представлениями гидрогеохимии: макро- и микрокомпонентный состав подземных вод, понятия рН и Eh, газовый состав и др. Также в этом курсе студенты проходят гидрохимический Практикум, который предусматривает не только практические работы по определению

химического состава воды, но и решение расчетных задач, что позволяет лучше понять и закрепить теоретические вопросы. Задачи, решаемые на гидрохимическом практикуме, изложены в учебном пособии «Практическое руководство по гидрогеологии. Химический анализ природных вод» [1].

В курсе «Гидрогеохимия» рассматриваются вопросы формирования химического состава подземных вод (процессы растворения, осаждения, сорбции и катионного обмена), влияния жизнедеятельности бактерий (биохимические реакции), влияние газового состава, Р-Т и рН-Eh условий), формирования вертикальной и горизонтальной гидрохимической зональности, условия формирования макро- и микрокомпонентного состава инфильтрационных вод. Дается понятие о ПДК элементов при использовании подземных вод для ХПВ. Разбираются основные классификации и основные генетические типы подземных вод. Курс в основном теоретический и читается согласно учебному пособию «Гидрогеохимия» [2].

В курсе «Основы промысловой гидродинамики и гидрогеохимии», в его «гидрохимической» части, кроме общих вопросов формирования химического состава подземных вод, разбираются специальные вопросы нефтепромысловой гидрогеохимии. В частности, рассматривается образование специфических техногенных вод (рассолов солянокислотных обработок и конденсатных вод, фильтрата бурового раствора) и принципы их отличия от природных вод, гидрохимические процессы, осложняющие разработку и их прогноз (солеотложение, растворение минералов коллектора, обводнение добывающих скважин), закономерности образования коррозионно опасных газов, проведение термохимических реакций, экологические последствия нефтеразработок. Курс, кроме лекционной части, предусматривает много расчетных заданий, в частности аналитический прогноз солеотложения, расчет газонасыщенности, определение объема формирующихся конденсатных вод, отбраковка гидрохимических анализов и др. Преподавание в основном ведется по учебному пособию «Нефтегазопромысловая гидрогеохимия» [3].

В курсе «Физико-химическая гидрогеодинамика» изложены физико-химические и математические основы миграции подземных вод, методы построения математических моделей процессов и определения природных параметров. Работа состоит из пяти частей: описания гидрогеохимической системы, изложения процессов трансформации вещества подземных вод, процессов массопереноса, моделей миграции многокомпонентных растворов и примеры построения моделей для исследования конкретных процессов. Сделан обширный практикум из 9 задач и курсовая работа. Часть работы выполнял доц. Расторгуев А.В. Существует учебник А.В. Лехова [4] по такому же названию.

В «Гидрохимическом моделировании», обязательном на 3 курсе, изложены основы математического моделирования равновесных гидрогеохимических процессов, краткие теоретические основы, основные процессы трансформации растворенных веществ,

аналитические и компьютерные методы моделирования, методы построения моделей основных процессов трансформации состава вод и взаимодействующих с ними пород. Большую часть занимают задачи практического выполнения (10 задач), построенные на основании прикладных исследований автора и примеров из литературных данных. Изложение сопровождается приложением, содержащим фактические данные и наборы параметров, необходимых для проведения расчетов. Основные положения курса изложены в учебнике А.В. Лехов [5] по такому же названию. С 2024 г. курс будет вести к.г.-м.н. Л.А. Лямина.

В курсе «Изотопные методы в гидрогеологии» студенты получают знания о химическом и изотопном составе природных вод, о закономерностях поведения изотопов химических элементов в природных и техногенных процессах, а также о методах исследования изотопных характеристик водных объектов и методиках использования изотопно-геохимических маркеров при реконструкции основных гидрогеологических, геохимических и экологических процессов. Прослушав данную дисциплину, студенты кафедры узнают, как грамотно применять данные по изотопам для выяснения источников питания, разгрузки и режима водопритоков, установления взаимосвязи водоносных горизонтов, водообильности, расчета временных параметров водообмена в водоносной системе и т. д.

В курсе «Экспериментальная гидрогеохимия» (автор в.н.с., к.г.-м.н. Казак Е.С.) студентов-магистров знакомят с особенностями методов анализа состава компонентов системы «вода-порода», а также рассматриваются прикладные аспекты гидрогеохимии. Курс наполнен авторскими примерами решения реальных гидрогеохимических задач (case study), как для зоны активного водообмена, и поровых вод донных осадков поверхностных водных объектов, так и для зоны затрудненного водообмена, в том числе для пластовых вод месторождений углеводородов.

В рамках курсов экологического направления «Гидрогеоэкология» и «Гидрогеоэкология городов» дается обзор гидрогеоэкологических проблем по отраслям хозяйственной деятельности, и обсуждаются вопросы влияния промышленности, транспорта, сельского хозяйства, животноводства и т.д. на химический состав подземных вод. Рассматриваются нормативы для оценки качества подземных вод и возможные последствия их нарушения. Даются сведения о механизме токсичного воздействия загрязнения природных, в том числе хозяйственно-питьевых вод на физиологические процессы в организме человека. На практических занятиях студенты знакомятся со способами оценки качества подземных вод, рассчитывают показатели загрязненности воды и дают заключение о качестве воды.

