

Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 4

ГЕОЛОГИЯ

№ 2 • 2017 • МАРТ–АПРЕЛЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

СОДЕРЖАНИЕ

Старостин В.И., Перчук А.Л., Бобров А.В. XXXV сессия Международного геологического конгресса (Кейптаун, 2016).	3
Трофимов В.Т., Николаев А.В., Жигалин А.Д., Барабошкина Т.А., Харьковская М.А., Архипова Е.В. Расширение добычи нефти и газа и возрастание экологического риска	7
Макарова Н.В., Суханова Т.В. Актуальные проблемы изучения новейших платформенных структур (на примере Восточно-Европейской платформы и прилегающей части Скифской плиты).	17
Зеркаль О.В., Габдуллин Р.Р., Самарин Е.Н. Проблемы четвертичной геологии центральной части Крымского полуострова на современном этапе	27
Промыслова М.Ю., Демина Л.И., Гущин А.И., Короновский Н.В. Типы брекчий офиолитовой ассоциации Юго-Западного Крыма и их значение для палеогеодинамики региона	35
Ковалев С.Г., Сначев В.И., Романовская М.А. Геохимическая специализация терригенных отложений Башкирского мегантиклинория	41
Штенгелов Р.С., Филимонова Е.А., Шубин И.С. Обработка откачки из напорного водоносного горизонта при переменном дебите и атмосферном давлении	50
Кулешова М.Л., Данченко Н.Н., Косоруков В.Л., Сергеев В.И., Шимко Т.Г. Исследование сорбции–десорбции стронция и цезия на бентонитах разного состава	60

CONTENTS

Starostin V.I., Perchuk A.L., Bobrov A.V. 35th Session of the International Geological Congress (Cape Town, 2016)	3
Trofimov V.T., Hikolaev A.V., Zhigalin A.D., Baraboshkina T.A., Kharkina M.A., Archipova E.V. Expansion of oil and gas production and increase environmental risk	7
Makarova N.V., Sukhanova T.V. The actual problems of the study of the recent platform structures (on the example of the East European platform and the adjacent part of the Scythian plate)	17
Zerkal O.V., Gabdullin R.R., Samarin E.N. Problems of the quaternary geology of the Crimean peninsula central part at the present time	27
Promyslova M.Yu., Demina L.I., Gustchin A.I., Koronovskii N.V. The breccia types of the Southwestern Crimea ophiolite association, and their significance for the paleogeodynamics of the region	35
Kovalev S.G., Snachev V.I., Romanovskaya M.A. Geochemical specialization terrigenous deposits Bashkirian meganticlinorium	41
Shtengelov R.S., Filimonova E.A., Shubin I.S. Analysis of multi-well pumping test under atmosphere pressure and anisochronous schedule of pumping rate	50
Kuleshova M.L., Danchenko N.N., Kosorukov V.L., Sergeev V.I., Shimko T.G. Study on strontium and caesium sorption-desorption on bentonites of the different composition	60

УДК 551.1

В.И. Старостин¹, А.Л. Перчук², А.В. Бобров³**XXXV СЕССИЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КОНГРЕССА
(КЕЙПТАУН, 2016)**

Обсуждаются итоги XXXV Сессии Международного геологического конгресса, прошедшего в 2016 г. в Кейптауне (ЮАР). Рассмотрены основные научные проблемы, которые обсуждались на наиболее популярных секциях. К их числу относятся ранние стадии развития Земли, исследование минеральных ресурсов в различных странах, вопросы глубинного строения Земли, а также современные направления минералогии.

Ключевые слова: Международный геологический Конгресс, ранние стадии развития Земли и ее глубинное строение, минеральные ресурсы, минералогия.

The results of the 35th Session of the International Geological Congress held in 2016 in Cape Town (South Africa) are discussed in this paper. The major scientific problems discussed at the most popular sections are considered. Among them are the early stages in the evolution of the Earth, studies of mineral resources worldwide, the problems of the deep Earth structure, as well as modern fields of mineralogy.

Key words: International Geological Congress, early stages in the evolution of the Earth and its deep structure, mineral resources, mineralogy.

Сессии МГК происходят каждые 4 года и собирают весьма представительную аудиторию в 4–5 тыс. участников. Не была исключением и XXXV сессия, состоявшаяся в Кейптауне (ЮАР). Тенденция к участию молодых исследователей, четко проявившаяся на предыдущей XXXIV сессии в Брисбене (Австралия), в ЮАР выразилась в гигантских молодежных делегациях (до 600 человек) из Китая, Индии и Бразилии. Россия была представлена скромной по масштабам делегацией. Пленарные доклады делали в основном ученые из Европы, а также из США, Канады, Австралии и ЮАР.

К каждой сессии МГК издается специальный выпуск журнала «Episodes», который формируется оргкомитетом. На XXXV сессии особое внимание было уделено минеральным ресурсам. Впервые в работах всех сессий и симпозиумов существенная роль уделялась геологическому аспекту, в частности геологическому и металлогеническому картированию. Отметим обилие как электронных геоинформационных (на флешках, дисках), так и печатных геолого-геофизических материалов [The Great Mineral Fields, 2016]. Все участники имели возможность получить многие из них бесплатно.

Ранние стадии развития Земли. В последние годы все больший интерес у специалистов, работающих в области наук о Земле, вызывают геологические процессы на ранних стадиях развития Земли. Именно поэтому в переполненную

аудиторию секции «Гадей и архей Земли» смогли попасть не все желающие. На этой сессии были рассмотрены многочисленные нерешенные вопросы петрогенеза и тектоно-метаморфической эволюции ранней континентальной коры, динамики ее формирования, переработки и уничтожения. Кроме того, обсуждались происхождение и эволюция континентальной коры и субконтинентальной литосферы от гадея до конца архея на основе полевых геологических соотношений, геохронологии и изотопии, геохимических и петрологических данных, а также геодинамического моделирования. Большое внимание было уделено вкладу в петрогенез архейских зеленокаменных поясов и связанных с ними пород тоналит-трондьемит-гранодиоритового состава (ТТГ-гранитоидов).

Одной из наиболее продолжительных и популярных секций, которая проходила при полной или переполненной аудитории, на конгрессе была секция «Метаморфические процессы», состоящая из четырех сессий: «Проблемы ультравысокотемпературного (УНТ) гранулитового метаморфизма и плавления коры», «Микроуровень — ключ к познанию: микроскопические и микрохимические исследования метаморфических процессов с целью реконструкции композиционной и геодинамической эволюции Земли», «Метаморфические процессы на ранней стадии эволюции Земли» и «Высокобарный и ультравысокобарный метаморфизм и тектоническая эволюция орогенных поясов».

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии полезных ископаемых, зав. кафедрой, профессор, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: star@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, зав. кафедрой, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: alp@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, профессор, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: archi@geol.msu.ru

На сессии «Проблемы ультравысокотемпературного (УНТ) гранулитового метаморфизма и плавления коры» основное внимание было уделено вопросам, связанным с плавлением и потерей расплава, восстановлением P – T -трендов ультравысокобарных гранулитов, привязкой геохронологических оценок к P – T -трендам и установление источника тепла для УНТ (температура более 900 °С) метаморфизма. В докладах показано, как информация об эволюции термальной структуры земной коры во время орогенеза кодируется в микроструктурах, минеральных парагенезисах и составах минералов из магматических и метаморфических пород. Реконструкция метаморфической P – T -эволюции пород, объединенная с геохронологическими данными, создает необходимые условия для параметризации горообразования. Рассмотренные геодинамические модели образования горных пород пока не дают объяснения возникновению экстремально высоких температур, которые ранее не устанавливались в гранулитовых комплексах в связи с отсутствием надежных сенсоров метаморфизма.

На сессии «Микроуровень — ключ к познанию: микроскопические и микрохимические исследования метаморфических процессов с целью реконструкции композиционной и геодинамической эволюции Земли» обсуждались самые последние открытия в области микро- и наноразмерных процессов, которые контролируют минеральные реакции и перенос компонентов в метаморфических процессах. Наибольший интерес вызвали исследования минеральных включений в минералах, зональность минералов по главным элементам и микроэлементам в метаморфических минералах. Кроме того, были представлены исследования диффузии в минералах и ее применение в целях геоспидометрии.

На сессии «Метаморфические процессы на ранней стадии эволюции Земли» был рассмотрен широкий круг вопросов — от гидротермальных низкотемпературных процессов в породах верхней коры до высокотемпературных гранулитовых событий, записанных в нижней коре и верхней мантии. Результаты исследований архейских и палеопротерозойских пород проливают свет на решение важнейшей геологической проблемы — времени зарождения тектоники плит на Земле.

На сессии «Высокобарный (НР) и ультравысокобарный (УНР) метаморфизм и тектоническая эволюция орогенных поясов» представлены последние достижения в области петрологии, геохимии и геохронологии НР–УНР-комплексов в разных регионах мира. На основе этих данных восстановлена тектоническая эволюция орогенных поясов, а также флюидно-магматическое взаимодействие в породах погружающихся плит и мантийного клина.

Минеральные ресурсы. Минеральные ресурсы были рассмотрены не только в формальном фокусе на сессиях МГК, но и в аналитических обзорах. Отчетливо прозвучала тревога об обеспеченности в ближайшем будущем такими массовыми видами сырья, как железо, марганец, хром, уран и ряд других элементов. Мировые резервы высокорентабельных крупных горнорудных объектов за вторую половину XX в. существенно сократились — по железу в 2 раза, по цинку в 4, по свинцу в 3, по никелю в 2 раза и т.д., но потребление металлов осталось на прежнем уровне и даже возросло. Африканский континент — одно из последних мест нетронутых полезных ископаемых, где еще есть перспективы для разведки с последующей добычей в благоприятных климатических условиях.

Большая часть золота и все месторождения алмазов (в кимберлитах), платины, хрома и ванадия связаны с ядрами архейских кратонов, многие месторождения цветных металлов расположены в более молодых протерозойских метаморфических подвижных поясах. Залежи каменного угля, скопления нефти и газа, а также россыпные месторождения находятся в больших фанерозойских и голоценовых осадочных бассейнах. Все эти геологические обстановки в масштабах Земли обсуждались на многочисленных сессиях. Рассмотрим наиболее интересные моменты по проблемам минеральных ресурсов.

Железные руды. ЮАР — 7-й по величине производитель железной руды в мире. Перспективы добычи железной руды по оценкам суммарных оставшихся запасов извлекаемого железа для пяти крупнейших провинций Африки составляют приблизительно 1,51 млрд т. На основе прогнозов компаний и текущих темпов производства время работы рудников составит от 15 до 20 лет, за исключением Табазимби и Бишоек, которые будут истощены раньше. Эти месторождения в настоящее время добывают практически весь ежегодный запас ЮАР, который составляет около 78 млн т высокосортной гематитовой руды. Анализ материалов по железорудным провинциям мира показал, что производство железной руды сократится в течение следующих 15 лет, если прогнозно-металлогенические работы не будут существенно расширены.

Вызвал интерес доклад, посвященный не очень значимой в экономическом отношении, но уникальной по времени возникновения формации железистых кварцитов Отжосондо в Намибии. Его образование связано с неопротерозойским событием, в котором Земля напоминала снежный шар (Snowball Event, это был самый холодный период за всю историю Земли, когда она фактически вся была покрыта льдом).

Месторождения марганца. Общие запасы марганца в мире составляют 8,5 млрд т, подтвержденные запасы — 3,5 млрд т. Основные ме-

сторождения сосредоточены в 10 странах — ЮАР и Украине (суммарно 50% мировых запасов), Казахстане, Габоне, Грузии, Австралии, Бразилии, Китае, Болгарии, Индии. Месторождения Африки составляют 80% мировых запасов. Из них 77% заключено в Марганцевом Поле Калахари, но обратим внимание на то, что оперативных разведанных запасов только 30,5%. Из этого следует кажущаяся современная дешевизна марганца. Производство руд составляет 41% мировой добычи, одно только Марганцевое Поле Калахари производит 26,5%, а вот, например, Китай занимает 2-е место (17%). По данным USGS на 2015 г. по запасам (млн т) на 1-м месте ЮАР (200), далее следуют Украина (140), Австралия (91), Бразилия (50), Китай (44), Габон (22), Казахстан (5), а общие мировые оперативные запасы составили всего 620 млн т.

В КНР в провинции Хунань находится месторождение Хунань, где рудоносная формация достигает мощности 216 м, приблизительный возраст 0,72 млрд лет. Руды карбонатные, бедные (15–16% Mn), в основном сложены родохрозитом. Подобное месторождение Санто расположено в провинции Гуйчжоу (10–25% Mn). Месторождение Сычуань (в верхнесинийских отложениях) связано с формациями сланцев, содержание Mn в нем составляет 13–25%, считается, что существует пространственно-временная связь с фосфоритами.

Никопольский бассейн включает в себя Никопольское и Большетокмакское месторождения и ряд рудоносных площадей, протягивающихся полосой вдоль берегов Днепра и Ингульца на 250 км при ширине 25 км (Украина). Руды залегают в нижнеолигоценых песчано-глинистых осадках. Количество руд в глинистых осадках достигает 15–20%. В настоящее время крупные участки руд сохранились только во впадинах кристаллического фундамента; выделяются 3 зоны: оксидная (пиролюзит, псиломелан, манганит), смешанная (оксидно-карбонатная) и карбонатная (манганокальцит, родохрозит).

Глубины Земли. На секции «Глубинная Земля» большой интерес вызвала сессия «Композиционная и реологическая слоистость в кратонной литосфере». Сессия многопрофильная, на ней были представлены результаты геофизических и петрологических исследований, а также геодинамического моделирования, раскрывающие процессы формирования литосферы и ее последующего изменения вследствие взаимодействия мантийных течений и тектоники плит. Большое внимание было уделено влиянию мантийного метасоматоза на модификацию литосферы. В рамках этой же секции прошли сессии по современным достижениям в области глубокого бурения на континентах и океанах, а также по результатам геологического и геофизического изучения границы между литосферой и астеносферой.

На сессии «Алмазы и глубинный коровый цикл в мантии Земли» заслушаны доклады о теоретическом и экспериментальном моделировании процессов корово-мантийного взаимодействия и связи с ними образования алмазоносных пород в мантии Земли. Характерно, что наряду с уже обычными для геологических конгрессов докладами об алмазоносных метаморфических комплексах на этой сессии были заслушаны сообщения о природе алмазоносности офиолитовых комплексов, в частности, хромититов, что еще несколько лет назад с недоверием воспринималось мировой геологической общественностью.

Проблеме алмазообразования была в значительной мере посвящена секция «Динамическая Земля», на которой одним из самых значимых событий стала сессия «Кимберлиты, эволюция кратонной мантии и алмазообразования во времени». Эта сессия ознаменовала 50-летие коллекции мантийных ксенолитов Кейптаунского университета, значительная часть которых была выставлена на специальной экспозиции Конгресса. На сессии было заслушано 25 докладов, характеризующих значительный прогресс в геологическом, геохимическом, геофизическом и экспериментальном изучении субкратонной мантии Земли. Кроме того, в рамках трехдневной секции «Динамическая Земля» обсуждались проблемы геологии и тектоники Гималайского орогенного пояса, механизмов и возрастных характеристик амальгамации Западной Гондваны, происхождения офиолитов океанической литосферы, взаимоотношения деформаций и метаморфизма в процессе орогенеза, геодинамики и металлогенических процессов Тянь-Шаня.

Кимберлитовые месторождения алмазов. Кимберлитовые месторождения были одним из фаворитов на конгрессе. В экономическом отношении они отнесены к четырем категориям: 1-я — мирового класса, 2-я — крупные, 3-я — средние и 4-я — мелкие. Из месторождений 4-й категории разрабатываются немногие.

В мире насчитывается около 8000 кимберлитовых и лампроитовых трубок, 3000 из которых находится в Африке. Из них 1000 содержит алмазы и только 67 экономически выгодны для разработки. Только 7 известных кимберлитовых залежей относятся к 1-й категории, на них приходится почти 65% от общего мирового производства.

В Африке находятся 5 из 7 залежей (Джваненг, Орапа, Венеция, Катоке и Куллинан). Четыре из них расположены в Каапваальском кратоне в южной части Африки и одна в кратоне Касаи в Центральной Африке, они охватывают возрастной диапазон от мезопротерозоя до мела. Месторождения 2–4-й категорий имеют небольшие размеры и низкие запасы, но в целом составляют около 80% всех запасов, которые входят в 20% мирового производства. К месторождениям 2-й категории относятся те, которые производят более

0,4 млн каратов алмазов в год, но не отвечают критериям доходов от разработки месторождений 1-й категории. Десять таких месторождений выявлены в Африке, и все они расположены в кратонах Капвааль и Касаи, диапазон их возраста варьирует от кембрия до мела.

Рудное поле Кимберли состоит из 5 исторических трубок: Кимберли, Де Бирс, Дутоитспан, Булфонтейн и Весселтон. В настоящее время функционируют только Dutoitspan, Bultfontein и Wesselton, на них ведется добыча. Рудники Дутоитспан и Булфонтейн были открыты в 1870 г., а затем открылись шахты Де Бирс и Кимберли в 1871 г., а рудник Весселтон в сентябре 1890 г. Здесь развит кластер из 30 трубок, имеющий радиус 10 км. Трубки Кимберли и Де Бирс стали разрабатывать в 1884 г. На руднике Кимберли добыча велась до глубины 820 м, в 1914 г. добыча остановилась, в то время как рудник Де Бирс закрылся в 1991 г. Из трубок Кимберли добыто 182 млн каратов. Только один рудник Кимберли произвел более 14 млн каратов и 22,6 млн т руды. В трубках находили крупные, уникальные алмазы желтого цвета, такие, как алмаз в 253 карата Оппенгеймер (трубка Дутоитспан, 1964 г.). Три действующих ныне рудника производят алмазы ценой более 300 долл. США за карат. Годовой объем добычи месторождений 1–4-й категорий составляет 32,46; 9,63; 2,24 и 0,59 млн каратов соответственно. Десять месторождений 2-й категории имеют запасы на порядок меньше — 266 млн каратов и 16 месторождений 3-й категории содержат примерно 89 млн каратов. Кроме того, в группе месторождений 1-й категории дополнительно содержится 1,2393 млн каратов алмазов в хвостах.

Рудник Орапа (Ботсвана). Горнодобывающая деятельность на этом руднике началась в 1971 г. В последнее время в среднем добывается 14,5 млн т руды (10 млн каратов) в год. В настоящее время продолжается глубокое бурение и оценка южной трубки, в глубинной части которой находится темный вулканокластический кимберлит, который никогда раньше не отбирался. Ныне он оценивается выше, чем слоистая толща в кратерной части.