Для освоения курса студентам рекомендуется учебное пособие «Гидрогеоэкология городов» М.С. Орлов, К.Е. Питьева [6], где анализируются региональные, гидрогеохимические особенности сложившейся обстановки в городских поселениях, источники подтопления, истощения и загрязнения подземных вод. Исследуются негативные инженерно-геологические

процессы, вызванные антропогенным воздействием на подземные воды. Предложены схемы мониторинга подземных вод, а также меры охраны, защиты и реабилитации подземных вод. В качестве примеров взяты города Москва, Калуга и некоторые другие населенные пункты.

Список литературы

1. Киреева Т.А., Филимонова Е.А., Гоманюк Л.А. «Практическое руководство по гидрогеологии. Химический анализ природных вод». Учебно-методическое пособие. М: МаксПресс. 2015. 87 с.
2. Киреева Т.А. Учебное пособие. 2016. В журнале сайт геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, С.1-197. [http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ: Гидрогеохимия](http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Гидрогеохимия).
3. Киреева Т.А. «Нефтегазопромысловая гидрогеохимия» Учебное пособие. М.: МаксПресс. 2017. 224 с
4. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика / М.: КДУ, 201 с. 499
5. Лехов А.В. Гидрогеохимическое моделирование / М.: каф. гидрогеологии МГУ, в печати, 2021. 157 с.
6. Орлов М.С., Питьева К.Е. Гидрогеоэкология городов: учебное пособие. — Москва: ИНФРА-М, 2013. — 288 с.

УДК 556

КУРС «РЕГИОНАЛЬНАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ» – ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ

Е.Ю. Потапова*¹, А.В. Корзун², Т.С. Егоров³

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail:

potapova081962@mail.ru

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: a_korzun@mail.ru

³ФГБУ «Гидроспецгеология» E-mail: tsegorov@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются вопросы, связанные с преподаванием курса «Региональная гидрогеология» магистрантам первого года обучения на кафедре гидрогеологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

В связи с тем, что курс с точки зрения авторов сам по себе интересный по сути, а также очень нужный для формирования кругозора специалиста ему требуется обновление. В частности, весьма важна разработка методических подходов в его преподавании, как блока лекций так проведения семинарских занятий.

Ключевые слова: региональная гидрогеология, методика, структура, артезианский бассейн, гидрогеологическая складчатая область, цифровые карты, районирование.

COURSE «REGIONAL HYDROGEOLOGY» – PROBLEMS AND TASKS

E.U. Potapova*¹, A.V. Korzun², T.S. Egorov³

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: E-mail: potapova081962@mail.ru

²Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: E-mail: a_korzun@mail.ru

³FGBI "Hydrospetsgeology"

Abstract

The issues related to the teaching of the Regional Hydrogeology course to first-year undergraduates at the Department of Hydrogeology of the Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University are considered.

Due to the fact that the course from the point of view of the authors is interesting in itself in fact, and also very necessary for the formation of a specialist's outlook, it needs updating. In particular, it is very important to develop methodological approaches in its teaching, both a block of lectures and seminars..

Key Words: regional hydrogeology, methodology, structure, artesian basin, hydrogeological folded area, digital maps, zoning

Введение

Региональная гидрогеология - раздел гидрогеологии, изучающий закономерности распространения и формирования подземных вод в пределах крупных участков территории (геологической структуры разного типа, естественноисторические или административные районы и др.).

Главные задачи региональной гидрогеологии: изучение гидрогеологических особенностей отдельных структур суши и моря; выявление региональных закономерностей распространения подземных вод, условия их залегания их зональности, особенности динамики, баланса, режима, ресурсов, возраста и генезиса подземных вод; разработка принципов и методов регионального изучения закономерностей распространения подземных вод и изучения условий формирования подземных вод. использования выявленных закономерностей решения различных задач, в лечебных целях, в качестве промышленного сырья, для получения тепла и энергии.

Основные направления региональной гидрогеологии: гидрогеологическое стратифицирование; структурно-гидрогеологическое районирование; региональная гидрогеодинамика; региональная гидрогеохимия; региональная гидрогеотермия; палеогидрогеология и эволюция развития структур; прогноз региональных гидрогеологических процессов; исследования гидрогеологии дна мирового океана и шельфа.

Содержание и специфика курса «Региональная гидрогеология»

Курс «Региональная гидрогеология» является одним из завершающих в специальной подготовке – гидрогеологов:

синтезирует знания многих геологических дисциплин (общая геология, история геологического развития, геотектоника, геохимия, геофизика и др.) для выявления и изучения региональных гидрогеологических закономерностей,

широко использует знания, полученные при изучении гидрогеологических дисциплин (общая гидрогеология, динамика подземных вод, гидрогеохимия, методы гидрогеологических исследований) для оценки направленности и прогнозирования гидрогеологических процессов.

Все это требует от студента разнообразных познаний, увлеченного отношения к предмету, желания познакомиться с новыми для него вопросами и проблемами.

Специфической особенностью курса является обширный объем информации: географической, геологической, гидрогеологической, исторической.

К сожалению (или к радости), курс довольно краткий, всего 42 часа аудиторной работы, за которые совершенно невозможно рассказать обо всех интересных и специфических чертах

той или иной гидрогеологической структуры. Кроме того, к 1 году магистратуры практически начисто забыты многие вопросы геологии и истории геологического развития, не говоря уже о географии (порой доходит до абсурда, когда реку Обь ищут в районе бассейна реки Волги)

Обилие конкретных данных в некоторых разделах курса дастся не для заучивания, а для понимания причин и следствий гидрогеологических процессов, состояния изученности территорий и степени использования подземных вод [1].

Наибольший вклад в развитие региональной гидрогеологии внесли русские и советские учёные: С. Н. Никитин, Г. Н. Каменский, В. С. Ильин, А. Н. Семихатов, Ф. П. Саваренский, А. И. Силин-Бекчурин, О. К. Ланге, А. М. Овчинников, Б. И. Куделин, Ф. А. Макаренко, Н. И. Толстухин, И. К. Зайцев, Н. А. Маринов, В. А. Всеволожский и др.

Наиболее полная сводка по региональной гидрогеологии территории России дана в многотомной монографии «Гидрогеология СССР» (1966-72) [3], кроме того есть еще две монографии: Региональная гидрогеология. Учебник для вузов Недр, Москва, 1987 г. авторы Кирюхин В. А., Толстухин Н. И. [1]; Региональная гидрогеология. Учебное пособие. - Санкт-петербургский горный институт, 2005 г. (Кирюхин В. А.) [2].

Вся изданная литература свидетельствует о том, что очень велико **практическое значение региональной гидрогеологии**, которое связано с оценкой ресурсов (запасов) подземных вод, обоснованием схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, особенно в районах деятельности горнодобывающих предприятий, разработкой схем гидромелиоративного районирования, использованием гидрогеологической информации при оценке перспектив нефтегазоносности, расчётами водопритоков в горные выработки, решением вопросов охраны природной среды и др. [3].

Только благодаря региональным исследованиям возможно создание региональных моделей тех или иных регионов или гидрогеологических структур для решения задач управления водным хозяйством страны [2].

В процессе чтения курса создана **библиотека презентаций** по ряду гидрогеологических структур первого порядка и некоторым частным вопросам курса (структурно-тектонический принцип районирования, региональное моделирование, гидрогеология криолитозоны).

Вводная лекция, посвященная предмету, структурно-тектоническому принципу районирования, литературе и известным специалистам в области региональной гидрогеологии занимает два часа.

Артезианские бассейны платформенного типа: Московский, Северо-Двинский, Волго-Камский, Прикаспийский, Сурско-Хоперский, Печерский, Западно-Сибирский, Ангаро-Ленский, Якутский. Всего 9 артезианских бассейнов – соответственно 8 презентаций по 50-60 слайдов в каждой на 18 часов курса.

Гидрогеологические горно-складчатые области Восточно-Сибирская, Уральская, Алтае-Саянская, Верхояно-Чукотская, Камчатская – собственно одна из структур по возрасту складчатости. Всего 5 Гидрогеологических горно-складчатых областей – соответственно 5 презентаций по 50-60 слайдов в каждой на 10 часов курса.

Как и в любой другой геологической дисциплине в региональной гидрогеологии сложились определенные соотношения теоретического и эмпирического методов познания. Специфика теоретических исследований заключается в необходимости изучения региональных и глобальных гидрогеологических процессов, что требует широкого применения моделирования.

Вопросам регионального моделирования с демонстрацией постоянно-действующих моделей Московского региона, Калужской и Курской областей посвящено всего два часа лекционного курса, хотя тема весьма обширная. Предполагается демонстрировать магистрантам региональную модель Крымского полуострова, которая создана на кафедре гидрогеологии в 2023 году для решения вопросов, связанных с водоснабжением территории.

Вопросам региональной гидрогеологии криолитозоны (закономерностям формирования подземных вод под воздействием мерзлотного фактора) посвящено также всего два часа лекционного курса.

Таким образом, в лекционной части курса рассматриваются не все гидрогеологические структуры России и времени в принципе хватает.

В качестве семинарских занятий, на которые приходится всего 8 часов аудиторной нагрузки, магистранты анализируют гидрогеологические карты масштаба 1: 500 000 и 1:2 500 000. Кроме того, заслушиваются доклады с презентациями по описанию и анализу некоторых гидрогеологических структур 2 го порядка.

В настоящее время специалистами ФГБУ «Гидроспецгеология» проводится создание комплектов гидрогеологической и инженерно-геологической карт масштаба 1: 1 000 000 полностью в формате ГИС с объяснительными записками и структурированными фондами геолого-гидрогеологической и инженерно-геологической информации.