Это новое открытие значительного количества алмазов на глубине обеспечивает дополнительную ценность с точки зрения будущих возможностей

глубинных горизонтов кимберлитовых полей. По современным прогнозам рудник будет действовать до 2040 г.

Во многих регионах Африки, таких, как Маранге, Кванго, Аредор и т.д., ежегодное производство алмазов из аллювиальных россыпей составляет от 15 до 20 млн каратов. Это говорит о том, что 700 млн каратов из 3,2 млрд каратов уже добыто, что составляет 1/4 от всех алмазов континента. Однако ресурсы основных аллювиальных месторождений в Африке будут истощены довольно скоро. Исходя из мировой практики основные ресурсы аллювиальных алмазов России еще ждут своих исследователей.

Минералогия. Как и на предыдущих геологических конгрессах, довольно разнообразной оказалась секция «Минералогия», на которой были представлены доклады по традиционным направлениям — минералогии глин и геммологии.

Большой интерес вызвала сессия «Флюидные и расплавные включения в минералах», которая в этот раз имела явную металлогеническую направленность. В докладах на этой сессии обсуждалось генетическое значение флюидных включений в минералах молибден-порфировых, медно-золотых, вольфрамовых и висмутовых месторождений, а также связь состава флюидных включений с изотопным составом различных минералов. Характерно, что рудная тематика доминировала и на общеминералогической сессии, где обсуждались новые минералы платиновой группы и их синтетические аналоги, результаты компьютерного моделирования свойств никельсодержащих сульфидов, а также результаты теоретического моделирования форм вхождения золота в состав сульфидов рудных месторождений.

Редкоземельные элементы. Проблема ресурсов редкоземельных элементов за прошедшие 4 года потеряла свою актуальность. Монопольное положение Китая в этой области сохраняется. Уже освоенные месторождения карбонатитов и отсутствие значительного в количественном отношении спроса промышленности на них отодвинули интерес к этому сырью на ближайшее будущее. Именно сейчас создаются новейшие технологии с использованием редких земель, но пока еще не наступило время их массового внедрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

The Great Mineral Fields of Africa // Episodes. Special Issue for 35 IGC, Cape Town, South Africa. 2016. V. 39. No. 2.

Поступила в редакцию
21.03.2017

УДК 553.9: 622.32

В.Т. Трофимов¹, А.В. Николаев², А.Д. Жигалин³, Т.А. Барабошкина⁴,
М.А. Харькина⁵, Е.В. Архипова⁶

РАСШИРЕНИЕ ДОБЫЧИ НЕФТИ И ГАЗА И ВОЗРАСТАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

Добыча нефти и газа на суше сопровождалась и сопровождается авариями разной степени тяжести и негативными последствиями. Выход добычи на акватории окраинных морей и Мирового океана существенно усугубил ситуацию, выведя значительную часть чрезвычайных ситуаций, связанных с добычей углеводородов, на уровень региональных и глобальных. Использование новых технологий при добыче сланцевых углеводородов добавило новые проблемы — вероятность тотального загрязнения больших объемов геологического пространства высокотоксичными химическими веществами. Обнаружение нового перспективного ископаемого источника энергии — газогидратов — позволяет пока только наметить возможные попутные опасности, но показывает, что экологический риск может многомерно возрасти.

Для противостояния угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций в связи с увеличением добычи углеводородов целесообразно создание на национальном уровне специальных структур контроля и быстрого реагирования. Такие структуры могут быть, в случае необходимости, открыты для международного сотрудничества и введены в юрисдикцию Организации Объединенных Наций.

Ключевые слова: добыча углеводородов, экологический риск, сланцевые углеводороды, газогидраты.

Oil and gas industry shows the danger of this kind of industry, including from the environmental point of view. Entering the waters of marginal seas and ocean significantly aggravated the situation, moving a significant part of the emergency situations related to hydrocarbon production, the level of regional and global. The use of new technologies in the production of shale hydrocarbons added new problems — the total probability of contamination of large amounts of geological space highly toxic chemicals. Tracking down of a new perspective mineral energy source — gas hydrates — allows to plan only while possible passing dangers, but shows, that the ecological risk can many times more. For opposition to threat of occurrence of emergencies in connection with growth of extraction of hydrocarbons expediently creation at a national level of special structures of the control and fast reaction. Such structures can be if necessary opened for the international cooperation, and are entered into jurisdiction of the United Nations Organization.

Key words: extraction of hydrocarbons, ecological risk, slate hydrocarbons, gas hydrates.

Введение. В обозримом будущем, несмотря на некоторый прогресс в поисках альтернативных вариантов энергообеспечения, основными источниками энергии для удовлетворения разнообразных нужд народонаселения Земли по-прежнему будут уголь, нефть и природный газ. С середины прошлого столетия уголь, доля которого в энергетике составляла в 1935 г. 55% (в 1910 г. на его долю приходилось 65%), постепенно уступал позиции вследствие увеличения доли на топливном рынке сначала нефти, а потом и природному газу.

В 2000 г. на долю угля в мировой энергетике приходилось всего 24%, тогда как доля нефти и природного газа составили 37 и 24% соответственно (суммарно 61%). Следует при этом иметь в виду, что углеводороды широко используются и как химическое сырье. Начиная с 80-х гг. прошлого столетия, в связи с распространением мнения о конечности запасов ископаемого топлива начались интенсивные поиски альтернативных источников энергии. К этому времени уже использовалась энергия падающей воды (гидравлические электро-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической экологии, заведующий кафедрой, профессор; *e-mail:* trofimov@geol.msu.ru

² Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта, гл. науч. с., член-корр. РАН, профессор; *e-mail:* nikavs@ifz.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической экологии, вед. науч. с.; Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, вед. науч. с.; *e-mail:* zhigalin.alek@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической экологии, ст. науч. с.; *e-mail:* baraboshkina@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической экологии, ст. науч. с.; *e-mail:* kharkina@mail.ru

⁶ Государственный университет «Дубна», кафедра экологии и наук о Земле, доцент; *e-mail:* olenageo@mail.ru

станции), атомная энергия, предпринимались попытки использовать некоторые иные альтернативные источники. Однако основу энергетики по-прежнему составляла триада — нефть, природный газ и уголь. В конце прошлого столетия существовала уже достаточно развитая атомная энергетика, доля которой в мировом балансе к 2000 г. составляла 12%.

Если говорить о перспективе, относительно чего существуют разные точки зрения, то к 2030 г. основным источником энергии станет природный газ (31%), на несколько процентов опережающий нефть (25%) и уголь (21%). Нефть и уголь будут сохранять свои позиции в добывающей промышленности еще и потому, что нефть останется сырьем для химического производства, а уголь должен будет удовлетворять потребности растущей металлургии.

Мировое производство атомной энергии в перспективе к 2030 г. может достичь 17%, тогда как доля гидроэнергетики сохранится на весьма низком уровне — всего 3% от общего количества вырабатываемой энергии. Складывающаяся сейчас ситуация свидетельствует о том, что рассчитывать на какие-либо альтернативные источники энергии, которые могли бы заменить ископаемое топливо, несмотря на множющиеся предлагаемые варианты, в обозримом будущем не приходится. Таким образом, приращение мирового энергетического потенциала, в том числе и в нашей стране, в ближайшие 50 лет будет осуществляться в первую очередь за счет увеличения добычи углеводородного сырья.

Углеводородная сырьевая база. Традиционно разрабатываемое углеводородное сырье представлено в основном нефтью, природным газом, а также сланцевыми природными углеводородами. Растущие потребности в нефти и природном газе, стимулирующие расширение существующих и поиски новых месторождений, доставляют осваивать не только новые территории, но и акватории материковых шельфовых зон. В последнее время месторождениям углеводородов в шельфовых зонах, как Мирового океана, так и внутренних морей, уделяется все больше внимания. Заметим, что многие весьма перспективные месторождения газа (в первую очередь) и нефти сосредоточены в приполярной части Северного полушария Земли.

В табл. 1 приведены данные о мировой газо- и нефтедобыче для первой десятки добывающих стран в 2011–2013 гг. (добыча газа) и в 2014–2015 гг. (добыча нефти).

В качестве альтернативы традиционному ископаемому топливу — нефти и газу — в последние десятилетия интенсифицируется добыча сланцевого газа с использованием технологии пластового гидроразрыва. В связи с этим сланцевый газ становится серьезным конкурентом в борьбе на мировом рынке углеводородного топлива.

Таблица 1

**Газо- и нефтедобывающие страны,
входящие в первую мировую десятку**

Место в мире	Страна	Уровень добычи газа, млн м ³ /год	Дата информации, год	Место в мире	Страна	Уровень добычи нефти, барр./сут	Дата информации, год
1	США	681 400	2012	1	Россия	10 107 000	2015
2	Россия	669 700	2013	2	Саудовская Аравия	9 735 200	2014
3	Иран	162 600	2012	3	США	9 373 000	2015
4	Канада	143 100	2012	4	Китай	4 189 000	2015
5	Катар	133 200	2011	5	Канада	3 603 000	2014
6	Норвегия	114 700	2012	6	Ирак	3 368 000	2015
7	Китай	107 200	2012	7	Иран	3 113 000	2014
8	Саудовская Аравия	103 200	2012	8	ОАЭ	2 820 000	2014
9	Алжир	82 760	2011	9	Кувейт	2 619 000	2014
10	Нидерланды	80 780	2012	10	Мексика	2 562 000	2014
Всего		2 278 640		Всего		51 489 200	

Технология добычи сланцевого газа известна уже на протяжении 100 лет. Ее актуальность была признана в результате устойчивого увеличения спроса на газ и недостатка в этом ресурсе и, соответственно, увеличения стоимости природного газа, добываемого традиционным путем. Сланцевый газ — разновидность природного газа. Он образуется в недрах земли в результате анаэробных химических процессов (разложение органических веществ без доступа кислорода). Известно, что газ может быть сконцентрирован в виде скоплений метана в угольных пластах, газовых образований в пластовых условиях, попутного газа (смесь пропана и бутана) на месторождениях нефти, в толще жестких песков, в сланцевых пластах, а также в виде кристаллических газогидратов в толще морского дна.

Газовые отложения в сланце сконцентрированы в небольших газовых коллекторах, которые рассредоточены по всему сланцевому пласту. Сланцевые месторождения имеют огромную площадь, однако объем газа зависит от толщины и площади сланцевого пласта. Относительно оценки общемировых запасов сланцевого газа в настоящий момент имеются различные точки зрения. На карте, составленной в 2011 г. по данным стратосферного анализа, показаны обширные территории, перспективные для разработки этого ископаемого топливного ресурса (рис. 1). На карте видно, что возможность добывать сланцевый газ есть практически на всех континентах и не только. В пределах шельфовой зоны также встречаются участки, перспективные для добычи газа из так

называемых зрелых сланцев разного геологического возраста.

Технология гидроразрыва пласта требует крупных запасов воды вблизи месторождений, для одного гидроразрыва используется смесь воды (7500 т), песка и химикатов. В результате вблизи месторождений скапливается значительный объем отработанной загрязненной воды, которая обычно не утилизируется добытчиками с соблюдением экологических норм. К тому же, как показывает опыт, сланцевые скважины имеют гораздо меньший срок эксплуатации, чем скважины для добычи обычного природного газа [Зеленцова, 2011].

Многие страны в разных частях света уже добывают сланцевый газ, и некоторые из них его экспортируют (табл. 2).



Рис. 1. Перспективные площади добычи сланцевого газа (черное) согласно оценке методом стратосферного анализа [World Shell..., 2015]

Таблица 2

Запасы извлекаемого сланцевого газа и его экспорт в различных странах, по [World Shale..., 2015]

Страна	Объем экспорта природного газа, в % от потребления	Доказанные запасы природного газа, млрд м ³	Технически извлекаемые запасы сланцевого газа, млрд м ³
Нидерланды	62	1386	481
Норвегия	2156	2037	2348
Дания	91	59,4	651
Канада	87	1755	10 980
Австралия	52	3313	11 206
Ливия	165	1548	8207
Алжир	183	4500	6537
Колумбия	21	56,6	537
Боливия	346	750	1358

В нашей стране запасы сланцевого газа в основном приурочены к каменноугольным месторождениям (рис. 2). В качестве наиболее перспективных по объему запасов сланцевого газа (связанного с угольными пластами) рассматриваются Талнырский, Тунгусский и Ленский каменноугольные бассейны.

Сланцевый газ пока только выходит на международный углеводородный рынок и в ближайшее время не сможет стать серьезной альтернативой традиционно добываемому природному газу. Заметим, что «соревнование» этих двух видов топливного ресурса в наши дни находится под сильным влиянием политической конъюнктуры, заметно большей, чем традиционная, экономическая, что не позволяет надежно оценивать рыночную перспективу сланцевого газа.

Еще не начали разрабатываться, но уже обратили на себя внимание большие по объему скопления так называемых газогидратов. Как феномен газогидраты привлекают интерес ученых тем, что, предположительно, являются потенциально практически неиссякаемым источником газа. Фактически речь идет о появлении новой технологии промышленной добычи газа.

Газогидраты (или газовые гидраты) представляют собой молекулы газа, чаще всего метана, «встроенные» в ледяную или водяную кристаллическую решетку. Газовый гидрат образуется при высоком давлении и низкой температуре, поэтому в природе встречается либо в глубоководных морских осадках, либо в сухопутной зоне многолетней мерзлоты на глубине несколько сотен метров ниже уровня моря. В процессе формирования этих соединений при низкой температуре в условиях повышенного давления молекулы метана преобразуются в кристаллы гидратов с образованием твердого вещества, по консистенции похожего на рыхлый лед.

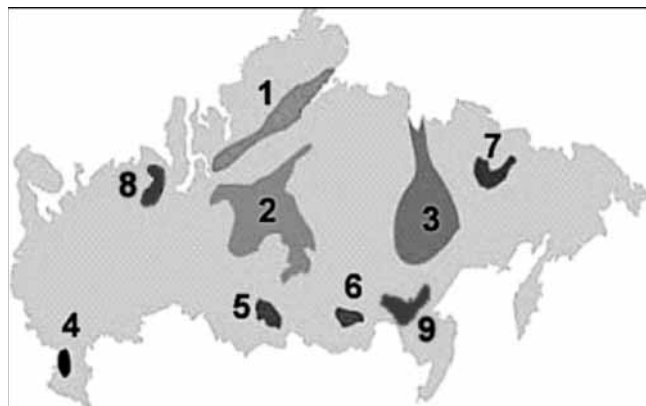


Рис. 2. Основные перспективные площади добычи сланцевого газа в России, по [Зеленцова, 2011]: угольные бассейны 1 — Талнырский, 2 — Тунгусский, 3 — Ленский, 4 — Восточный Донбасс, 5 — Кузнецкий, 6 — Иркутский, 7 — Зырянский, 8 — Печорский, 9 — Южно-Якутский

Согласно современным геологическим данным, в донных осадках морей и океанов в виде твердых газогидратных отложений находятся огромные запасы углеводородного газа. Так, потенциальные запасы метана в газогидратах оцениваются в $2 \cdot 10^{16}$ м³. Однако газовые гидраты не единственный, все еще не разрабатываемый в промышленных объемах источник природного газа на Земле, который в перспективе может составить реальную конкуренцию традиционным углеводородам из-за огромных ресурсов, широкого распространения на планете, неглубокого залегания и весьма концентрированного состояния газового компонента (1 м³ природного метан-гидрата содержит около 164 м³ метана в газовой фазе и 0,87 м³ воды).

По прогнозным оценкам российских ученых, общее количество метана в залежах газогидратов под дном Мирового океана и морей оценивается в $2 \cdot 10^{10}$ м³, что на несколько порядков превышает запасы углеводородов в традиционных месторождениях. К настоящему времени установлено, что около 98% залежей газогидратов сосредоточено на шельфе и континентальном склоне Мирового океана у побережий Северной, Центральной и Южной Америки, Северной Азии, Норвегии, Японии и Африки, а также в Каспийском и Черном морях. Установленная глубина нахождения скоплений газогидратов варьирует от 200–480 м на шельфе до 3100–3500 м на абиссали. Наибольшая глубина, на которой обнаружены газогидраты, составляет 6000 м (Перуанская впадина в Тихом океане) [Воробьев и др., 2011].

Расширение добычи углеводородного сырья и экологический риск. Разработка месторождений углеводородного сырья в настоящее время ведется по трем направлениям. Это традиционная промысловая добыча нефти и газа на материковой части, добыча углеводородов (преимущественно нефти) в Мировом океане, окраинных и внутренних морях и добыча сланцевого газа на континентах. Каждый вид добычи полезного ископаемого характеризуется своей спецификой, но все они несут с собой потенциальную экологическую угрозу окружающей среде, будь то литосфера, гидросфера, атмосфера или биосфера. И с этой точки зрения добычу нефти и газа можно рассматривать как существенный фактор трансформации экологических функций абиотических сфер Земли и непосредственного воздействия на живые организмы, населяющие нашу планету [Трофимов и др., 2006].

Разработка и эксплуатация месторождений углеводородного сырья, а также транспортировка и переработка получаемого продукта по ряду критериев относятся к категории экологически опасного производства [Гражданская..., 2015]. Это значит, что в случае возникновения чрезвычайных ситуаций на промыслах и предприятиях нефте-газовой промышленности возможны критические изме-

нения экологической обстановки. На карте мира появляется все больше перспективных площадей для нефте- и газодобычи и уже разрабатываемых месторождений, строящихся и эксплуатируемых трубопроводных транспортных сетей и других предприятий газонефтяной индустрии. Это обстоятельство не может не вызывать тревогу, поскольку за «углеводородной экспансией» неизбежно следует повышение риска возникновения аварийных ситуаций на всем пути от добычи полезного ископаемого до места его длительного хранения или использования. В табл. 3 приведены данные о добыче нефти одиннадцатью ведущими мировыми компаниями, которые априори, хотя предположительно и в разной мере, могут считаться ответственными за все чрезвычайные ситуации и катастрофы, произошедшие и будущие, связанные с нефтедобычей.

Таблица 3

Основные мировые нефтедобывающие компании

Название фирмы	Страна	Добыча нефти, млн барр./сут
Сауди Арамко («Saudi Aramco»)	Саудовская Аравия	> 12
Газпром	Россия	9,7
Национальная нефтяная компания Ирана (National Iranian Oil Company, NIOC)	Иран	6,4
Эксон Мобил (Exxonmobil)	США	5,3
Петрочайна-интернешнл (Petrochina-interneshnl)	Китай	4,4
Роснефть	Россия	4,1
Бритиш Петролеум (British Petroleum, BP)	Великобритания	4,1
Роял Датч Шелл (Royal Dutch Shell)	Великобритания, Голландия	3,9
Петролеос Мексиканос (Petroleos Mexicanos, PEMEX)	Мексика	3,6
Шеврон (Chevron)	США	3,5
Топливная корпорация Кувейта (Kuwait Petroleum Corporation)	Кувейт	3,2

Многовековая история добычи нефти, которая как вещество, способное гореть, известна людям и используется ими уже не одну тысячу лет, изобилует сведениями об экологических катастрофах, связанных с добычей и транспортировкой этого горючего полезного ископаемого. До начала добычи на акваториях такого рода события, хотя и могли нанести значительный ущерб и иногда сопровождались человеческими жертвами, но, как правило, редко выходили на уровень чрезвычайной ситуации или экологической катастрофы регионального уровня. В этом случае при оценке экологического ущерба следует принимать во вни-

мание, что такие события могут локализоваться в пределах территории аварийного объекта или в его ближайших окрестностях, там, где экосистемы уже практически перестали существовать как природные и, в лучшем случае, трансформировались в природно-технические экосистемы с доминированием технического компонента.

При нерегулярном росте объема добычи нефти и газа могут возникать негативные геологические процессы в верхних слоях литосферы, например, обвалы, просадки, локальные землетрясения и др. Одна из причин частых землетрясений заключается в увеличении напряжения земной коры под воздействием закачиваемой в скважины воды под высоким давлением. Нефть представляет собой смесь около 1000 индивидуальных веществ, из которых более 500 составляют жидкие углеводороды. После попадания в почву или на водную поверхность из нефти в атмосферу выделяются легколетучие фракции углеводородов. Ежегодно под бурение нефтяных скважин, прокладку трубопроводов и автомобильных дорог отводится более 1000 га земель, из них значительная часть возвращается в хозяйственный оборот после рекультивации. Однако, несмотря на проведение работ по рекультивации, часть земель возвращается с ухудшенной агрохимической структурой или вовсе становится непригодной для выращивания сельскохозяйственных культур.

Одним из существенных загрязнителей атмосферного воздуха при добыче нефти служит попутный газ, который наряду с фракциями легких углеводородов содержит сероводород. Миллионы кубометров попутного газа десятки лет сжигали на факельных установках, что привело к образованию сотен тысяч тонн оксида азота, оксида углерода, диоксида серы и продуктов неполного сгорания углеводородов, попавших в итоге в атмосферу. Такая смесь газов может оказаться пожароопасной, чему есть исторические примеры. Так, известен случай скопления паров углеводородов вдоль железной дороги из-за аварии на трубопроводе с конденсированным углеводородом в Башкирии, когда при прохождении пассажирского поезда эти пары воспламенились, и возникший сильный пожар вокруг поезда привел к многочисленным человеческим жертвам. При переработке нефти возникают специфические экологические проблемы, связанные прежде всего с первичной очисткой нефти и удалением из нее серы. При этом в атмосферу поступают сотни тысяч тонн газообразных загрязняющих веществ. Содержание продуктов горения попутного газа в приземных слоях атмосферы может негативно влиять на здоровье персонала и жителей близлежащих населенных пунктов.

При содержании в воде нефти в количестве 200–300 мг/м³ происходит нарушение экологического равновесного состояния отдельных видов

рыб и других гидробионтов. Нефть также активно взаимодействует со льдом, который способен поглощать ее в количестве до 1/4 своей массы. При таянии такой лед становится источником загрязнения любого водоема. С талыми водами в водоемы поступают тысячи тонн загрязняющих веществ. Подземные воды также подвергаются загрязнению предприятиями нефтяной промышленности. Изучение процессов загрязнения подземных вод показало, что 60–65% загрязнений происходит при аварии водоводов сточных вод и бурении скважин, а 30–40% загрязнений — из-за неисправностей глубинного оборудования скважин, способствующих перетоку минерализованных вод в пресноводные горизонты. Таким образом, следует констатировать, что нефть и нефтепродукты относятся к загрязняющим веществам, вступающим в химическое взаимодействие с компонентами природной среды и являющимися действенными агентами ее трансформации в негативную сторону [Базанова, 2010]. В табл. 4 показан пример оценочной классификации аварийных ситуаций на нефтяных месторождениях.

Таблица 4

Критерии оценки экологического ущерба при авариях на материковых нефтепромыслах

Категория аварии	Критерии оценки потенциального экологического ущерба
Локальная	1. Масса нефти, попавшей в водные объекты, до 1,0 т 2. Масса нефти, попавшей на рельеф местности, до 29,0 т 3. Общая площадь загрязнения до 0,04 га, не выходит за территорию объекта
Местная	1. Масса нефти, попавшей в водные объекты, от 1,0 до 5,0 т 2. Масса нефти, попавшей на рельеф местности, от 29,0 до 145,0 т 3. Общая площадь загрязнения от 0,05 до 0,2 га, выходит за пределы отвода земель под объект
Территориальная	1. Масса нефти, попавшей в водные объекты, от 5,0 до 500,0 т 2. Масса нефти, попавшей на рельеф местности, от 145,0 до 1450,0 т 3. Общая площадь загрязнения от 0,2 до 20 га, не выходит за пределы территории административного округа
Региональная	1. Масса нефти, попавшей в водные объекты, ≥500,0 т 2. Масса нефти, попавшей на рельеф местности, ≥1450,0 т 3. Общая площадь загрязнения ≥20,0 га, выходит за пределы территории административного округа

Нефтяной промысел всегда был и остается делом рискованным (как в событийном плане, так и с точки зрения возможного материального ущерба и катастрофических последствий). Добыча нефти и газа на континентальном шельфе представляет со-

бой еще более экологически опасное предприятие. И хотя крупные аварии редки (в среднем один раз в десятилетие), так как сказываются более жесткие меры безопасности и дисциплина по сравнению с сухопутной добычей, но от этого они нисколько не менее трагичны. С начала добычи углеводородов на континентальном шельфе и материковом склоне тяжесть аварийных случаев существенно возросла и продолжает увеличиваться. Причина этого в первую очередь заключается в подвижности среды, затрагиваемой аварийной ситуацией. Так, разливы нефти по поверхности акватории наносят непоправимый экологический ущерб, который ощущается в течение многих лет и заставляет квалифицировать последствия таких разливов как экологические катастрофы территориального (регионального), а иногда и глобального уровня. Наиболее дорогостоящая, трудоемкая и экологически опасная разработка морских месторождений в северных морях.

Помимо решения сложных задач, характерных для континентального промысла, при добыче на акваториях возникает комплекс проблем, обусловленных морской спецификой, при этом угрозы экологической безопасности в районах нефте- и газодобычи многократно увеличиваются. От успешности их разрешения во многом зависят промышленная безопасность и экологическое благополучие района ведения разработки. В частности, при поисково-разведочных работах на нефть и газ наибольшую опасность для природной среды представляют нарушение покрова донных осадков и сообществ бентосных организмов при внедрении буровых снарядов в морское дно; воздействие нетоксичных буровых растворов на биоту, в том числе повышение мутности вод в окрестностях буровых платформ; попадание в воду нефтеуглеводородов при аварийных выбросах нефти, возможных при вскрытии продуктивных залежей [Проблемы..., 2014]. На рис. 3 в форме диаграммы показана доля отдельных технологи-

ческих элементов (звеньев) в цикле добычи углеводородов в возможном наносимом ущербе при возникновении чрезвычайных ситуаций. Как и ожидалось, пальма первенства принадлежит морским технологиям и трубопроводному транспорту [Мельников и др., 2014].

Добыче газа и нефти на морском шельфе неизбежно сопутствуют различного рода аварии. Причин таких катастроф множество, это штормы, ураганы, аварийные взрывы, пожары, поломки оборудования, ошибки персонала. Ниже приведены примеры наиболее серьезных аварий, приведших к гибели большого числа людей [Семь..., 2013].

При буксировке платформы «Кольская» с западного побережья Камчатки к Сахалину 16 декабря 2011 г. караван в Охотском море попал в полосу штормов. На борту находились 67 человек. На платформе сорвало обтекатель носовой опоры, оказалась повреждена обшивка корпуса, образовался крен, 18 декабря платформа затонула. Спасти из воды живыми удалось только 14 человек. И хотя этот пример не может рассматриваться как классическая экологическая катастрофа, а, скорее, как проявление преступной халатности, гибель людей ставит ее в ряд технологических катастроф.

Самой крупной мировой экологической катастрофой на сегодняшний день признана авария, произошедшая 20 апреля 2010 г. на нефтяной платформе «Deepwater Horizon» в 80 км от побережья штата Луизиана в Мексиканском заливе на месторождении компании BP. Во время взрыва и пожара на платформе погибли 11 и пострадали 17 человек. За 152 дня борьбы с последствиями аварии в Мексиканский залив вылилось около 5 млн баррелей нефти, площадь нефтяного пятна достигла 75 тыс. км².

16 марта 2001 г. у берегов Бразилии взорвалась крупнейшая в мире нефтяная платформа P-56, которая принадлежала фирме «Petrobras». Погибли 10 нефтяников. После серии разрушительных взрывов платформа затонула, нанеся непоправимый ущерб окружающей среде.

В июле 1988 г. недалеко от Англии на нефтедобывающей платформе «Occidental Petroleum's Piper Alpha» в результате взрыва, последовавшего за утечкой газа, погибли 167 человек из 226 находившихся в тот момент на платформе. Платформа полностью сгорела.

В сентябре 1982 г. недалеко от берегов Канады перевернулась и затонула американская нефтяная буровая платформа «Ocean Ranger». Причиной катастрофы стал небывалый ураган. Ударами 15-метровых волн были разбиты окна и затоплены жилые поме-

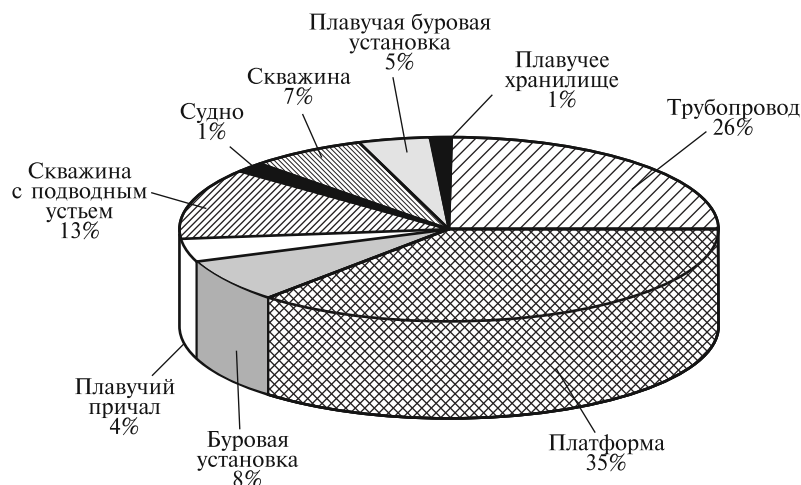


Рис. 3. Доля отдельных технологических элементов (звеньев) в цикле добычи углеводородов в наносимом ущербе при возникновении чрезвычайных ситуаций, по [Мельников и др., 2014]

щения. На платформе находились 84 человека. Спасти не удалось никому.

В марте 1980 г. в Северном море разломилась и опрокинулась норвежская буровая платформа «Alexander Keilland». Из 212 человек, находившихся на платформе, погибли 123. Как заявили эксперты, причиной катастрофы была усталость металла.

25 ноября 1979 г. во время буксировки в открытом море китайская буровая платформа «Бохай I—II» попала в 10-балльный шторм. В результате платформа перевернулась и затонула. Погибли 72 человека.

Добыча сланцевой нефти и сланцевого газа также вызывает у геоэкологов много серьезных вопросов, поскольку методы добычи не всегда отвечают современным экологическим требованиям, предъявляемым к разработке энергоресурсов.

С целью добычи углеводородов используется технология гидроразрыва, которая предполагает закачку специальных растворов под высоким давлением в пласты горных пород. В результате происходит образование множественных микро-трещин, и в итоге формируется искусственно созданный трещиноватый объем горных пород, который в дальнейшем является источником комплекса геоэкологических проблем практически для всех компонентов природной среды. Использование технологии гидроразрыва пластов чревато, по мнению экспертов, во-первых, проникновением большого объема высокотоксичных и загрязняющих веществ в эксплуатируемые водоносные горизонты и, во-вторых, разливом их на поверхности в окрестностях мест добычи. Возможен также выход газа, следов нефти и токсичных веществ на дневную поверхность с трудно предсказуемыми негативными экологическими последствиями.

Дестабилизация естественного геодинамического равновесия в напряженно-деформированных горных породах может повлечь за собой активизацию сейсмопроявлений. Именно поэтому применение технологии гидроразрыва иногда рекомендуют как средство для разрядки упругих напряжений в горных породах с целью предотвращения сильных землетрясений. Вместе с тем дестабилизация естественной устойчивости массивов горных пород сначала проявляется в ближней зоне — в окрестностях непосредственного воздействия, но затем постепенно распространяется на значительные расстояния как по вертикали, так и по латерали. При исследовании процессов навешенной сейсмичности отмечено, что сейсмическая активизация в ближней зоне прекращается с прекращением воздействия, тогда как активизация в дальней зоне продолжается, и процесс перестройки напряженно-деформированного состояния геологической среды постепенно захватывает значительную область, объем которой многократно превышает объем горных пород, пораженных техногенной трещиноватостью.

Еще одна «мишень» при использовании гидроразрыва пласта — гидrolитосфера. Естественное природное строение осадочных пород, включающих залежи углеводородов, предполагает наличие слоистости с чередованием пористых и проницаемых коллекторов и слабопроницаемых водоупорных горизонтов. Наличие водоупоров обеспечивает изоляцию отдельных горизонтов подземных вод, отличающихся по химическим и термодинамическим свойствам. Появление и разрастание сквозной техногенной трещиноватости приводит к установлению гидравлической связи водоносных горизонтов и смешиванию подземных вод разных глубинных уровней. Ближайшие к поверхности напорные горизонты подземных вод со сравнительно низкой природной минерализацией, наиболее ценные в плане питьевого и промышленного водоснабжения, оказываются загрязненными в районах нефтедобычи, в том числе и поступающими снизу напорными естественно минерализованными и нагретыми водами более глубоких артезианских горизонтов. Перемешивание вод водоносных горизонтов ведет к нарушению их геохимического и термодинамического равновесного состояния, появлению вод, химически агрессивных к водовмещающей среде. Частичное растворение пород коллекторов ведет к уменьшению внутрипластового давления и изменению химического состава подземных вод, в частности, к их природно-техногенному загрязнению растворимыми соединениями, имеющимися в составе горных пород.

Вследствие появления сквозной трещиноватости происходит также дегазация геологической среды. С появлением техногенных путей миграции улетучиваются радиоактивные газы, такие, например, как радон и торон, а также летучие углеводородные соединения. Появление таких газов вблизи нефтегазовых месторождений обеспечивает формирование их атмосферных геохимических аномалий. В итоге применение технологии гидроразрыва пласта влечет за собой комплексные системные изменения практически всех компонентов природной среды, находящихся во взаимосвязи и системном взаимодействии. Насколько серьезны при добыче сланцевых углеводородов перспективы возникновения чрезвычайных ситуаций, затрагивающих практически все сферы планеты, в том числе и биосферу, можно увидеть в схеме, приведенной на рис. 4.

При использовании технологии гидроразрыва пласта при добыче углеводородов всегда надо иметь в виду, что значительная часть реагентов, иногда высокотоксичных, выносятся на поверхность и вместе с промыточной буровой жидкостью и другими вспомогательными флюидами формирует локальные очаги химического заражения в окрестностях мест извлечения полезного продукта. И если с таким локальным загрязнением при на-

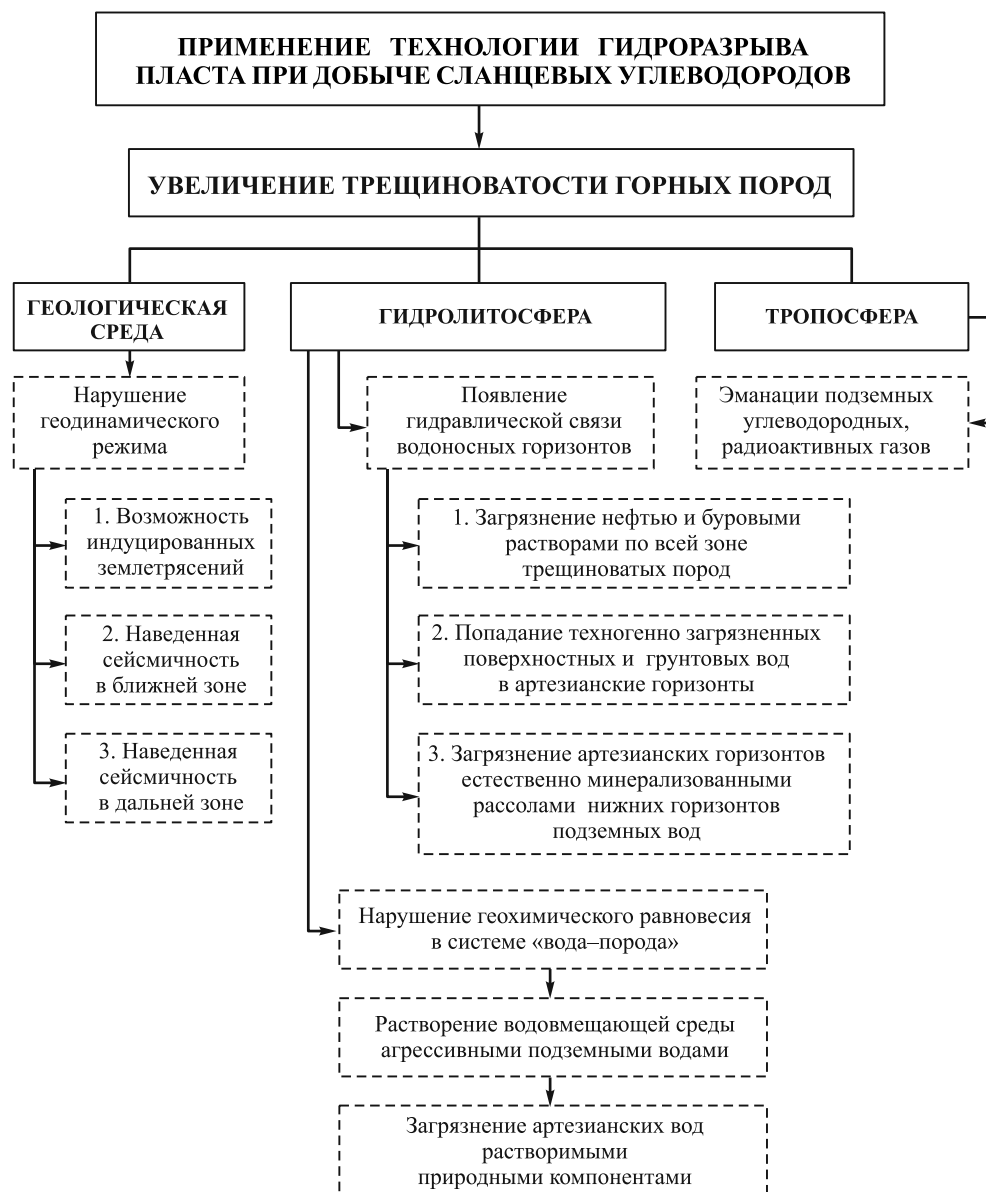


Рис. 4. Трансформация природных сред в результате применения технологии гидроразрыва пласта при добыче сланцевых углеводородов

личии доброй воли и достаточности технических и материальных средств можно справиться с определенной долей успеха, то оставшиеся в глубоких горизонтах технологические жидкости могут распространяться на значительное расстояние как по вертикали, так и по латерали, попадая в эксплуатируемые водоносные горизонты и выводя «из строя» значительное по объему геологическое пространство с практически неизвестными экологическими потерями.