К картам прилагаются наглядные гидрогеологические разрезы, кроме того в наличие имеются таблицы, где имеют место основные параметры водоносных горизонтов и водоупорных толщ. Карты в купе с разрезами весьма наглядно отражают гидрогеологические особенности регионов, характеризующиеся «удручающим разнообразием».

Работы проводятся с использованием программного комплексов ESRI ArcGIS с возможностью векторного представления информации в различных слоях.

Основной целью такой работы является создание геолого-картографической основы для решения федеральных и региональных задач по изучению и оценке состояния, использования и управления государственным фондом недр в части подземных вод и осуществления

государственного мониторинга состояния недр, что представляется важным для формирования интересов и кругозора будущих специалистов-гидрогеологов.

Безусловно, было бы интересно и важно демонстрировать будущим специалистам примеры таких карт и баз данных для отдельных регионов или гидрогеологических структур.

Было бы здорово, если бы магистранты могли работать с комплектами карт, которые создаются на компьютерной основе (гидрогеологическая; гидрохимическая по основным водоносным подразделениям; использования питьевых и технических, минеральных подземных вод; защищённости основных водоносных подразделений; прогнозных ресурсов подземных вод). В процессе таких работ в лучшей степени можно ознакомиться с гидрогеологической стратификацией разрезов отдельных гидрогеологических структур или регионов, регионально оценить ресурсный потенциал подземных вод.

Заключение

Курс «Региональная гидрогеология» требует постоянного обновления и совершенствования применительно к практическим задачам, особенно вопросам регионального картирования с использованием компьютерных технологии, применения ГИС систем, работе с базами данных в которых находится бесценная информация накопленная трудами гидрогеологов и специалистов других направлений в процессе съемочных и других специализированных работ. Также требует особого внимания раздел курса посвященный региональному моделированию, как инструменту анализа и управления водными ресурсами отдельных территорий или гидрогеологических структур.

Список литературы

1. Кирюхин В.А., Толстихин Н.И. Региональная гидрогеология. Учебник для вузов Недр, Москва, 1987 г., 382 стр.
2. Кирюхин В.А.. Региональная гидрогеология. Учебное пособие. -Санкт-петербургский горный институт, 2005 г.- 344 с.
3. Гидрогеология СССР. Сводный том. Вып. 1, 2,3,4,5–М.:Недра,1974. 656 с.
4. Зайцев И.К. Основные типы гидрогеологических структур СССР / Ленинград: Труды ВСЕГЕИ. Том 229, 1974. 92 с.

УДК 556.3

ДЕЛОВАЯ ИГРА КАК ФОРМА ПОСТРОЕНИЯ КУРСА «ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД»

А.Е. Преображенская*¹, С.О. Гриневский¹, Р.С. Штенгелов¹, Е.А. Филимонова¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail:

shur_gmur22@mail.ru

Аннотация

Деловая игра – это метод обучения профессиональной деятельности, предполагающий решение учебно-производственных задач в игровой форме, когда обучающиеся берут на себя роли и в соответствии с установленными правилами, в условиях заданной игровой ситуации, выполняют профессиональные функции, имитируя практическую деятельность и вступая в коллективные взаимоотношения. Использование в учебном процессе формы обучения в виде деловой игры успешно помогает развивать у студентов качества, необходимые профессионалу.

Курс «Оценка запасов подземных вод» в форме деловой игры построен на основе оригинального программного комплекса EXPLAY, моделирующего производство основных видов гидрогеологических работ при разведке месторождения подземных вод приречного типа. В такой форме курс преподается на кафедре гидрогеологии с 1993 г. и является логичным продолжением теоретических курсов «Разведочная гидрогеология» и «Поиски и разведка подземных вод». В процессе деловой игры бригада студентов на основе постоянно действующей модели реального месторождения подземных вод проектирует и виртуально проводит полевые исследования, результаты самостоятельной обработки которых позволяют им выбрать наиболее перспективный участок месторождения, оценить необходимые геофильтрационные параметры и провести подсчет эксплуатационных запасов подземных вод.

В ходе выполнения индивидуального задания студенты последовательно проходят этапы поисков, разведки и подсчета запасов подземных вод. Итогом каждого этапа, как и в реальных условиях, является составление отчетных материалов, которые проходят экспертизу у преподавателей курса.

Ключевые слова: Деловая игра, оценка запасов, подземные воды, стадийность геолого-разведочных работ

BUSINESS GAME AS A FORM OF BUILDING A «GROUNDWATER RESERVES ESTIMATION» COURSE

A.E. Preobrazhenskaya*¹, S.O. Grinevsky¹, R.S. Shtenelov¹, E.A. Filimonova¹

¹Moscow State University, Moscow, Russian Federation, E-mail: shur_gmur22@mail.ru

Abstract

Business game is a method of teaching professional activities, which involves solving training and production tasks in a game form, when students take on roles and according to the established rules, in a given game situation, perform professional functions, imitating practical activities and entering into collective relations. The use of the form of learning in the form of business game successfully helps to develop in students the qualities necessary for a professional.