Отдельно необходимо упомянуть о перспективах (возможно, уже в ближайшем будущем) возникновения неординарных ситуаций, вплоть до катастрофических, в связи с прогнозом освоения месторождений газогидратов. По предположениям изыскателей запасы газогидратов, скопления которых обнаружены и продолжают обнаруживать практически повсеместно как на материках, так и на акваториях, как уже упоминалось, по общему

объему многократно превышают запасы углеводородов всех известных месторождений. В то же время исследователи, изучающие скопления газогидратов на дне морей, указывают на возможность высачивания газа на поверхности суши и на акваториях, что может создавать в определенных местах пожаро- и взрывоопасные ситуации, а также вызывать иные непредвиденные последствия. Так, например, обнаруженные провалы на п-овах Ямал и Таймыр по одной из версий интерпретируются как следствие глубинных взрывов метана, выделенного из глубинных слоев в виде выбросов метана, что обусловлено присутствием газогидратов под слоем многолетнемерзлых пород. Недавно на дне Баренцева моря у побережья Норвегии на глубине около 45 м были обнаружены подводные воронки с диаметром до 800 м. Обнаружившие их исследователи из Арктического университета Норвегии считают, что подобные кратеры могли

образоваться из-за мощных прорывов метана из-под дна на морском шельфе. Океанологам уже известны случаи появления газовых «пневматических» хлопков в океане. Это происходит, когда сжиженный и кристаллизованный газ, находящийся в виде льда, постепенно разогревается и приобретает летучую форму. Огромные объемы такого газа, вырываясь на поверхность воды, значительно повышают ее температуру. Из-за резкого перепада давления объем метана резко увеличивается (приблизительно в 150 раз в зависимости от глубины залежей). Такой выброс газа может приводить к возникновению локального урагана в океане.

В обоих приводимых в качестве примеров случаях ни образование провалов на суше, ни нахождение кратеров на дне Баренцева моря не повлекло за собой какого-либо ущерба. Это объясняется в первую очередь тем, что районы, где обнаружены провалы на суше и кратеры на дне Баренцева моря не относятся к категории освоенных территорий и акватории. Тем не менее этот феномен вызывает не только научный интерес, но и определенное беспокойство в связи с неясностью его природы и перспективами обнаружения подобных геологических структур в будущем.

Заключение. Добычу, транспортировку, хранение и переработку углеводородов следует относить к категории производств, характеризующихся весьма высокой потенциальной экологической опасностью, а все предприятия этой отрасли — к категории «объектов особой важности» [Гражданская..., 2015]. Возрастание объема добычи углеводородов, появление новых технологий, перспективы освоения месторождений сланцевых углеводородов и газовых гидратов на континентах и акваториях морей и Мирового океана в совокупности способствуют увеличению степени экологического риска. Под экологическим риском в данном случае подразумевается возможность и оцениваемая вероятность возникновения негативных изменений состояния биосферы (деградация экосистем вплоть до исчезновения отдельных видов флоры и фауны) или переход ее в неустойчивое состояние под воздействием техногенных стресс-факторов [Базовые..., 2012; Снакин, 2008].

В нашей стране приняты федеральные законы, призванные обеспечивать безопасность объектов особой важности: Законы РФ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», «Об охране окружающей природной среды», «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» и др. Согласно этим законам добывающие компании должны придерживаться унифицированного подхода к оценке риска и по-прежнему к осуществлению мер контроля. Это делается с целью предотвращения происшествий и аварийных ситуаций на всех этапах освоения углеводородного сырья. Принимаемые меры на-

правлены на снижение риска разливов нефти и выброса газа или уменьшение объема разлива и выброса до целесообразного низкого уровня. Они также предусматривают организацию мониторинга состояния всего оборудования, и в первую очередь эксплуатационных скважин, промысловых и магистральных трубопроводов (рис. 3), а также контроль за состоянием окружающей среды. При возникновении чрезвычайных ситуаций основные мероприятия направляются на обеспечение безопасности персонала и населения, защиту экологически чувствительных районов и видов фауны, имущества и экономических ресурсов. Такие меры позволяют оперативно решать задачи в случае, если аварийные ситуации не выходят за рамки ординарных событий.

Когда ситуация выходит из-под контроля, практикуется привлечение армейских подразделений и спасательных отрядов МЧС. Такая практика хорошо себя зарекомендовала на современном этапе развития газонефтедобывающей отрасли. В то же время перманентное отвлечение армейских подразделений и аварийных служб МЧС на ликвидацию последствий чрезвычайных и катастрофических ситуаций нельзя признать единственно правильным решением задачи обеспечения безопасности этой отрасли. Надо иметь в виду, что приходится сталкиваться с ситуациями трех типов.

Первый тип представляет собой комплекс аварийных ситуаций, возникающих при уже ставших традиционными технологиями добычи углеводородов на суше и акваториях шельфовых зон морей и Мирового океана. Можно считать, что в данном случае уже есть большое количество наработанных алгоритмов работы по противодействию чрезвычайным ситуациям, что, конечно, не исключает дальнейшие научно-практические исследования с целью усиления потенциала противодействия.

Второй тип касается набирающей силу добыче сланцевых углеводородов. Технология извлечения ископаемого топлива из сланцев известна давно, однако сама задача гидроразрыва пласта, способы его осуществления, применяемые реагенты и, главное, возможные экологические последствия на разных геологических уровнях остаются в значительной мере *terra incognita* в научном плане и с точки зрения эффективности практической (экономической, экологической и социальной) реализации этой технологии.

Третий тип ситуации, с которым еще предстоит столкнуться, возможно, уже в недалеком будущем, — разработка месторождений газогидратов. В этой области все пока новое — и теории, и практика, и все, что связано с добычей и использованием углеводородов. Однако новизна надвигающейся проблемы не снимает, а наоборот, усиливает необходимость специальных исследований в этой области, пока больше научных, но

ориентированных уже и на практическое использование этого вида сырья.

Учитывая сложность сформировавшейся проблемы, представляется целесообразным создать на федерально-отраслевом уровне специальные научно-производственные структуры и подразделения для курирования и осуществления перманентного мониторинга всего цикла нефтегазового производства. Эти подразделения должны взять на себя ответственность за разработку и эксплуатацию месторождений углеводородов в стране на основе межотраслевых отношений с учетом различных

форм собственности с целью снижения общего потенциального экологического риска на фоне растущего объема добычи углеводородов — основного вида топлива и богатейшего сырья современной химической промышленности. Такие структуры будут более подвижны и в силу этого открыты для международного сотрудничества, что очень важно тогда, когда чрезвычайные ситуации выходят на региональный, национальный или глобальный уровень. В этом случае такого рода структуры необходимо ввести в юрисдикцию Организации Объединенных Наций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базанова А.А. Экологические проблемы нефтедобывающей промышленности. 2010. Сайт Смоленского государственного университета: URL: <http://works.doklad.ru/view/IGRqPtICihM.html> (дата обращения: 14.03.2015).

Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов. М.: ООО «Геомаркетинг», 2012.

Воробьев А.Е., Болатова А.А., Молдабаева Г.Ж., Чекушина Е.В. Экспертная оценка современных мировых запасов аквальных залежей газогидратов. Официальный сайт журнала «Бурение и нефть». 2011. № 12: URL: http://burneft.ru/archive/issues/vars/view_mode/2011-12/1 (дата обращения: 02.03.2015).

Гражданская защита: Энциклопедия. 3-е изд., перераб. и доп.: В 4 т. / Под общ. ред. В.А. Пучкова. Т. 4. М.: МЧС России, 2015.

Зеленцова Ж. Сланцевый газ, мифы и перспективы мировой добычи, 2011 23.12. URL: <https://pronedra.ru/gas/2011/12/23/slancevyj-gaz/> (дата обращения: 07.03.2015).

Мельников Н.Н., Калашник А.И., Калашник Н.А., Каспарьян Э.В. Научно-организационные основы геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов в

целях защиты окружающей природно-технической среды // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 6. С. 5–9.

Проблемы обеспечения экологической безопасности при освоении нефтегазовых месторождений Баренцева моря. Сайт интернет медиа-проекта «Нефтяник», 20.08.2014. URL: <http://neftynik.ru/problems-obespecheniya-ekologicheskoy-bezopasnosti-pri-osvoenii-neftegazovykh-mestorozhdenij-barenceva-morya/> (дата обращения: 06.02.2015).

Семь самых страшных аварий на буровых платформах. 18.12.2013. Новостной сайт Россия 24: URL: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=1168280> 18.12.2013 (дата обращения: 08.03.2015).

Снакин В.В. Экология и природопользование в России: Энциклопед. словарь. М.: Academia, 2008.

Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г., Барабошкина Т.А. и др. Трансформация экологических функций литосферы в эпоху техногенеза. М.: Ноосфера, 2006.

World Shale Resource Assessments. Официальный сайт U.S. Energy Information Administration Last updated: 24.09.2015: URL: <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/index.cfm> (дата обращения: 07.03.2015).

Поступила в редакцию
01.03.2017

УДК 551.248.2 + 551.242.5

Н.В. Макарова¹, Т.В. Суханова²**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ НОВЕЙШИХ ПЛАТФОРМЕННЫХ СТРУКТУР (НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ПРИЛЕЖАЮЩЕЙ ЧАСТИ СКИФСКОЙ ПЛИТЫ)**

Рассмотрены актуальные проблемы, возникающие при изучении новейших тектонических структур Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты: широкое развитие покровных образований над неотектоническими структурами, затрудняющих оценку амплитуды тектонических движений; прерывистое распространение и недостаточная сохранность отложений, коррелятных новейшему этапу; преувеличенный денудационный срез с новейших поднятий; разный взгляд на тип структурных форм — блоковый или изгибный; характер и тип границ между структурными формами; значение погребенных долин для неотектоники; изменение структурных планов в течение новейшего этапа; геодинамические условия и источники тектонических напряжений при формировании новейших структур.

Ключевые слова: платформа, коррелятные отложения, структурно-геоморфологические реперы, поверхности выравнивания, новейшие структурные формы, поднятия, прогибы, линейменты, разломы, структурный план, напряжения.

The actual problems of the study of recent tectonics of the East European Platform and the Scythian Plate: development of cover formations of neotectonic structures, discontinuous distribution and bad of safety of correlative deposits, different views on the type of structural forms — block or bending, the nature and type of boundaries between structural forms, a change in the structural plans for the latest phase, the conditions and sources of stress in the formation of new structures.

Key words: platform, correlative deposits, structural-geomorphologic markers, planed surfaces, the latest deformation, structural forms, lifting, warping, lineaments, faults, structural plan, stresses.

Введение. Восточно-Европейская платформа (ВЕП) относится к древним низким платформам. Абсолютные отметки рельефа на большей части ее территории составляют 200–250 м, и лишь высота отдельных возвышенностей — Приволжской, Бугульминской и некоторых других превышает 300 м. В северной части Скифской плиты, прилегающей к ВЕП, отметки свыше 300 м характерны для Донецкого кряжа.

Новейший тектонический этап на ВЕП и Скифской плите начался в конце олигоцена. Перед этим на юге и востоке произошла регрессия палеогеновых морей (закрытие океана Тетис). В центральных и северных областях ВЕП, начиная с раннего мела, в некоторых местах с позднего мела, на востоке с перми или триаса, а в Поволжье только со среднего палеогена, установились континентальные условия, в течение которых формировались поверхности выравнивания или эрозионно-денудационные равнины.

В новейшее время возникли платформенные поднятия и опускания или прогибы, именуемые структурными формами. Амплитуда новейших тектонических движений на большей части

территории составляет всего 100–250 м, реже больше, а градиенты их изменений редко превышают несколько метров на километр расстояния. Вследствие этого многие структурные формы в современном рельефе выражены неотчетливо, в этом заключается одна из трудностей их выявления и изучения, особенно в условиях отсутствия или фрагментарного развития коррелятных новейшему этапу олигоцен-неогеновых отложений.

В настоящее время при изучении новейшей тектоники платформы используются новые материалы и методы: космические снимки высокого разрешения, в том числе радарные, а также тектонофизические и геохимические методы, космическая геодезия, геофизические данные, позволяющие изучать глубинное строение структурных форм; широко применяются ГИС-технологии и моделирование. Все это позволяет исследовать новейшую тектонику платформы с большей детальностью, чем это было прежде и, что наиболее важно, связывать геодинамические условия формирования структур с различными источниками тектонических напряжений. Однако не уменьшается значение структурно-геоморфологического

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, канд. геол.-минерал. н.; e-mail: makarovanat@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, канд. геол.-минерал. н.; e-mail: tanikamgu@mail.ru

анализа рельефа, используемого совместно с данными о строении всего осадочного покрова и фундамента. Это позволяет, наряду с характеристикой структурных форм — морфологией, возрастом, стадийностью, амплитудой и скоростью развития, определять степень наследования ими более древних структур. Именно морфология структур часто главенствует при определении геодинамических условий их образования.

Вместе с тем при изучении новейшей тектоники платформенной территории существует ряд проблем, по-разному решаемых исследователями; к ним относятся: 1) развитие покровных отложений на неотектонических структурах; 2) основные реперы, используемые при выделении и характеристике структурных форм (коррелятные отложения и геоморфологические уровни); 3) оценка величины денудационного среза платформенных структур; 4) типизация новейших структурных форм платформ; 5) погребенные долины; 6) степень наследования новейшими структурами древних и изменение структурных планов в течение новейшего этапа; 7) геодинамические условия формирования платформенных структур.

Развитие покровных отложений над структурными формами. При структурной интерпретации рельефа необходимо учитывать факторы, влияющие на оценку амплитуды движений и активность структур в настоящее время. К таким факторам относятся широко развитые в пределах платформы покровные отложения — ледниковые и водноледниковые в северной половине рассматриваемой территории и лёссово-почвенные в южной. Они маскируют форму структур, увеличивают абсолютную высоту рельефа, что может вызвать завышенную оценку амплитуды тектонических движений. На большей части территории ВЕП, особенно в ее центральной части, ледниковые покровы состоят в основном из двух среднеплейстоценовых морен (днепровской и москов-

ской). Нижнеплейстоценовая (окская) морена часто сохраняется только в глубоких эрозионных врезках. В северной и западной частях ВЕП к ним присоединяются две верхнеплейстоценовые морены — калининская и осташковская. Таким образом, общая мощность морен достигает многих десятков метров, причем наибольшая (100–150 м) у стадийных и конечных морен, и иногда превышает амплитуду новейших тектонических движений. Мощность морен часто увеличивается на поднятиях, тормозивших продвижение льда, как, например, на Смоленско-Дмитровской гряде или во впадинах, где скапливался лед. В последнем случае над погребенным новейшим прогибом современные гипсометрические отметки рельефа могут быть больше, чем на соседних поднятиях, или равны им (рис. 1), это следует принимать во внимание, характеризуя амплитуду движений.

В южной части ВЕП и на Скифской плите покровные образования состоят из эоплейстоценовых скифских глин и перекрывающих их четвертичных лёссово-почвенных комплексов. Общая мощность этих отложений местами (в частности, в Сальско-Маньчском прогибе) достигает 100 м (рис. 2). Их подошва уходит на 10–20 м ниже уреза рек. Такая мощность покровных образований объясняется опусканием прогиба, происходившим до среднего плейстоцена. Амплитуда последующих поднятий в несколько раз меньше мощности покровных образований. Если не учитывать их мощность, то можно получить завышенную оценку амплитуды тектонических движений. В этих условиях необходимо использовать данные бурения и не учитывать мощность покровов при определении амплитуды движений.

Основные реперы при определении и характеристике структурных форм на ВЕП и Скифской плите. К ним в первую очередь относятся отложения позднеолигоцен-четвертичного возраста, коррелятные новейшему этапу и образующиеся на

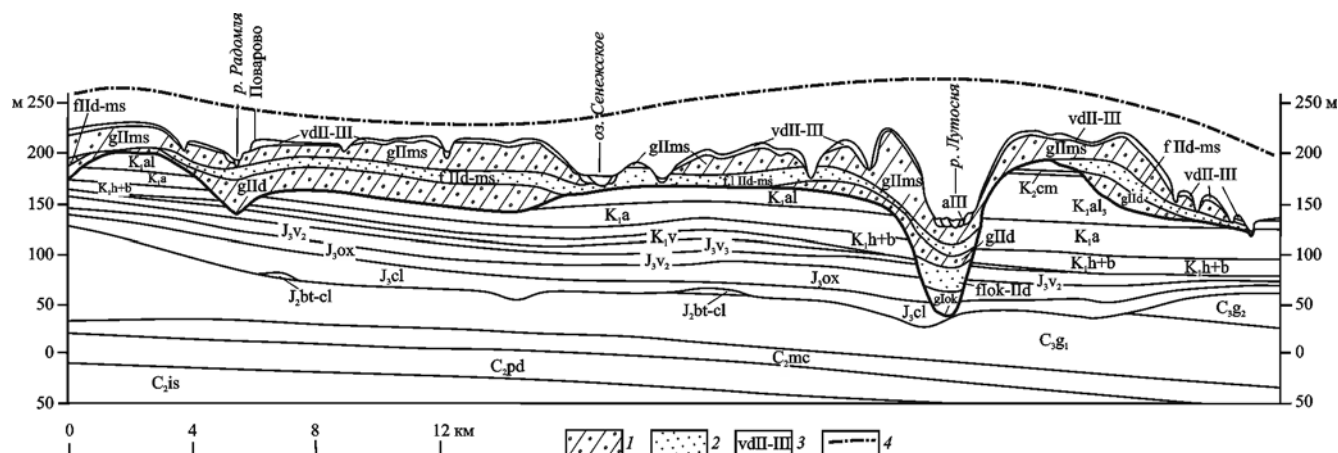
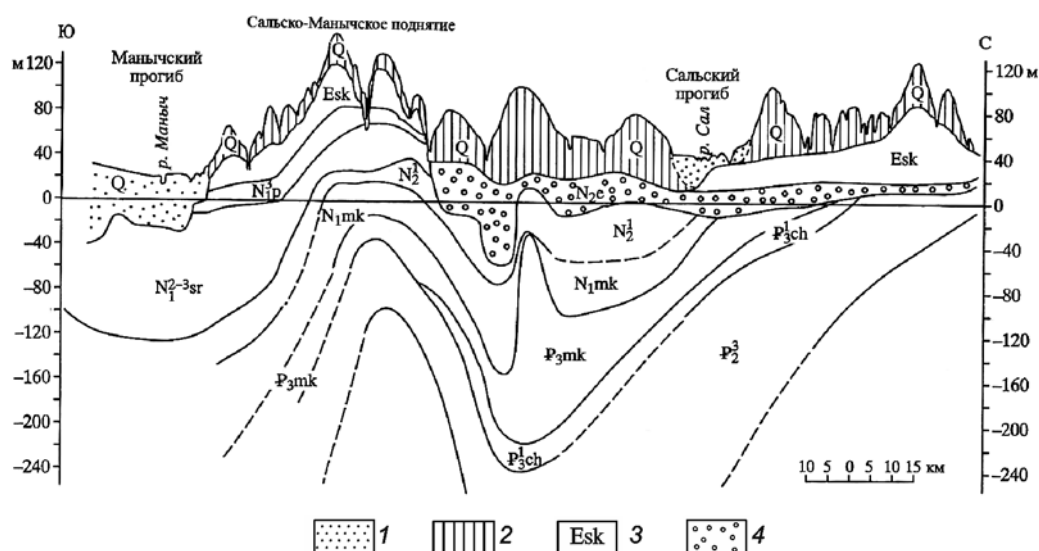


Рис. 1. Покровы ледниковых отложений, сглаживающие различия в гипсометрии поднятий и прогибов, Центральная часть Восточно-Европейской платформы, Клинско-Дмитровская гряда: 1 — морены окской (glok), днепровского (gld) и московского (glm) оледенений; 2 — флювиогляциальные и озерные отложения днепровского и московского оледенений (f, l Pd-m); 3 — эолово-делювиальные отложения; 4 — основная линия поднятия и прогибания (этот разрез и все следующие взяты с геологических карт масштаба 1: 200 000)

Рис. 2. Развитие покровных отложений на Сальско-Маньчском междуречье (Южно-Ергенинское поднятие) и в Сальском прогибе (северная часть Скифской плиты): 1 — аллювий; 2 — четвертичный лёссово-почвенный комплекс (Q); 3 — эоплейстоценовые скифские глины (Esk); 4 — плиоценовые отложения (N_2). Остальные индексы — свиты палеогена и неогена



всем его протяжении. Новейшая тектоника в существенной мере предопределила особенности их пространственного развития и строения. Поэтому мощность, фациальный состав и современное положение в рельефе олигоцен-четвертичных отложений служат показателями проявления движений разного знака.

Дочетвертичные коррелятные отложения на исследуемой территории представлены морскими, аллювиально-морскими (дельтовыми) и аллювиальными отложениями. Наиболее широко они распространены и сохранились на юге и востоке ВЕП и на Скифской плите. К ним относятся майкопская и полтавская серии позднеолигоцен-раннемиоценового возраста, образовавшиеся на начальной стадии развития структурных форм, а также миоценовые (сарматские и понтические) и плиоценовые (ергенинские, акчагыльские, ханровские) отложения более поздних стадий. Разная мощность этих серий и свит характеризует поднятия и впадины, а абсолютные отметки их подошвы в современном или погребенном рельефе позволяют определять амплитуду новейших движений за весь неотектонический этап и за его отдельные стадии. Число последних обычно соответствует числу свит новейших отложений, развитых во впадинах. На востоке ВЕП к отложениям, коррелятным различным стадиям новейшего этапа, относятся миоценовая шешминская свита, плиоценовые челнинская, сокольская, чистопольская (акчагыльская) и эоплейстоценовая свиты. Положение в современном рельефе акчагыльской свиты, сложенной морскими осадками Каспийского моря, наилучшим образом отражает четвертичные движения. Во впадинах и долинах рек эта свита погребена, и находится более чем на 200 м ниже нулевой отметки, а на склонах и в осевых частях поднятий — на высоте 150–250 м. Таким образом, амплитуда движений превышает 350–400 м.

На большей части центральной и западной частей ВЕП использование коррелятных олигоцен-

плиоценовых отложений затруднено из-за их фрагментарного развития. Они сохранились в древних речных долинах, разрозненная сеть которых либо погребена и выявлена бурением во впадинах на разной глубине, либо приподнята до 200 м на склонах крупных поднятий, и по ним определяются амплитуды поднятий в разное время. В Окско-Донском прогибе сформировались миоценовые лиманно-морские ламкинская и горелкинская свиты и плиоценовые аллювиальные усманская и кривоборская свиты [Миоцен..., 1977], залегающие на глубине до 100 м ниже современных русел рек. На южных склонах Воронежского поднятия и других крупных поднятий соответствующие им аллювиальные отложения слагают террасы высотой 160–200 м над руслами рек.

Среди *четвертичных* отложений к основным показателям развития структурных форм относятся морские осадки и аллювий, слагающие террасы. От их возраста, фаций и мощности зависят количественные характеристики многих структурных форм. Однако в связи с неоднократным изменением стратиграфических схем четвертичных отложений, вызванным передатировкой ледниковых отложений в центре Русской равнины, меняется и возраст аллювия, что затрудняет однозначную оценку амплитуды и скорости движений в четвертичный период.

Большое значение в изучении новейших движений и созданных ими структурных форм также имеют *геоморфологические уровни* в виде различного типа поверхностей выравнивания, образованных в доновейшее и новейшее время. Некоторые из них коррелятны свитам, указанным выше, и датируются по возрасту этих свит. Это отражает единство эрозионно-денудационных и аккумулятивных процессов, происходящих под влиянием тектонических и климатических изменений. Поверхности выравнивания определяют фактически все основные характеристики и особенности развития структурных форм. Использование их особенно

эффективно для поднятий, лишенных покрова новейших отложений.

Среди поверхностей выравнивания на ВЕП и Скифской плите можно выделить несколько типов. Наиболее древние из них представлены фрагментами мезозойского (допалеогенового) *пенеплена*, которые сохранились, на Воронежском и Донецком поднятиях, Украинском и Балтийском щитах, Токмовском, Южно-Татарском сводах и др. Практически везде они занимают самое высокое положение в рельефе — 250–350 м и более, по ним определяется общая амплитуда поднятий. Местами на них сохранились остатки красноцветной коры выветривания, датируемой поздним олигоценом—ранним миоценом.

Шире развиты *педименты*, представляющие собой поверхности, формирующиеся в течение новейшего этапа при непрерывно-прерывистом проявлении тектонических движений, которое проявляется в ритмичном чередовании периодов активизации движений и их прекращения или ослабления. В активный период поднятия рельеф расчленяется, формируются врез и коррелятные отложения, сносимые во впадину или речную долину. В период замедления или прекращения поднятия в основании вреза, представленного склоном, вырабатывается эрозионно-денудационная поверхность выравнивания (педимент), сочленяющаяся с аккумулятивной поверхностью во впадине. Педименты образуют разновысотные и разновозрастные (от миоцена до голоцена включительно) ступени на склонах поднятий и характерны для орогенных и платформенных областей. Впервые они были выделены В. Пенком в начале XIX в. Альпах как предгорные поверхности выравнивания, отражающие стадийность развития структурных форм и неравномерное проявление движений.

Несмотря на небольшую амплитуду новейших платформенных деформаций, стадийность их развития выражена отчетливо. При этом число стадий, определяемых по числу педиментов, и их возраст в большинстве случаев соответствуют стадиям, выделяемым в орогенах Урала, Кавказа, Тянь-Шаня и др. Эти стадии датированы по возрасту коррелятных отложений как позднеолигоцен-раннемиоценовая ($Pg_3-N_1^1$), средне-позднемиоценовая (N_1^{2-3}), плиоценовая (N_2), эоплейстоценовая (E), неоплейстоценовые (Q_1-Q_3) и голоценовая (Q_4). [Новейшая..., 2006]. Это свидетельствует об общих причинах формирования стадийности развития структурных форм как в орогенах, так и на платформах. В основе стадийности лежит, как указывалось выше, непрерывно-прерывистый процесс развития неотектонических движений, а также планетарные циклические изменения климата. Педименты отчетливо выражены на склонах наиболее крупных упомянутых выше платформенных поднятий, лишенных четвертичного покрова, или с его незначительной мощностью. Здесь ступенчатость рельефа формируется с начала новейшего этапа, т.е. с позднего олигоцена—раннего миоцена, причем в некоторых местах, как указывалось выше, сохраняются фрагменты исходного мезозойского (доновейшего) *пенеплена*. Менее крупные поднятия проявились в рельефе позже, в плиоцене или четвертичном периоде, соответственно, число ступеней на их склонах меньше. Там, где мощность четвертичного покрова меньше глубины врез, отделяющих ступени, последние выражены в рельефе и под покровом, хотя и в сглаженном виде (рис. 3). В условиях развития мощного покрова ступенчатость часто полностью скрыта (рис. 1).

Педименты используются для определения морфологии структур и скорости поднятия в от-

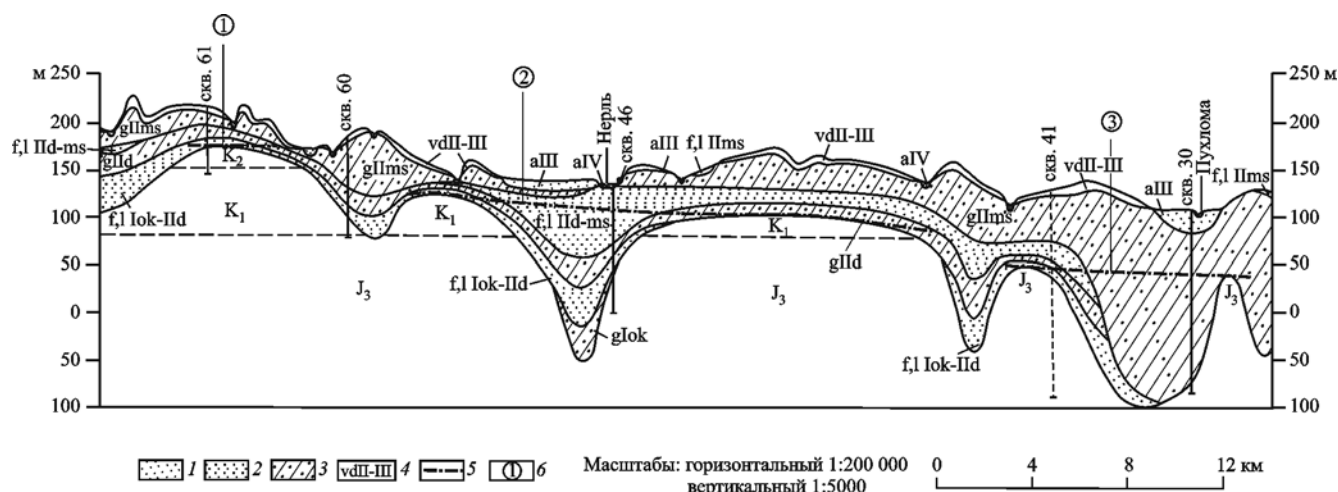


Рис. 3. Ступени рельефа, перекрытые четвертичными отложениями, центральная часть Восточно-Европейской платформы, южный склон Клиньско-Дмитровской гряды: 1 — аллювий; 2 — флювиогляциальные и озерные отложения окско-днепровского (f,l Iok-IIId) и днепровско-московского (f,l IId-m) горизонтов; 3 — морены окского (gIok), днепровского (gIId), московского (gIIms) оледенений; 4 — покровные эолово-делювиальные отложения; 5 — разновысотные ступени рельефа (педименты); 6 — номера ступеней рельефа (цифры в кружках)

дельные стадии. Превышения их друг над другом или глубина врезов прямо пропорциональны амплитуде поднятий. Зная возраст педиментов, можно определить скорость поднятия в отдельные стадии. Особенно важны значения скорости голоценовых и современных движений при оценке устойчивости территорий под строительство инженерных объектов. Однако это трудоемкий процесс, требующий анализа топографических карт, построения сложных сетей геолого-геоморфологических профилей, данных бурения и др. Поэтому, возможно, данные о амплитуде и скорости движений в отдельные стадии для платформенных структур пока единичны.

В отличие от орогенных областей, где при интенсивной денудации педименты представлены узкими водоразделами, в платформенных условиях они иногда занимают обширные пространства. В этом случае их можно считать *педипленами* — другим типом поверхностей выравнивания, развитых на ВЕП [Дедков, 1972]. На Средневожском поднятии к началу новейшего этапа в конце палеогена образовались *абразионные* поверхности, выработанные на морских меловых и нижнепалеогеновых отложениях.

Несмотря на разный генезис поверхностей и их разновозрастность, их можно использовать при анализе неотектонических движений, определении морфологии и возраста структур, амплитуды и скорости их развития.

Оценка величины денудационного среза при использовании различных поверхностей выравнивания для определения амплитуды движений — принципиальный вопрос. Он рассматривается в связи с большой величиной денудационного среза, местами превышающей 600–700 м, принятой для новейших поднятий Среднего и Нижнего Поволжья [Дедков, 1972; Карта..., 1981]. Этот срез должен относиться к неогеновому времени, когда из-под уровня моря только что вышли поверхности, сложенные морскими осадочными отложениями нижнепалеогеновых сызранской и саратовской свит. Такая величина среза увеличивает амплитуду поднятия почти до километра. В донеотектонический этап при образовании пенепленов денудационный срез мог быть достаточно большим, особенно на постоянно поднимающихся щитах, например Балтийском, или на Донецком поднятии. Однако в новейшее время срез не мог быть большим, что доказывает местами сохранившаяся на мезозойском пенеплене кора выветривания. Небольшой срез объясняется тем, что основное разрушение рельефа и структур происходит преимущественно в латеральном направлении от речных долин к водоразделам в процессе образования педиментов. Вертикальное снижение водоразделов происходит медленно, и оно незначительно. В эоценове и неогенове поверхности разного типа были перекрыты скифскими глинами лёссами, леднико-

выми отложениями, еще более предохранявшими их от денудации. Поэтому денудационный срез за новейший этап на платформенных поднятиях вряд ли мог достигать таких размеров.

Новейшие структурные формы платформ. Первые карты новейшей тектоники ВЕП и Скифской плиты были мелкомасштабными. Они отражали амплитуду новейших движений, на них в обобщенном виде выделялись лишь крупные структуры, имеющие в целом незначительную (до 200–250 м) амплитуду. Более детальные карты (1:500 000) были составлены для отдельных регионов (не считая территории Украины и Белоруссии, а также морей) — Среднего и Нижнего Поволжья, Татарстана, Ростовской области, Воронежского поднятия, а также для менее крупных территорий. Большая часть структур, отраженных на этих картах, имела близкие к изометричным контуры, а разломы были единичны.

В настоящее время существует два взгляда на тип новейших структурных форм платформы — блоковый и изгибный, местами складчатый. Большая часть исследователей считают новейшие деформации разновысотными *блоками* разного ранга, отражающими блоковое строение и движения фундамента по разломам [Бабак, Николаев, 1983; Трегуб, 2002]. Число выделяемых блоков разной конфигурации и размеров на небольших площадях иногда столь велико, что вызывает сомнение. Так, на территории Москвы было выделено 116 блоков разного размера [Москва..., 1997]. Границы между блоками — линеаменты или зоны трещиноватости, называемые «слабыми зонами», «структурными линиями», «блокоразделами», отвечают, по мнению указанных авторов, глубоким разломам фундамента. Но если есть блоки, отличающиеся разной высотой рельефа, следовательно, были движения, которые их переместили, т.е. должны быть выявлены смещения не только поверхности (с разными абсолютными отметками), но и пород, которыми сложены эти блоки. Однако горизонтальное залегание осадочного покрова на обширных территориях, что отмечено как ранней, так и более поздней геологической съемкой, не нарушено разрывами. Г.Н. Иванченко считает, что «это не блоки в тектоническом смысле, когда каждый блок характеризуется определенной самостоятельностью движений, а как бы начальная стадия этого процесса...» [Динамические..., 2005, с. 132]. А.И. Трегуб [2002] границами блоков разного ранга в структуре Воронежского массива считает не собственно разломы фундамента, а зоны их динамического влияния. Последние представлены прогибами, валами, смыкающимися крыльями пологих флексур, или комбинациями этих типов. Несмотря на казалось бы, неразломный характер этих структур, важнейшими элементами их внутреннего строения указанный автор считает разрывные нарушения.

Глубоко погребенные разломы фундамента, широко используемые при выделении и выявлении строения новейших блоковых структур, выделены предположительно и в основном по геофизическим данным, в интерпретации разных авторов они представлены по-разному и не совпадают по местоположению, ориентировке, а иногда и по типу. Кроме того, в структурах чехла большая их часть не проявлена, что можно видеть на геофизических и буровых разрезах, в частности, для хорошо изученного Воронежского поднятия. Их интерпретация в качестве разрывов на поверхности основана преимущественно на геоморфологических признаках. Подтвержденные геологической съемкой разломы единичны. В.И. Макаров [1997, 2008] неоднократно отмечал, что крайне малые градиенты неотектонических деформаций, отнесенные к большим расстояниям, характерным для платформенных структур, а также к интервалам времени в сотни тысяч лет, делают практически невозможным образование разломов с разрывом сплошности пород и заметным смещением крыльев. Даже если разломы фундамента активизированы в новейшее время, их небольшая амплитуда (несколько десятков метров), за исключением разломов, ограничивающих авлакогены, в отложениях покрова при его достаточно большой мощности (до 1 км и более) должна рассеиваться, и ореол рассеяния тем шире, чем больше толщина покрова. Иногда разломы, проявляющиеся в фундаменте и нижних горизонтах чехла, затухают вверх по разрезу, замещаясь флексурами, или же им соответствуют зоны повышенной трещиноватости. Поэтому использование разломов фундамента в качестве границ новейших структурных форм в виде блоков требует обоснования. Необходимы факты реального смещения слоев геологического субстрата в разных крыльях разломов.