“Groundwater reserves estimation” course in the form of business game is based on the original EXPLAY software system, simulating production of main hydrogeological works during the exploration of riverbank groundwater deposits. This course has been taught at the Department of Hydrogeology since 1993 and is a logical continuation of the theoretical courses "Exploration Hydrogeology" and "Groundwater Prospecting and Exploration". During the business game a team of students based on a continuously operating model of a real groundwater deposit projects and virtually conducts field research, the results of self processing of which make it possible to select the most promising section of the deposit, evaluate the necessary hydrogeological parameters and calculate groundwater production reserves.

In the course of individual assignment students sequentially pass the stages of prospecting, exploration and calculation of groundwater reserves. The result of each stage, as in real conditions, is the preparation of reporting materials, which are examined by the course teachers.

Key Words: Business game, groundwater reserves estimation, geological exploration stages

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод является ключевым этапом при выполнении поисково-разведочных работ на различных стадиях гидрогеологических исследований, а также при выдаче лицензий на использование подземных вод для различных целей. Так и курс «Оценка запасов подземных вод» является ключевым и закономерным продолжением при преподавании ряда курсов (Гидрогеология-Гидрогеодинамика-Разведочная гидрогеология-Поиски и разведка подземных вод).

Курс «Оценка запасов подземных вод» преподается на кафедре гидрогеологии МГУ в виде деловой игры уже в течение 30 лет, начиная с 1993 года по инициативе проф. Штенгелова Р.С. Данный курс читается на первом году магистратуры в весеннем семестре, имеет общий объем 144 часа из которых 39 часа аудиторной нагрузки (лекции и практические занятия),

а оставшееся время – самостоятельная работа студентов. Итоговой аттестацией по курсу является экзамен.

Деловая игра широко применяется как педагогическая технология в образовательном процессе, направленная на активизацию познавательной деятельности обучающихся. Деловые игры приводят к появлению мотивационного аспекта процесса обучения, что немаловажно в сложившейся системе образования.

Как известно, оценка запасов подземных вод может проводиться несколькими методами и по различным расчетным схемам в зависимости от природных условий. Объем информации, посвященный этим вопросам, огромен и не может быть помещен в рамки небольшого курса без потери качества. По этой причине, курс «Оценка запасов подземных вод» ориентирован на приречный тип месторождения, как наиболее распространенный.

Основой курса является деловая игра, в ходе которой студенты проводят виртуальную разведку месторождения на основе оригинальной компьютерной программы EXPLAY, разработанной на кафедре гидрогеологии МГУ (авторы Штенгелов Р.С, Гриневский С.О.) и имитирующей основные виды полевых исследований на приречных месторождениях подземных вод. В качестве объекта рассматривается Пермилловское месторождение подземных вод Архангельской области, разведанное в 1980-х годах, по которому на кафедре накоплен огромный фактический материал в результате работ, проводимых на нем в течение нескольких лет. Этот материал позволил создать базу данных и постоянно-действующую модель месторождения высокой степени детальности, которые имитируют природные гидрогеологические условия территории и являются предметом виртуальной разведки в ходе деловой игры.

Разведчики с помощью программы-оболочки выбирают метод исследований и заказывают работы в определенном месте, в текущий момент игрового времени, согласно самостоятельно составленному проекту работ. После чего идет обращение к базе данных и постоянно-действующей модели, на основе которых моделируется заказанный вид работ. Например, при бурении скважины ее геолого-технический разрез в указанной точке формируется интерполяцией по базе данных, а производство наиболее «сложных» работ (откачки, расходомерия) проводится моделированием в автоматическом режиме на моделях-врезках. Результаты работ в виде первичной информации поступают разведчикам для последующей интерпретации.

Деловая игра по разведке и оценке запасов подземных вод ведется по определенным правилам:

1. Академическая группа разбивается на несколько бригад от 3 до 4-х человек. В каждой бригаде выбирается бригадир, который берет на себя роль ответственного исполнителя и должен обладать лидерскими качествами. Бригадир наделен большими

полномочиями, определяет роль каждого члена бригады, распределяет обязанности внутри коллектива, определяет стратегию действий, несет ответственность за действия своей команды. К каждой бригаде прикрепляется куратор-преподаватель, который консультирует бригаду по текущим вопросам, проверяет результаты выполненных работ, корректирует направление работ, помогает выявлять ошибочные решения и т.д.

2. Каждая бригада самостоятельно разрабатывает проект геологоразведочных работ, производит их на объекте и обрабатывает полученные результаты исследований. Поскольку все бригады проводят разведку и оценку запасов в пределах одного Пермиловского месторождения подземных вод, для каждой бригады разрабатывается индивидуальное техническое задание. Например, меняется заявленная потребность, или накладываются ограничения на расположение водозабора и его допустимое воздействие на речной сток.