Нам представляется, что блоками исследователи считают разновысотные и разновозрастные поверхности выравнивания, развитые на склонах поднятий и прогибов и формирующиеся в разные стадии новейшего этапа (рис. 3). В новейшей структуре платформы блоки существуют там, где

разломы фундамента имеют значительную амплитуду, нарушают чехол, и где по ним зафиксированы перемещения слоев. Такие примеры пока единичны.

Согласно другой точке зрения [Макаров, 1997, 2008; Макарова и др., 2012; Корчуганова и др., 2012] новейшие структуры платформы представляют собой изгибные деформации основания и чехла малой кривизны (здесь не имеются в виду мелкие складки в новейших отложениях), выраженные очень пологими (малоградиентными) поднятиями и опусканиями. Это отражено на ряде схем как всей территории ВЕП [Корчуганова и др., 2012], так и ее отдельных районов — Донбасса, северной части Скифской плиты [Новейшая..., 2006], Окско-Донского прогиба, северного склона Токмовского и южного склона Воронежского поднятий [Макарова и др., 2002, 2012, 2015], Поволжья и северных областей платформы [Юдахин и др., 2003] и др. Изгибный характер структур выявляется по деформациям подошвы отложений, коррелятных новейшему этапу, геоморфологических уровней, в том числе дочетвертичной поверхности (рис. 4). В целом это пологие положительные и отрицательные формы разного порядка и глубины заложения. К первым относятся как отдельные крупные поднятия, своды, валы, так и незначительные по размерам локальные поднятия, купола. Отрицательные формы, разделяющие поднятия и служащие границами, представляют собой опускания, прогибы, впадины, мульды, реже грабены. Обычно к ним приурочены речные долины, прорезающие их, вследствие чего структуры являются эрозионно-тектоническими.

В дополнение к сказанному считаем, что использовать для новейших структур названия «синеклиза» и «антеклиза» не совсем верно. Возникшие еще в палеозое или раньше, они в новейшее время существенно переработаны движениями и практически перестали существовать в тех границах, которые отражены на тектонических картах. Так, на месте Московской синеклизы возникли многочисленные поднятия и прогибы разных рангов — валы, своды, блоки; Воронежская ан-

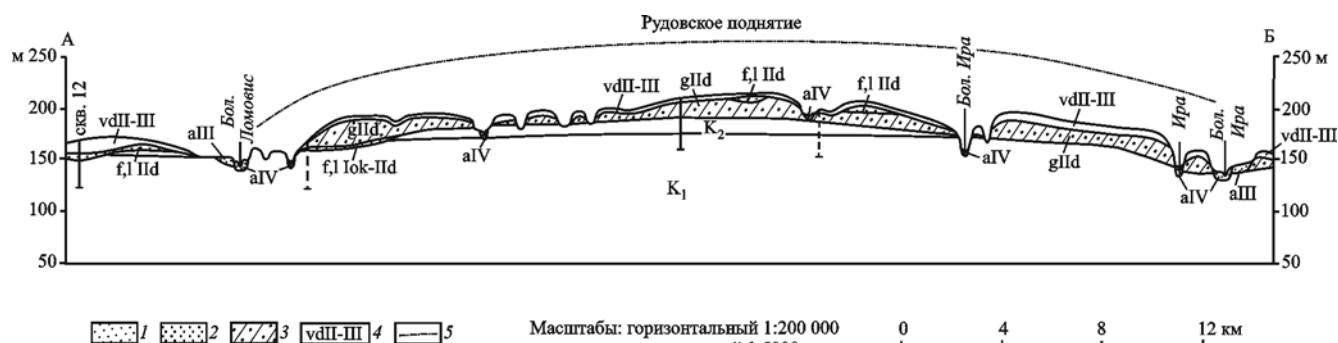


Рис. 4. Сводный характер Рудовского поднятия (юго-восточная часть Восточно-Европейской платформы, Тамбовская область): 1 — аллювий голоценовый (aIV) и позднеоплейстоценовый (aIII); 2 — флювиогляциальные и озерные отложения окско-днепровского (f, l lok-IIId) и днепровского (f, l IID) горизонтов; 3 — морена днепровского оледенения (gIID); 4 — эолово-делювиальные отложения; 5 — условная линия поднятия

теклиза распалась на Воронежское сводовое и Приволжское линейное поднятия, разделенные протяженным меридиональным Окско-Донским прогибом. Возможно, лишь Прикаспийская синеклиза сохранилась как область прогибания, но и она «проросла» положительными структурами, в частности, соляными.

Погребенные долины. Их изучение имеет значение для неотектонических построений. Несовпадение современной эрозионной сети с древней объясняется различными причинами, в том числе неотектоникой. В пределах платформы выделяется сеть погребенных долин олигоцен-четвертичного возраста. Особенно глубокий врез (до 200–300 м) характерен для плиоценовых долин в связи со значительным общим тектоническим подъемом территории платформы в это время и опусканием морских базисов эрозии. В раннем неоплейстоцене врез был менее значительным, но иногда превышающим миоценовый, средне- и поздне-неоплейстоценовые. Многие долины, служившие ложбинами стока во время таяния ледниковых покровов, отмерли или перекрыты более молодыми отложениями. Руслу современных рек часто смещены от погребенных русел на десятки и даже на сотни километров вправо или наследуют их только на отдельных участках. Правосторонняя асимметрия, характерная для 90% речных долин ВЕП, в большинстве случаев объясняется действием сил Кориолиса или законом Бэра–Бабины, хотя известно влияние и неравномерно развивающихся поднятий. В результате крупные реки в течение новейшего этапа, особенно в четвертичном периоде, мигрируют на склоны растущих поднятий, уходя из прогибов. Так, Волга из Прикаспийского, а Дон из Окско-Донского прогибов мигрируют на склоны Приволжского и Воронежского поднятий соответственно. Днепр смещается из Днепровско-Донецкого прогиба на склон поднятия Украинского щита и др.

Помимо сил Кориолиса, имеет значение и бо́льшая скорость боковой эрозии (до 5–10 мм/год) по сравнению со скоростью поднятия, которая составляет доли мм/год [Макаров, 2008]. В связи с постоянными и направленными перемещениями современных русел рек приуроченность их к разломам, в чем уверены многие исследователи, вряд ли возможна, иначе придется признать и латеральную миграцию разломов. Кроме того, ширина многих речных долин, измеренная по их голоценовым контурам, составляет от нескольких сотен метров до десятков километров (поймы Волги, Дона, Днепра и др.). Разрывные нарушения такого порядка в платформенных условиях неизвестны. Скорее всего, прямолинейность речных русел на некоторых участках отражает планетарную и тектоническую трещиноватость.

Степень наследования новейшими платформенными деформациями древних структур различна.

Ряд крупных структур развивается унаследованно в течение длительного времени. Например, с протерозоя с некоторыми перерывами развиваются поднятия Токмовского и Воронежского сводов, Украинского и Балтийского щитов, Прикаспийский прогиб и многие другие. Структуры менее крупного ранга (Окско-Цнинский вал, Нижнеокский прогиб и др.) также в целом наследуют палеозойские деформации, развиваясь с некоторыми перерывами. При этом границы структур, как правило, не остаются постоянными на разных возрастных уровнях, они мигрируют в ту или другую сторону. Но существуют и наложенные структуры, образовавшиеся в новейшее время. Например, Смоленско-Дмитровско-Ветлужский вал не соответствует структурам фундамента, палеозойского и мезозойского этажей. Другие примеры — Усть-Двинский прогиб на севере ВЕП, заложившийся на месте Архангельского выступа фундамента; Манычский прогиб, частично развивающийся над Ростовским выступом фундамента на южной границе ВЕП, и др. Даже там, где фундамент находится практически на поверхности или близко к ней, проявления новейших деформаций не всегда согласны с его структурами. Например, протерозойские структуры на южном склоне Воронежского поднятия имеют преимущественно северо-западную ориентировку (район долины р. Сейм), а новейшие — широтную [Макарова и др., 2015]. Это еще раз доказывает, что новейшие структурные формы не являются прямым отражением структур фундамента, в их образовании участвуют и другие факторы.

Несоответствие новейших и древних структур во многих районах ВЕП свидетельствует об эволюции структурных планов и геодинамических условий, происходивших на протяжении новейшего этапа, особенно в четвертичный период. Самые молодые четвертичные положительные и отрицательные деформации, выраженные в рельефе, не всегда повторяют или продолжают суммарные неотектонические деформации как по знаку, так и по простиранию. Это видно в южных районах ВЕП и на Скифской плите, относительно близко расположенных к источнику напряжений — Кавказскому орогену. Здесь по подошве погребенной майкопской серии позднеолигоцен-раннемиоценового возраста выделены поднятия и впадины северо-западного и близкого к широтному простирания, образовавшиеся в начале новейшего этапа [Новейшая..., 2006]. Структуры, возникшие в четвертичное время, имеют север–северо-западное простирание и в некоторых местах полностью не согласуются с ними по знаку движений.

Другой пример, где происходила значительная перестройка на протяжении новейшего этапа, — Окско-Донской прогиб. В позднеолигоцен-раннемиоценовое время здесь еще существовал прогиб с морским заливом [Миоцен..., 1977]. Затем

в связи с вовлечением его восточной части в развивавшееся Приволжское поднятие на протяжении позднего миоцена и плиоцена зона прогиба смещалась на запад, и в четвертичное время на месте прогиба возникли молодые поднятия, сложенные палеоген-неогеновыми и перекрывающими их четвертичными ледниковыми отложениями (рис. 5). Многие прогибы в разных частях ВЕП активно сокращаются за счет роста четвертичных положительных структур.

Таким образом, в течение новейшего этапа на территории ВЕП происходила неоднократная перестройка структурных планов. Она была вызвана изменяющейся во времени геодинамической обстановкой вследствие постоянного перераспределения тектонических сил, воздействующих на неоднородную по строению в разных районах земную кору. Поэтому современный структурный план какого-либо района лучше всего отражен на структурно-геоморфологических картах, а знание суммарной амплитуды движений за весь неотектонический этап необходимо при построении неотектонических карт.

Геодинамические условия формирования новейших структур ВЕП и Скифской плиты. Эта сложная тема рассмотрена в самых общих чертах, так как ее лишь в последние годы стали активно обсуждать и пока недостаточно фактических материалов для обоснованных построений и выводов. ВЕП и Скифская плита имеют сложную геодинамическую структуру, обусловленную влиянием разномаштабных активных источников тектонических напряжений. К ним относятся глобальные, находящиеся вне платформы альпийские орогены Карпат, Кавказа и Урала, области спрединга и рифтогенеза северо-западной Атлантики, и региональные, находящиеся в недрах самой платформы (тектонно-магматические процессы преобразования и течения вещества в мантии и земной коре) [Леонов, 1995; Макаров, 1996; Щукин, 1996; Копп,

2004; Новейшая..., 2006; Макарова и др., 2015, 2016 и др.].

Морфология, закономерности пространственного положения и ориентировка новейших структурных форм ВЕП и Скифской плиты, дополненные тектонофизическим анализом трещиноватости пород и линеаментов, позволяют связать их формирование с каким-либо из указанных выше источников, а иногда с несколькими. Таким образом, определяется территория, на которую распространяется влияние того или иного источника напряжения, названная *геодинамической системой* [Макаров, 1996; Щукин, 1996].

Так, северо-восточная ориентировка чередующихся зон поднятий и прогибов в северной половине ВЕП, начиная с юго-восточного окончания свода Балтийского щита и практически до Урала, относится к Скандинавской геодинамической системе. Структуры южной половины ВЕП и Скифской плиты отражают латеральное давление со стороны Кавказа, т.е. входят в Альпийскую геодинамическую систему. Структуры в восточной части ВЕП отражают влияние Уральского орогена. Внутриплатформенные тектонические напряжения, инициируемые глубинными процессами преобразования и течения мантийного вещества, отражены в длительно развивающихся Воронежском и Токмовском сводах, Прикаспийском, Днепровско-Донецком и Окско-Донском прогибах и многих других структурах. Влияние их прослеживается в морфологии и строении прилегающих к ним поднятий и прогибов менее крупных рангов. Сложное взаимодействие различных источников напряжения определяется при тщательном изучении структурных форм, что требует множества данных полевых и камеральных исследований.

Помимо латеральных и вертикальных напряжений в формировании новейших платформенных структур участвует гравитационное движение — сползание комплексов отложений по

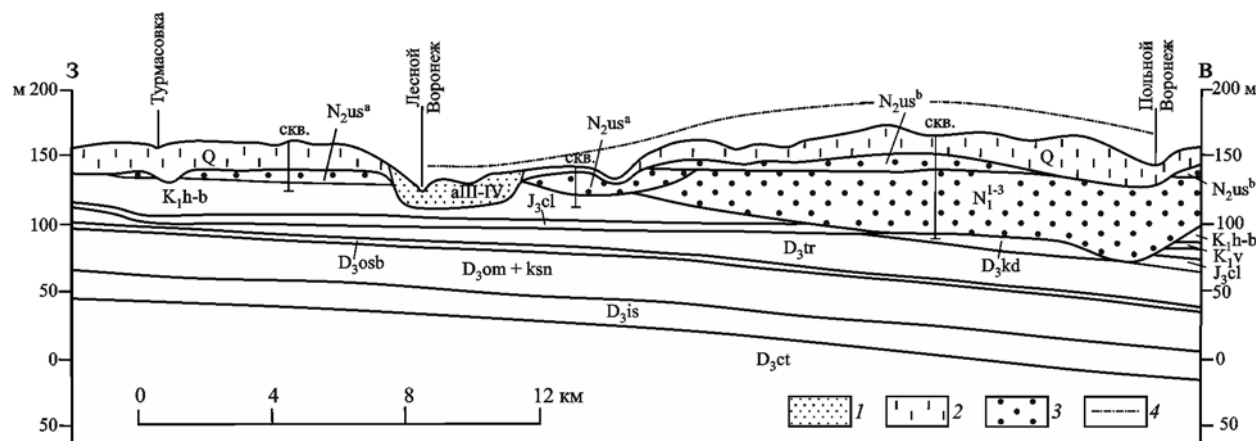


Рис. 5. Новейшее поднятие, сложенное миоценовыми, плиоценовыми и четвертичными отложениями, которое возникло на месте прогиба (центральная часть Окско-Донского прогиба, Тамбовская область): 1 — аллювий позднелепистоцен-голоценовый (aIII-IV); 2 — лёссово-почвенный покровный комплекс (Q); 3 — миоценовые и плиоценовые отложения разных свит; 4 — условная линия поднятия

подстилающим эвапоритам, гипсам, глинам или жесткому докембрийскому основанию. Участие этого процесса предполагается для структур северного склона Токмовского свода, южного склона Воронежского свода и др. При изучении северных областей ВЕП необходимо учитывать дислокации гляциоизотатической природы, специфичные для четвертичной геодинамики территорий, покрывавшихся льдом.

Особыми структурами, разделяющими территории влияния различных источников напряжений или геодинамические системы, являются *геодинамически активные зоны* (ГДАЗ), или зоны структурных несогласий [Юдахин и др., 2003; Макаров и др., 2007]. В них реализуются напряжения сжатия или растяжения, исходящие от разных источников сил и, как правило, сопровождающиеся сдвиговыми напряжениями. Они классифицированы нами [Макеев и др., 2014; Макарова и др. 2015] по рангу, типу, возрасту, морфологии, активности. К ГДАЗ первого (или глобального ранга) относится Клинско-Дмитровско-Ветлужский вал, разделяющий Скандинавскую и Альпийскую системы. ГДАЗ менее крупного ранга — Московско-Рязанский, Нижнеокский, Северско-Донецкий, Сеймский прогибы и др. Эти структуры были известны и ранее, но теперь они получили новое геодинамическое содержание.

Основные новейшие геодинамические системы и разделяющие их геодинамически активные зоны показаны нами на предварительной схематичной и мелкомасштабной карте [Макарова и др., 2016].

Заключение. Таким образом, новейшие тектонические структуры платформы исследованы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бабак В.И., Николаев Н.И. Пояснительная записка к карте геоморфолого-неотектонического районирования Нечерноземной зоны РСФСР. Масштаб 1: 1 500 000. М.: ВИЭМС, 1983. 46 с.

Дедков А.П. О денудационных срезках и древних поверхностях выравнивания в Среднем Поволжье // Экзогенные процессы в Среднем Поволжье. Казань, 1972. С. 3—20.

Иванченко Г.Н. Оценка неотектонической активности Приокского участка Нелидово-Рязанской шовной зоны по геоморфологическим признакам // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС, 2005. С. 126—134.

Карта новейшей тектоники Среднего и Нижнего Поволжья (Пензенская, Куйбышевская, Саратовская, Волгоградская, Астраханская области и Калмыцкая АССР). Масштаб 1: 500 000. Гл. ред. Ф.И. Ковальский; ред. А.В. Востряков. Саратов: Изд-во СГУ, 1981.

Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2004. 340 с.

Корчуганова Н.И., Загубный Д.Г., Соколов С.А. Неотектоническое районирование Русской плиты // Разведка и охрана недр. 2012. № 2. С. 13—20.

Леонов Ю.Г. Напряжения в литосфере и внутриплитная тектоника // Геотектоника. 1995. № 6. С. 3—21.

неравномерно по территории и без учета некоторых перечисленных проблем. Детальное изучение структур с применением современных геофизических, геодезических и геохимических методов, а также бурения проводится лишь на площадках строительства особо важных объектов, в районах разработки месторождений полезных ископаемых. При этом основное внимание уделяется разрывным нарушениям, выраженным главным образом линеamentами, в то время как новейшие структурные формы (поднятия и прогибы) остаются пока малоизученными. Но именно последние дают информацию об условиях их образования и тенденции современного развития. Строение и морфология структурных форм, дополненные данными, полученными тектонофизическими методами, позволяют связать их образование с глобальными и региональными источниками напряжений.

Современные геодинамические условия формирования структур определяют устойчивость территорий строительства инженерных объектов, влияют на состояние образованных в доновейшее время осадочных, в частности соляных и нефтегазовых, месторождений, на развитие различных опасных процессов. Некоторые геодинамически активные зоны могут быть зонами возможных очагов землетрясений (ВОЗ). Поэтому комплексное изучение новейших структур с учетом данных о глубинных процессах и геодинамике позволит районировать территорию Восточно-Европейской платформы на геодинамические системы разного ранга, что может быть использовано в практических целях.

Макаров В.И. Региональные особенности новейшей геодинамики платформенных территорий в связи с оценкой их тектонической активности. // Недра Поволжья и Прикаспия. Спец. вып. № 13. Саратов: Изд-во СГУ, 1996. С. 49—60.

Макаров В.И. Некоторые проблемы изучения новейшей тектоники платформенных территорий (на примере Русской плиты) // Разведка и охрана недр. 1997. № 1. С. 20—26.

Макаров В.И. Четвертичная тектоника и геодинамика платформенных территорий: актуальные проблемы изучения // Бюлл. комиссии по изучению четвертичного периода. 2008. № 68. С. 10—25.

Макаров В.И., Дорожко А.Л., Макарова Н.В., Макеев В.М. Геодинамически активные зоны платформ // Геоэкология. 2007. № 2. С. 99—110.

Макарова Н.В., Макеев В.М., Дорожко А.Л. и др. Геодинамические системы и геодинамически активные зоны в новейшей структуре Восточно-Европейской платформы // Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты: Мат-лы XLVII Тектон. совещ. М.: ГЕОС, 2015. Т. 1.

Макарова Н.В., Макеев В.М., Дорожко А.Л. и др. Новейшие геодинамические системы и геодинамически

активные зоны Восточно-Европейской платформы // Бюлл. МОИП. 2016. Вып. 3. С. 9–26.

Макеев В.М., Макарова Н.В., Дорошко А.Л. и др. Геодинамически активные зоны Восточно-Европейской платформы — принципы выделения и классификации // Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы: Мат-лы. XIX научн.-практ. конф. с международным участием. М.: ГЕОС, 2014. С. 225–229.

Миоцен Окско-Донской равнины. М.: Недра, 1977. 248 с.

Москва: геология и город / Гл. ред. В.И. Осипов, О.П. Медведев. М.: АО Московские учебники и карто-литография, 1997. 400 с.

Новейшая тектоника и геодинамика. Область сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты. М.: Наука, 2006. 206 с.

Трегуб А.И. Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2002. 220 с.

Шукин Ю.К. Глубинная сейсмоструктура Северной Евразии // Недра Поволжья и Прикаспия. Спец. вып. № 13. Саратов: Изд-во СГУ, 1996. С. 6–11.

Юдахин Ф.Н., Шукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 300 с.

Поступила в редакцию
21.03.2017

УДК 551.79

О.В. Зеркаль¹, Р.Р. Габдуллин², Е.Н. Самарин³

ПРОБЛЕМЫ ЧЕТВЕРТИЧНОЙ ГЕОЛОГИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

В изучении четвертичных отложений Крыма выделено два этапа. На первом этапе (конец XIX в.—1960-е гг.) стратиграфическое описание четвертичных толщ опиралось на выделение террасовых комплексов (морских в прибрежной части и синхронных им аллювиальных в континентальной части). На втором этапе в основу описания четвертичных отложений положено их климатостратиграфическое подразделение, при ведущей роли лёссово-почвенной формации. За основу для расчленения четвертичных отложений Крыма принято строение долин Палеоднепра и Палеоднестра. Показано, что в результате нелинейного, реверсивного характера изменения уровня Черного моря, происходившего в четвертичное время, может нарушаться правило: «чем гипсометрически ниже терраса, тем она моложе».

Ключевые слова: четвертичные отложения, лёссово-почвенная формация, аллювиальная терраса, гипсометрическое положение, Крым.

In the study of Quaternary deposits of the Crimea selected two phases. In the first stage (since the late XIX century to the sixties of XX century) stratigraphic description of the Quaternary strata was based on the allocation of terraced complexes (a marine terraces — in the coastal part and synchronous them alluvial ones — in continental part of the Crimean peninsula). In the second stage description of the Quaternary deposits is made on the basis of their climatic and stratigraphic dissection under the leading role of the loess-soil formation structure. The basis for stratigraphic subdivision of Quaternary deposits of the Crimea was the structure of the valleys of the paleo-Dnieper and paleo-Dniester. It is shown that the nonlinear, reversible character of Black sea level changes that took place in the Quaternary can be broken a rule “the lower the hypsometrically level of the terrace is, the younger this terrace is”.

Key words: Quaternary deposits, loess-soil formation, alluvial terrace, hypsometrically level, Crimea.

Введение. Геологическое строение Крымского полуострова изучается более 200 лет. Особое внимание послетретичным, четвертичным образованиям, развитым на территории Крыма, стали уделять во второй половине XIX в.—начале XX в. К середине прошлого столетия был накоплен обширный объем данных, что позволило сделать вывод о том, что строение четвертичных отложений «достаточно хорошо выяснено» [Геология..., 1969]. Вместе с тем развитие теоретических представлений в науках о Земле, методов и средств получения геологической информации, совершенствование методологии геологического анализа, накопление данных о развитии геологических условий в четвертичное время, и новых сведений об особенностях геологического строения Крымского п-ова и прилегающих территорий дают возможность взглянуть на строение и взаимоотношение четвертичных образований в его центральной части с несколько иной точки зрения. Статья посвящена рассмотрению ряда проблемных во-

просов четвертичной геологии центральной части Крымского полуострова, которые накопились на сегодняшний день.

Развитие представлений о четвертичных отложениях Крыма. В изучении верхнеплиоценовых образований и четвертичных отложений на территории Крымского п-ова и прилегающих территорий можно выделить несколько этапов.

На первом этапе исследований послетретичных, четвертичных образований, развитых на территории Крыма, охватывающем временной отрезок с конца XIX в. до 1960-х гг., сформировались общие представления о строении, стратиграфии, генезисе четвертичных толщ в увязке с общими геоморфологическими условиями региона, предопределяемыми неотектонической обстановкой. В этот период значительный вклад в изучение четвертичных толщ Крыма внесли работы К.К. Фохта (1887, 1893), Н.А. Григорович-Березовского (1903), Н.И. Андрусова (1905, 1912, 1926), Б.Ф. Добрынина (1922, 1938), П.А. Двойчен-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, вед. науч. с.; e-mail: igzov@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, доцент; e-mail: mosgorsun@rambler.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, доцент; e-mail: samarinen@mail.ru

ко (1926), Б.А. Федоровича (1929), Б.Л. Личкова (1933, 1935) А.Д. Архангельского и Н.М. Страхова (1938), М.В. Муратова и Н.И. Николаева (1939, 1940), А.И. Дзенс-Литовского (1939) и других⁴. В послевоенный период исследования продолжали М.В. Муратов, Н.И. Николаев, А.И. Дзенс-Литовский. Помимо этого, результаты изучения четвертичных отложений Крыма также приводятся в работах Г.И. Моляко (1945, 1948), С.В. Альбова (1950), А.Ф. Слудского (1953), И.Г. Глухова (1956), Г.И. Горещкого (1955, 1959), В.И. Бабака (1959, 1961), Н.И. Лысенко (1961, 1965) и многих других. Итоговое обобщение результатов изучения четвертичных образований рассматриваемого этапа представлено в 8-м томе Геологии СССР, посвященном рассмотрению геологического строения Крыма, ответственным редактором которого был М.В. Муратов [Геология..., 1969].

Среди основных выводов, сделанных на основании результатов, полученных на первом этапе исследований, можно отметить следующее [Муратов, Николаев, 1939; Муратов, Николаев, 1940; Геология..., 1969; Николаев, 1962; Бабак, 1959]:

1) выработаны представления о том, что четвертичные образования Крыма в прибрежной зоне представлены морскими и озерно-морскими отложениями четырех⁵ различных по возрасту горизонтов: чаудинского, эвксинского (древнеэвксинские и узунларские слои), тирренского (карангатский горизонт и тарханкутские слои) и новозэвксинского древнего Черноморского бассейна, которые слагают террасы, имеющие высоту от 2–4 до 20–30 м, а на остальной территории — континентальными отложениями разных генетических типов (аллювиальные, делювиальные и пролювиальные), также в значительной степени террасированных и связанных с неодинаковыми по высоте и возрасту террасовыми уровнями (таблица). В горной и предгорной частях Крыма достаточно широко распространены оползневые отложения, а также образования, сформировавшиеся в результате осыпей и обвалов;

2) среди континентальных четвертичных отложений Крыма главная роль отводилась аллювиальным образованиям, слагающим поверхности речных террас и пойм, а также делювиально-пролювиальным отложениям, также участвующим в заполнении долин и формировании террас. Всего в Крыму было выделено 6 террасовых поверхностей. Самая низкая из них (первая, или садовая, которую сопоставляли с древнечерноморскими отложениями) имеет высоту 2–3 м. Вторая терраса (красноселовская, В.И. Бабак считал,

что она плохо развита в Крыму) выделяется на уровне от 5–7 м (по М.В. Муратову) до 6–12 м, (по В.И. Бабаку). Третья (судакская), аллювий которой сопоставляли с карангатским горизонтом, а перекрывающие делювиальные суглинки — с тарханкутскими слоями, выделяется на высоте от 10–15 м (по М.В. Муратову) до 18–20 м (по В.И. Бабаку). Четвертая (манджильская) терраса, аллювий которой сопоставляли с древнеэвксинскими слоями, а перекрывающие делювиальные суглинки с узунларскими), установлена на высоте 25–40 м. Пятая (булганакская) терраса сопоставлялась с чаудинским горизонтом — от 60–80 м (по М.В. Муратову) до 100 м (по В.И. Бабаку) (таблица). Наиболее высокий кизилджарский террасовый уровень (сопоставлялся с гурийскими слоями) находится на высоте от 100–150 м (по М.В. Муратову) до 160–200 м (по В.И. Бабаку) и был отнесен к виллафранку;

3) верхний ярус рельефа центральной части Крымского п-ова образуют поверхности, сформировавшиеся в результате морской абразии при тортон-сарматской трансгрессии, современное возвышенное положение которых связывали с эпейрогеническим воздыманием территории (с амплитудой 1000–1200 м), начиная с плиоцена. Наблюдаемый в настоящее время уступ нижнего плато Яйлы рассматривали в качестве древней береговой линии невысокой гряды, по-видимому, продолжавшейся «далеко к югу в область современного Черного моря» [Муратов, Николаев, 1940, с. 69]. В четвертичном периоде на рассматриваемой территории вырабатывается лестница террас, относительная высота которых уменьшается от более древних к молодым.

Начиная с 1970-х—начала 1990-х гг., можно говорить о втором этапе в исследовании четвертичных образований Крыма. Изучению четвертичных толщ Крыма и прилегающих территорий, в том числе на шельфе, примыкающем к полуострову, посвящены работы таких исследователей, как М.Ф. Веклич, Н.П. Герасименко, П.Ф. Гожик, Н.В. Есин, А.В. Иванников, В.Г. Иванов, Ю.И. Иноземцев, А.В. Кожевников, Е.Г. Конилов, А.И. Крохмаль, Е.В. Львова, А.А. Свиточ, В.Н. Семенов, П.В. Федоров, В.Н. Шелкопляс, Е.Ф. Шнюков, Т.А. Янина и многих других.

К особенностям рассматриваемого периода в изучении четвертичных образований, в том числе на территории Крымского п-ова, относится пересмотр принципов расчленения континентальных отложений, истолкования их генезиса и строения в увязке с палеогеографическими и палеоклиматическими данными.

⁴ Здесь и далее не рассматриваются работы, направленные на изучение гравитационных склоновых процессов и отложений, формирующихся в результате их развития.

⁵ В настоящее время с учетом переноса нижней границы четвертичного периода к четвертичным также относятся отложения, сформировавшиеся при гурийской трансгрессии (краснокутские слои по А.Г. Эберзину). Иными словами, в современной трактовке следовало бы говорить, что в прибрежной зоне Крымского полуострова четвертичная толща включает не четыре, а пять горизонтов озерно-морских образований.

Таблица 1

Сопоставление общей стратиграфической шкалы квартера и региональных схем центральной части Крымского полуострова и прилегающего шельфа

Общая стратиграфическая шкала четвертичной системы					Региональные			
Система	надраздел	раздел	звено	ступени	континентальная часть Крыма		черноморская часть Крыма	
					по М.В. Муратову [Геология..., 1969]	по ГСР [Державна, 2008]	по М.В. Муратову [Геология..., 1969]	Динамика уровня моря по П.В. Федорову [2000]
Четвертичная	Голоцен			2	современная пойма	современная почва		нимфейская трансгрессия
				1	образование уступа I н.т.			фанагорийская регрессия (у.м. 5–6 м); новочерноморская трансгрессия, у.м. + 2 м
					накопление аллювия I н.т.	аллювий I н.т.	древнечерноморский горизонт	древнечерноморская трансгрессия, у.м. –(10–20) м
	Плейстоцен		Верхнее	4	образование уступа II н.т.	причерноморский лёсс	новоэвксинский горизонт	новоэвксинская трансгрессия, у.м. –(20–40) м
					накопление аллювия II н.т.	дофиновская ПП, аллювий II н.т.		
				3		бугский лёсс		предновоэвксинская (посткарангатская) регрессия, у.м. –(85–90) м
					судакские суглинки	витачевская ПП, аллювий III н.т.	тарханкутский горизонт	позднекарангатская трансгрессия, у.м. +5–7 м
				2	размыв, образование уступа III н.т.	удайский лёсс		регрессивная стадия
				1	накопление аллювия III н.т.	прилукская ПП, аллювий IV н.т.	карангатский горизонт	карангатская трансгрессия
			Среднее	6	глубокий размыв, образование уступа IV н.т.	тясминский лёсс	предкарангатские, среднеэвксинские слои	постузунарская регрессия, у.м. –(25–30) м
				5		кайдакская ПП, аллювий V н.т.		
				4		днепровский лёсс		
				3		завадовская ПП, аллювий VI н.т.		
				2	манжильские суглинки	тилигульский лёсс	узунларский горизонт	узунларская трансгрессия, до +40–45 м
				1	накопление аллювия IV н.т.	лубенская ПП, аллювий VII н.т.	древнеэвксинский горизонт	древнеэвксинская трансгрессия, у.м. до +60 м
			Нижнее	8	глубокий размыв, образование уступа V н.т.	сульский лёсс	переходные слои между эвксино-узунларским и чаудинским горизонтами	преддревнеэвксинская (венедская) регрессия, у.м. –70 м
				7				
				6				
				5				
				4	делювий «Больших столов» накопление аллювия V н.т.	мартоношская ПП, аллювий VIII н.т.	чаудинский горизонт	позднечаудинская трансгрессия, у.м. –(50–60) м
				3		приазовский лёсс		регрессивная стадия
				2		широкинская ПП, аллювий IX н.т.		раннечаудинская трансгрессия, у.м. –(80–95) м
				1				
	Эоплейстоцен		Верхнее		Выработка эрозионной поверхности VI н.т.	ильичевский лёсс		дочаудинская трансгрессия, у.м. –(120–130) м
			Нижнее		накопление аллювия VI н.т.	крыжановская ПП, аллювий X н.т.	гурийский горизонт	
	Гелазий					березанский лёсс	таманский горизонт	
						береговая ПП, аллювий XI н.т.		
						сиверский лёсс		
						богдановская ПП		

Примечание. ПП — палеопочва, н.т. — надпойменная терраса, у.м. — уровень моря.

ческими условиями. В основу вновь разработанных принципов было положено климатостратиграфическое подразделение геологических образований, которое базируется на представлениях о цикличности климата (чередовании теплых и холодных эпох) в позднечетвертичное время. Ведущая роль в формировании континентальных отложений Крыма при этом была отведена образованиям лёссово-почвенной формации, плащеобразно перекрывающим более древние поверхности, разработанные в разновозрастных более древних отложениях. В составе развитых в речных долинах террасированных аллювиально-пролювиальных образований, в соответствии с представлениями о сопоставимости длительности климатического ритма и эрозионного цикла, галечные толщи коррелируются с палеопочвенными горизонтами (более теплые и гумидные условия), а перекрывающие суглинки — с лёссами (более холодные и более аридные условия). В качестве основы для расчленения аллювиальных образований в составе четвертичных отложений Крыма было взято строение долин Палеоднепра и Палеоднестра. Для рассматриваемого периода также характерен значительный объем работ в акватории Черного моря, результаты которых позволили получить представления о строении шельфовой зоны, примыкающей к Крымскому п-ову, изучить стратиграфию и соотношение, слагающих ее четвертичных отложений.

Отметим, что в рассматриваемый этап геологического изучения Крымского п-ова и прилегающих территорий были пересмотрены представления о преобладании вертикально-разломно-блоковой тектоники в геологической истории региона. Так, Ю.В. Казанцев, М.Е. Герасимов, И.В. Попадюк, В.С. Милеев с соавторами, В.В. Юдин и другие показывают, что геологическому строению Крымского полуострова более присуще развитие чешуйчатых, надвиговых структур, тектонических покровов с амплитудой перемещения до 10–12 км [Юдин, Юдин, 2015]. Кроме того, новые полученные данные о геологическом строении акватории Черного моря свидетельствуют об отсутствии крупных фрагментов суши, погруженных под уровень моря южнее Крымского п-ова. Это вновь ставит вопрос об условиях формирования верхнего яруса современного рельефа центральной части Крымского п-ова.