3. Все результаты разведочных работ студенты получают в виде первичной полевой документации (литологическое описание керна скважин, журналы откачек, гидрометрических работ, расходометрических испытаний, результаты химического анализа воды, и др.), интерпретацию которой и расчет параметров они проводят самостоятельно, используя свой накопленный багаж знаний.

4. Деловая игра проходит в режиме «реального» времени, которое отсчитывается от начала работ и движется по мере их выполнения. «Реальность» времени заключается в том, что в программе реализована сезонная изменчивость природных условий, а также заложена близко к реальной длительность производства геолого-разведочных работ. Это требует определенного планирования сроков их проведения и обеспечивает последовательное получение результатов работ по мере их выполнения (например, результаты режимных наблюдений поступают разведчикам постепенно, с течением времени и т.д.)

5. Все работы, проводимые на объекте, имеют свою стоимость в условных единицах, которая, как и в реальной жизни, зависит от их вида и количества, сложности, геологического строения и пр. Этот показатель не является основным, однако сравнение «экономической эффективности» работ разных бригад стимулирует рациональность их планирования и проведения.

Структурно курс «Оценка запасов подземных вод» состоит из четырех частей: анализ фондовых материалов, предварительная разведка, детальная разведка, оценка запасов подземных вод.

В небольшой по объему лекционной части каждого раздела рассматриваются основные цели, задачи, методика проведения и интерпретации гидрогеологических исследований и обсуждается общая стратегия постановки работ на различных этапах разведки. Особое внимание уделяется принципам обоснования схемы проектного водозабора и постановки необходимых

прогнозных расчетов. Однако, основной объем курса – это практические занятия и самостоятельная работа студентов.

В рамках первой части студентам предлагается изучить реальный отчет о поисках пресных подземных вод для водоснабжения г. Архангельска на Пермиловском месторождении, по итогам чего они готовят первый раздел по характеристике данного месторождения. Как и в отчетах, представляемых на рассмотрение Государственной комиссии по запасам, в данный раздел входят описание физико-географических условий, геологического строения и гидрогеологических условий. Главным итогом первой части курса является самостоятельный анализ результатов работ поисковой стадии и обоснование, что изучаемое месторождение относится к приречному типу.

Целью второй части курса (Предварительная разведка) является выделение в пределах площади месторождения одного или нескольких участков, перспективных для расположения будущего водозабора. Для их обоснования студентам предлагается использовать следующие виды работ: гидрометрическая съемка, химическое опробование подземных и поверхностных вод, одиночные откачки, замеры уровней в скважинах, замеры дебитов родников.

В рамках третьей части курса проводятся детальные исследования в границах участка проектного расположения водозабора, выделенного по итогам предварительной разведки. На данной стадии перед студентами стоят следующие задачи: оценка неоднородности разгрузки подземных вод, характеристика гидродинамического и гидрохимического режима подземных и поверхностных вод, изучение вертикальной фильтрационной неоднородности и оценка фильтрационных параметров целевого водоносного комплекса, оценка параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Итогом работ этого этапа является обоснование расчетной геофильтрационной схемы и количественная оценка всех параметров, необходимых для прогнозных расчетов водозабора.

В четвертой части курса проводится оценка запасов подземных вод на основе аналитических расчетов водозабора по схеме линейного ряда у несовершенной реки. Поиск оптимальной схемы проектного водозабора студентами осуществляется через многовариантный расчет оптимизации расстановки скважин в линейном равномерном равнодебитном ряду на самостоятельно написанной программе в рамках одного из параллельных курсов, посвященного языкам программирования. Для итогового проектного варианта водозабора проводится оценка балансовой структуры эксплуатационных запасов и прогноз качества воды.

Итоги работы студенты представляют в виде отчета, в котором представлены все результаты выполненных работ и оценки запасов. В заключении приводятся характеристика проектного водозаборного ряда, балансовая структура запасов месторождения, прогнозные состав воды на водозаборе и масштабы его воздействия на речной сток.

В рамках курса предусмотрены промежуточная и итоговая аттестация. Итоговая аттестация (экзамен) проходит в виде беседы экзаменационной комиссии и студенческой бригады, которая разделена на две части. Половина экзамена отдана под защиту отчета, имитируя защиту в Государственной комиссии по запасам, где экспертами выступают преподаватели, которые заранее ознакомились с отчетными материалами и составили список замечаний. Вторая половина экзамена посвящена различным вопросам, которые помогают выявить уровень владения методами поисков и разведки подземных вод и их комплексирования, глубину знаний о гидрогеологическом строении территории.

Таким образом, пройдя курс «Оценка запасов подземных вод» в виде деловой игры, студенты не только овладевают знаниями по стадийности гидрогеологических работ на месторождении и методам их интерпретации, но и получают первые виртуальные практические навыки их постановки и проведения, которые будут полезны в реальной производственной деятельности.

УДК 556.3

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СТРУКТУРЕ И СОДЕРЖАНИЮ УЧЕБНОГО КУРСА «РЕГИОНАЛЬНАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ»

В.В. Хаустов¹¹Национальный исследовательский Белгородский государственный университет, Белгород, Россия,

E-mail: khaustov@bsu.edu.ru

Аннотация

Современная региональная гидрогеология традиционно рассматривает закономерности распространения и формирования подземных вод в различных типах гидрогеологических структур, включая структуры дна Мирового океана, и ассимилирует в себе результаты всех когда-либо проводившихся гидрогеологических исследований. На сегодняшний день колоссальные объемы накопившихся знаний в области гидрогеодинамики, гидрогеохимии, гидрогеотермии и экологической гидрогеологии конкретных регионов существенно осложняют процесс преподавания и изучения дисциплины региональная геология. Предложен оригинальный методический подход в освещении оценки гидрогеологических условий того или иного региона с учетом современных положений глубинной геодинамики и теории тектоники литосферных плит (геодинамический подход). Главной отличительной особенностью подобного подхода является рассмотрение не абсолютно всех гидрогеологических структур (традиционный подход), а только тех из них, которые контрастно иллюстрируют определенный тип современного геодинамического режима, влияющего на формирование подземных вод.

Ключевые слова: гидрогеология, регион, гидрогеологическая структура, глубинная геодинамика, теория тектоники литосферных плит.

GEODYNAMIC APPROACH TO THE STRUCTURE AND CONTENT OF THE TRAINING COURSE «REGIONAL HYDROGEOLOGY»

V.V. Khaustov¹¹National Research Belgorod State University, Belgorod, Russian Federation, E-mail: khaustov@bsu.edu.ru

Abstract

Modern regional hydrogeology traditionally considers the patterns of distribution and formation of groundwater in various types of hydrogeological structures, including the structures of the bottom of the World Ocean, and assimilates the results of all hydrogeological studies ever carried out. To date, the enormous amount of accumulated knowledge in the field of hydrogeodynamics, hydrogeochemistry,

hydrogeothermy and ecological hydrogeology of specific regions significantly complicates the process of teaching and studying the discipline of regional hydrogeology. An original methodological approach is proposed in elucidating the assessment of the hydrogeological conditions of a particular region, taking into account the modern provisions of deep geodynamics and the theory of lithospheric plate tectonics (geodynamic approach). The main distinguishing feature of this approach is the consideration of not absolutely all hydrogeological structures (traditional approach), but only those that contrastly illustrate a certain type of modern geodynamic regime that affects the formation of groundwater.

Key Words: hydrogeology, region, hydrogeological structure, deep geodynamics, plate tectonics.

Введение

Современная отечественная региональная гидрогеология ассимилирует в себе результаты всех гидрогеологических исследований, когда-либо проводившихся в нашей стране. Традиционно региональная гидрогеология (Гидрогеология СССР, Гидрогеология России) занимается изучением подземных вод в пределах конкретных гидрогеологических структур. Основой региональной гидрогеологии является представление о гидрогеологическом районе (регионе), под которым понимается элемент гидrolитосферы с едиными условиями формирования подземных вод и ограниченный естественными гидрогеологическими границами различного типа.

На сегодняшний день общепринятым принципом гидрогеологического районирования является структурно-гидрогеологический принцип (Зайцев И.К., Толстихин Н.И., Каменский Г.Н., Овчинников А.М., Пиннекер Е.В., Степанов В.М., Всеволожский В.А., Кирюхин В.А., Крысенко А.М., Судариков С.М. и др. При подобном подходе выделяются гидрогеологические районы как определенные структурно-геологические элементы земной коры с разнообразными структурно-тектоническими границами между ними.

По мнению приведенных авторов, в гидрогеологическом районе рассматривается пространственное размещение подземных вод, изучается их качество и оценивается количество, решаются вопросы генезиса и формирования химического состава, даются рекомендации по возможному использованию отдельных групп вод в народном хозяйстве, освещаются гидрогеологические и экологические проблемы.

Объем разнообразной информации в региональной гидрогеологии огромен и постоянно увеличивается, особенно в последние десятилетия, в связи с появлением новых направлений исследований в геологии и гидрогеологии и ростом объема фактического материала по разведке, оценке и переоценке запасов подземных вод различного назначения. Следовательно, для успешного освоения интенсивно накапливаемых материалов региональных исследований весьма актуально овладение навыками их анализа и интерпретации.

Методы исследований

Методы исследований в региональной гидрогеологии представлены [1]:

- методами изучения пространственных закономерностей (гидрогеологическое картирование);
- методами палеогидрогеологических реконструкций гидрогеологических обстановок прошлых эпох;
- методами осмысления и обобщения материалов среднемасштабных съемок, опорных разрезов, режимных наблюдений, анализа аэро- и космосъемки;
- статистическими методами обработки первичных материалов геолого-гидрогеологических исследований, численного моделирования гидрогеологических процессов, применением ГИС-технологий.

Результаты и их обсуждения

Исторически в составе курса сложились условно две части [1-8]. В первой части (теоретической) приводится понятийно-смысловой блок, обсуждаются теории формирования гидролитосферы, анализируются структурно-пространственные закономерности размещения скоплений подземных вод, рассматриваются теории, объясняющие условия формирования и эволюцию гидрогеологических систем, метаморфизацию подземных вод, связь между химическим составом подземных вод, условиями их залегания, геологическим строением и физико-географической обстановкой.

Вторая часть (описательно-прикладная), содержит материал об особенностях гидрогеологии практически всех выделенных общепринятых провинций, областей и районов России в прикладном аспекте. По этой причине специфической особенностью курса «Региональная гидрогеология» является весьма внушительная по объему информация – историческая, географическая, геологическая, гидрогеологическая, экологическая.

Очевидно, что мультидисциплинарность и огромные размеры информации существенно затрудняют успешное освоение дисциплины студентами, что, в этой связи, требует совершенствования методических подходов к ее преподаванию. Так, изучающим дисциплину «Региональная гидрогеология» предлагается обилие конкретных данных в соответствующих разделах курса использовать не для заучивания, а для понимания причин и следствий гидрогеологических процессов, состояния изученности территорий и степени использования подземных вод [1; 6]. Однако, как показывает опыт, подобный подход все же не решает указанную проблему в целом.

В основу нового взгляда на структуру и содержание курса «Региональная гидрогеология» положены одноименные курсы лекций, которые читались студентам-гидрогеологам в Санкт-Петербургском государственном университете (Мартынова М.А.),

студентам специальности 21.05.02 «Прикладная геология» специализация «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» в Иркутском национальном исследовательском техническом университете (Диденков Ю.Н.) и Белгородском национальном исследовательском университете (Хаустов В.В.) [9].

Главной отличительной особенностью подхода авторов является попытка дать оценку гидрогеологических условий того или иного региона с учетом современных положений глубинной геодинамики и теории тектоники литосферных плит (геодинамический подход).

В результате, по-новому решается вопрос о глубинных процессах, влияющих на гидросферу в целом и на подземные воды тектонически активных участков земной коры в частности (Рис. 1).



Рис. 1 Геодинамический подход к структуре курса региональной гидрогеологии.

Отсюда нетрадиционное построение курса, касающееся как порядка изложения, так и подбора материала: рассматриваются не абсолютно все гидрогеологические структуры (традиционный подход), а только те из них, которые контрастно иллюстрируют определенный тип современного геодинамического режима, влияющего на формирование подземных вод.

В то же время, структуры, являющиеся наиболее показательными в плане расшифровки влияния глубинных процессов на подземные воды, а именно океанические рифты, рассматриваются на примере зарубежных территорий [10].

Заключение

Описательному материалу по гидрогеологии конкретных регионов предшествует изложение гипотезы относительно роли глубинных вод (в т.ч. коровых магматогенных, мантийногенных) в формировании гидросферы в целом и их проявлений в современных гидрогеологических структурах. Несмотря на то, что отдельные теоретические положения могут быть отнесены к числу дискуссионных, оценка одних и тех же известных на сегодня фактов под разным углом зрения (например, формирование инверсионных гидрогеологических разрезов) может принести определенную пользу молодому поколению гидрогеологов. Для того, чтобы отдать предпочтение одной из существующих точек зрения, начинающий специалист будет вынужден проанализировать представления различных исследователей, принять одни из них и подвергнуть критике другие, а, возможно, выработать и свою собственную позицию в оценке какого-либо конкретного природного явления.

Список литературы

1. Кирюхин В.А. Региональная гидрогеология / СПб: Наука, 2005. 344 с.
2. Гидрогеология СССР. Сводный том в пяти выпусках. Выпуск 1. Основные закономерности распространения подземных вод на территории СССР / М.: Недра, 1976. 656 с.
3. Овчинников А.М. Общая Гидрогеология / М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1955. 383 с.
4. Зайцев И.К. Основные типы гидрогеологических структур СССР / Ленинград: Труды ВСЕГЕИ. Том 229, 1974. 92 с.
5. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Шварцев С.Л. и др. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология / Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1980. 231 с.
6. Кирюхин В.А., Толстихин Н.И. Региональная гидрогеология / М.: Недра, 1987. 382 с.
7. Всеволожский В.А. Основы гидрогеологии / М.: Из-во МГУ, 2007. 448 с.
8. Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф. Гидрогеология вулканогенов / СПб.: Наука, 2010. 395 с.
9. Мартынова М.А., Собакин О.Н., Хаустов В.В. О новом подходе к структуре и содержанию курса «Региональная гидрогеология» // Международный симпозиум «Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы» / СПб: Из-во СПбГУ, 2007. С.103-104.
10. Судариков С.М. О районировании подвижных гидрогеологических областей Океана (на примере Срединно-Атлантического хребта) / Гидрогеология и Карстоведение. Пермь-Оренбург: Вып. 19, 2013. С. 37-46.