Основные достижения второго этапа исследований четвертичных образований Крыма отражены при геолого-съёмочных работах, составлении комплектов среднемасштабных геологических карт этой территории Крымского полуострова, выполнявшихся в первое десятилетие XXI в. Среди основных выводов, сделанных на основании результатов, полученных на втором этапе, следующие [Державна..., 2008]:

1) обоснованы представления о том, что континентальные четвертичные отложения в центральной части Крыма плащеобразно перекрывают поверхность Равнинного Крыма, фрагментарно развиты в предгорьях, а в Горном Крыму представлены преимущественно гравитационными и пролювиальными образованиями;

2) исходя из принятых предпосылок (по аналогии с особенностями строения долин Палеоднепра и Палеоднестра) в пределах центральной части Крымского п-ова в четвертичной толще первоначально было предложено вычленять до 6–7 климатических циклов, а в дальнейшем до 11 климатических циклов и, соответственно, выделять в рельефе до 11 надпойменных аллювиальных террас [Антропогенные..., 1986; Веклич, 1993; Крохмаль и др., 2011]. При составлении Государственной геологической службой Украины среднемасштабных геологических карт четвертичных отложений центральной части Крыма было принято следующее расчленение лёссово-почвенной толщи [Державна..., 2008]:

— верхнечетвертичные-голоценовые отложения — причерноморский лёсс, в верхней части которого развит современный почвенный горизонт;

— верхнечетвертичные отложения — бугский лёссовый горизонт с дофинской палеопочвой (сопоставляется с аллювием II надпойменной террасы) и иудайский лёссовый горизонт с витачевской палеопочвой (сопоставляется с аллювием III надпойменной террасы);

— средне-верхнечетвертичные отложения — тясминский лёссовый горизонт с прилукской палеопочвой (сопоставляется с аллювием IV надпойменной террасы);

— среднечетвертичные отложения — днепровский лёссовый горизонт с кайдакской палеопочвой (сопоставляется с аллювием V (хаджибей-черкасской, или новопавловской, по [Державна, 2008]) надпойменной террасы) и тилигульский лёссовый горизонт — с завадовской палеопочвой;

— нижне-среднечетвертичный отложения — сульский лёссовый горизонт с лубенской палеопочвой (сопоставляется с аллювием VII (донецко-крученицкой или нововасильевской, по [Державна..., 2008]) надпойменной террасы);

— нижнечетвертичные отложения — приазовский лёссовый горизонт с мартоношской палеопочвой (сопоставляется с аллювием VIII (будако-донецкой, по [Державна..., 2008]) надпойменной террасы);

— нижнечетвертично-эоценовые и эоценовые отложения — ильичевский лёссовый горизонт с ширококинской палеопочвой и березанский лёссовый горизонт с крыжановской палеопочвой (сопоставляются с аллювием IX и X (николаевской и крикуновской, по А.В. Кожевни-

кову [Кожевников, 1989], надпойменных террас)⁶, в качестве которых рассматриваются водораздельные пространства между современными долинами рек Салгир—Зуя—Бурульча—Индол;

3) последняя дочетвертичная трансгрессия, выходящая далеко за пределы современной береговой линии Черного моря, была раннепонтийская (новороссийская). В последовавшую эпоху низкого стояния уровня моря происходило формирование основных палеодолин рек региона, завершившееся в гурийское время. В четвертичное время максимальной и наиболее продолжительной была древнеэвксинская трансгрессия [Гожик, Шелкопляс, 2003]. Период развития древнеэвксинской трансгрессии сопоставляется с эпохой лихвинского межледникового в центральной части Восточно-Европейской платформы;

4) в пределах шельфа, примыкающего к Горному Крыму, выявлено несколько абразионно-денудационных уровней, датируемых попалеонтологическим находками в пределах сопряженных аккумулятивных (береговых) валов — доучадинского (гурийского (?)), расположенного на глубине 120–130 м, раннечаудинского и позднечаудинского — 80–95 и 50–60 м соответственно, преддревнеэвксинского (венедская регрессивная фаза) — 70 м, предкарангатского (постузнларская регрессивная фаза) — на глубине 30–35 м⁷, предновоэвксинского (посткарангатская регрессивная фаза) — от 85–90 м до 100 м и поздненовоэвксинского — от 20–25 м до 30 м (таблица) [Федоров, 1982, 2000; Гожик, 2003; Янина, 2013].

Вместе с тем дальнейшее накопление данных о развитии геологических условий в четвертичное время, новых сведений об особенностях геологического строения Крымского п-ова и прилегающих территорий дают возможность обозначить ряд нерешенных до настоящего времени вопросов и проблем в познании строения, стратиграфии и генезиса четвертичных толщ в центральной части Крымского п-ова на современном этапе.

Проблемы современного этапа изучения четвертичных отложений в центральной части Крымского полуострова. Одна из важнейших современных проблем в изучении строения и соотношения разнотектонических четвертичных образований Крыма заключается в четком сопоставлении континентальных и морских отложений, их взаимоувязке. Как видно из описанных выше достижений в изучении континентальных и морских четвертичных отложений Крыма и прилегающих территорий, в том числе на примыкающем к полуострову шель-

фе, исследования на суше и на шельфе в последние десятилетия проводилось в значительной мере параллельно, что привело к ряду парадоксальных, а в ряде случаев — плохо коррелирующих между собой результатов. Например, представления о том, что в долинах рек выражено 11 надпойменных террас (синхронных периодам палеопочвообразования), сформированных в четвертичное время в результате палеоклиматической цикличности, без привлечения дополнительных сведений плохо согласуются с данными о нелинейном, реверсивном характере изменения уровня Черного моря, которое также в существенной мере подвержено влиянию палеоклиматической цикличности. При этом за четвертичное время (в современном объеме) колебания уровня моря происходили с существенной амплитудой — от 150–160 до 170–180 м.

Рассмотрим в качестве примера общую⁸ изменчивость уровня Черного моря и ее влияние на осадконакопление в континентальной части в интервале между позднечаудинской и новоэвксинской трансгрессиями. В период позднечаудинской трансгрессии уровень моря установился на абсолютных отметках –50 м, о чем свидетельствует положение верхнечаудинских отложений в средней части шельфа Болгарии и северо-западной части Черного моря [Гожик, Шелкопляс, 2003]. В соответствии с климатостратиграфическим подходом, в этот временной отрезок в континентальной части происходило накопление аллювия VII надпойменной террасы, а в пределах водораздельных пространств — мартоношской палеопочвы. При последовавшей преддревнеэвксинской (венедской) регрессивной фазе уровень моря незначительно понижался (до отметок –70 м, [там же]), что сопровождалось определенным эрозионным врезом, т.е. были условия, полностью соответствующие правилу «чем гипсометрически выше расположена в долине терраса, тем она и ее аллювий древнее». В дальнейшем регрессивная фаза сменилась периодом древнеэвксинской многоимпульсной (выделено до четырех этапов) трансгрессии, с которой на Кавказском побережье П.В. Федоров сопоставляет серию сложнопостроенных уровней морских террас на современных отметках 50–60 и 35–43 м (с двумя сближенными уровнями каждая) [Федоров, 2000].

В континентальной части в этот временной отрезок должно было происходить накопление аллювия VI и V надпойменных террас, а на водоразделах — формирование горизонтов лубенской и завадовской палеопочв, разделенных тилигульским

⁶ В настоящее время с учетом переноса нижней границы четвертичного периода к четвертичным (гелазий) образованиям также относятся отложения сиверского лёссового горизонта с береговой палеопочвой (сопоставляется с аллювием XI надпойменной террасы) [Державна..., 2008]. Стратиграфическое положение кизилярского лёссового горизонта с богдановской палеопочвой следует рассматривать как верхнеплиоценовое.

⁷ При этом в пределах территорий, занимавших области современного шельфа в северо-западной части моря, была развита прибрежно-морская аккумулятивная равнина, на поверхности которой произошло накопление мощной толщи лёссов.

⁸ Без детального анализа внутрискладчатой вариации изменения уровня Черного моря в периоды отдельных регрессивных и трансгрессивных фаз.

лѣссовым горизонтом. Очевидно, что высокое стояние базиса эрозии должно было сопровождаться накоплением мощных толщ аллювиальных образований, перекрывающих (в равнинной части полностью и занимая обширные пространства) ранее существовавшие эрозионные врезы, включая надпойменные террасы.

Вместе с тем при геолого-съёмочных работах в центральной части Крыма в долине р. Салгир был описан аллювий VII надпойменной (донецко-крученицкой или нововасильевской, по [Державна..., 2008]) террасы, возвышающейся над современным урезом реки на 70–75 м на северном склоне Главной гряды и на 20 м в степной части Крыма [там же]. При этом для описанного гипсометрического положения аллювиальных толщ в соответствии с достаточно низким стоянием палеоуровня моря в синхронный временной отрезок следует предположить не менее чем 120-метровое воздымание в пределах Главной гряды Крымских гор и воздымание с амплитудой до 70 м в пределах Степного Крыма, имевших место только⁹ в средненеоплейстоценовое время. Одновременно в центральной части Крыма не встречены (!) аллювиальные образования VI надпойменной террасы, которые должны были бы накапливаться синхронно с максимальной четвертичной трансгрессией и перекрывать отложения, тяготеющие к более низким уровням. Кроме того, при геолого-съёмочных работах выявлено, что аллювиальные образования V (хаджибейско-черкасской, по [Державна..., 2008]) надпойменной террасы на рассматриваемой территории развиты достаточно широко и возвышаются над современным урезом рек до 60 м на северном склоне Главной гряды, на 40–50 м в предгорной части и на 10–20 м в степной части Крыма [Державна, 2008], что полностью соответствует правилу «чем гипсометрически выше терраса, тем она и ее аллювий древнее», но при этом игнорирована разнонаправленность в развитии эрозионных и аккумулятивных процессов, имевших место в черноморском регионе.

Продолжая рассмотрение геологической истории развития центральной части Крыма, отметим, что древнеэвксинская трансгрессия сменилась предкарангатской (постузунарской) регрессивной фазой относительно низкого стояния уровня моря (с отметками на 30–35 м ниже современного уровня моря, по [Гожик, Шелкопляс, 2003]), за ней последовала карангатская трансгрессия (многие исследователи рассматривают ее как двухфазную), при которой уровень моря превышал современные отметки на 10–12 и 20–25 м, она сопровождалась образованием в прибрежной зоне судакской морской террасы (ее увязывают с поздней фазой карангатской трансгрессии). При

геолого-съёмочных работах в центральной части Крыма было указано на преимущественно погребенный (кроме прибрежных территорий) характер аллювия IV надпойменной террасы, синхронной, по-видимому, с ранней фазой карангатской трансгрессии [Державна..., 2008].

Как уже отмечалось, к временному отрезку предкарангатской (постузунарской) и внутри-карангатской регрессивных фаз, синхронных стадиям московской эпохи оледенения, относится накопление мощных толщ лѣссов (днепровский и тясминский лѣссовые горизонты, разделенные кайдакской палеопочвой, по [Державна..., 2008]), в том числе вскрытых бурением на шельфе Черного моря [Гожик, Шелкопляс, 2003]. Иными словами, на современном этапе эти отложения, расположенные ниже современного базиса эрозии, в континентальной части должны быть повсеместно перекрыты на водораздельных пространствах более поздними горизонтами лѣссово-почвенной толщи, а в долинах рек — аллювиально-пролювиальными образованиями, формировавшимися при уровнях базиса эрозии, близких к современному или более высоким, например, осадками, накапливавшимися при высоком стоянии уровня моря в позднекарангатское время.

Действительно, в левом борту долины р. Карасевка, в районе д. Вишенное, можно наблюдать, что цоколем для аллювия III надпойменной террасы (связанной с поздней фазой карангатской трансгрессии), возвышающейся над современным урезом реки на 12 м, по [Гожик, Шелкопляс, 2003] — на 15 м, выступает толща лѣссов, что фактически подтверждает сделанное нами предположение. Как следствие в связи с отмеченной разнонаправленностью морфологического развития долин для рассматриваемого этапа геологической истории вновь нарушается правило «чем гипсометрически ниже терраса, тем она моложе», так как аллювий III надпойменной террасы фактически лежит гипсометрически выше аллювиальных образований IV надпойменной террасы.

Для следующего этапа геологического развития Черноморского бассейна, охватывающего время посткарангатской (предновоэвксинской) регрессивной фазы, вновь характерно резкое понижение уровня моря до отметок от 85–90 м (по П.Ф. Гожик) до 150 м (по Т.А. Яниной) ниже современного уровня моря [Гожик, Шелкопляс, 2003; Янина, 2013]. В дальнейшем регрессивная фаза сменилась периодом новоэвксинской трансгрессии, для которой все же характерно установление уровня моря на 20–25 м ниже современного [там же]. Следует полагать, что «низкое» стояние базиса эрозии должно сопровождаться резким увеличением темпа эрозионного вреза, формировани-

⁹ Так как более поздние террасовые уровни исходя из приведенных описаний не имеют существенных высотных различий относительно базисов эрозии.

ем переуглубленных долин, а также активизацией денудационных процессов.

С одной стороны, действительно, при геологосъемочных работах в центральной части Крыма отмечено широкое развитие делювиальных верхнечетвертичных образований [Державна..., 2008]. С другой стороны, верхнечетвертичные аллювиальные отложения, заполняющие переуглубленные эрозионные впадины, днища которых тяготеют к базису эрозии, который находился существенно ниже современного (на 90–150 м), в континентальной части должны быть повсеместно перекрыты более поздними аллювиально-пролювиальными образованиями, формировавшимися при уровнях базиса эрозии, близких к современному. Этот вывод хорошо согласуется с данными М.В. Муратова, Н.И. Николаева и других, ранее указывавших на плохую сохранность аллювия II надпойменной террасы [Геология..., 1969; Николаев, 1962]. Однако при геологосъемочных работах, выполненных в начале этого столетия, описано широкое распространение аллювиальных отложений II надпойменной террасы в центральной части Крыма [Державна..., 2008].

Указанные несоответствия и несогласованность в интерпретации геологической информации дают основания с осторожностью подходить к современным представлениям о строении и стратиграфии четвертичных толщ в центральной части Крымского п-ова. Это заставляет поставить вопрос о необходимости дополнительного анализа и взаимоувязки накопленных данных, возможно, с принятием в качестве основы для стратиграфического деления четвертичных отложений Крыма иных регионов, а не долин Палеоднепра и Палеоднестра.

Заключение. Изучение четвертичных образований на территории Крымского п-ова проводится уже около 150 лет. Вместе с тем, несмотря на то что начиная с 1970-х гг. в основу стратиграфической схемы четвертичных толщ положено климатостратиграфическое подразделение, до настоящего времени в Крыму не описан ни один достаточно полный разрез лёссово-почвенной формации, которой отводится ведущая роль в формировании позднечетвертичных континентальных отложений. Имеющаяся стратиграфическая схема четвертичных отложений для центральной части Крыма, по существу, составлена в виде сводных разрезов из описания отдельных фрагментов, ко-

торые, в определенной мере искусственно, увязаны с геологической историей долин Палеоднепра и Палеоднестра, развивавшихся в несколько иных палеогеографических условиях. При этом остается дискуссионным взаимоотношение некоторых горизонтов полигенетических лёссово-почвенных толщ с аллювиальными террасами, на развитие которых значительно влияли колебания уровня Черноморского бассейна, существенно подверженного палеоклиматическими ритмам.

Использование же классического правила, согласно которому «чем гипсометрически ниже терраса, тем она моложе», также ограничено нелинейным, реверсивным характером изменения уровня в Черноморском бассейне в четвертичное время.

Сложность прослеживания лестницы террас, увязка аллювиальных отложений с горизонтами лёссово-почвенных толщ, трассирования террасовых уровней в центральной части Крыма, с одной стороны, связана с тем, что в горной части Крыма в связи с несколькими циклами пиковой эрозии, обусловленными «низким» стоянием базиса эрозии (уровней морского бассейна), современные речные долины имеют ярко выраженный V-образный профиль (в отдельных случаях это каньоны), с полностью срезанными более древними террасовыми уровнями. С другой стороны, в степной части Крыма часть террас (включая некоторые лёссовые горизонты) находится в погребенном состоянии, также скрытом от прямых наблюдений. Еще одно немаловажное обстоятельство, затрудняющее применение классических методов, используемых при изучении соотношения аллювиальных отложений, — произошедшая перестройка (возможно, неоднократная) речной сети с субширотной, обусловленной структурно определенными межгорными понижениями, на субмеридианальную, формировавшуюся под влиянием эрозионных процессов на фоне тектонических движений и сопровождавшуюся перехватами речных долин, что в ряде случаев существенно усложняет интерпретацию наблюдаемой ситуации.

Подводя итог представленному материалу, необходимо отметить, что история развития центральной части Крымского п-ова в четвертичное время, несмотря на обширные накопленные сведения, содержит еще достаточно проблем, требующих разрешения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антропогенные отложения Украины. Киев: Наукова думка, 1986. 152 с.

Бабак В.И. Очерк неотектоники Крыма // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1959. Т. 34, вып. 4. С. 51–65.

Веклич М.Ф., Сиренко Н.А., Матвишина Ж.Н. и др. Стратиграфическая схема четвертичных отложений Украины // Стратиграфические схемы фанерозоя и докембрия Украины. Киев: Госком. геологии Украины, 1993. 40 с.

Геология СССР. Т. VIII. Крым. Ч. I. Геологическое описание / Под ред. М.В. Муратова. М.: Недра, 1969. 576 с.

Гожик П.Ф., Шелкопляс В.Н. Рельеф шельфа Горного Крыма и Керченского полуострова // Геол. журн. 2003. № 1. С. 28–33.

Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000, аркуші L-36-XXIX (Сімферополь), L-36-XXXV

(Ялта). Крымська серія. Київ: Державна геологічна служба, 2008. 147 с.

Иноземцев Ю.И., Ступина Л.В., Тюленева Н.В. и др. Палеогеография северо-западного шельфа Черного моря в голоцене // Вісник ОНУ. Сер. Географічні та геологічні науки. 2014. Т. 19, вип. 1. С. 43–53.

Кожевников А.В. Антропоген орогенных областей Центральной Евразии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 234 с.

Крохмаль А.И., Шелкоплас В.Н., Комар М.С. и др. Комплексное обоснование объема и границ стратиграфических подразделений плейстоцена Украины // Геол. журн. 2011. № 3. С. 7–25.

Муратов М.В., Николаев Н.И. Террасы Горного Крыма // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1939. Т. 17, вып. 2–3. С. 3–16.

Муратов М.В., Николаев Н.И. Четвертичная история и развитие рельефа Горного Крыма // Уч. зап. МГУ. 1940. Вып. 48. С. 65–73.

Николаев Н.И. Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР (вопросы региональной и теоретической неотектоники). М.: Госгеолтехиздат, 1962. 392 с.

Федоров П.В. Некоторые дискуссионные вопросы плейстоценовой истории Черного моря // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1982. Т. 57, вып. 1. С. 108–117.

Федоров П.В. Отражение климатических событий плейстоцена в геологической истории Черного моря // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2000. Т. 8. № 5. С. 74–81.

Юдин В.В., Юдин С.В. Становление мобилизма в Крыму // Геология. Изв. Отд. наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2015. № 21. С. 16–22.

Янина Т.А. Эволюция природной среды Понто-Каспия в условиях глобальных изменений климата в позднем плейстоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 1. С. 3–16.

Поступила в редакцию
01.03.2017

УДК 551.21 (234.86)

М.Ю. Промыслова¹, Л.И. Демина², А.И. Гуцин³, Н.В. Короновский⁴**ТИПЫ БРЕКЧИЙ ОФИОЛИТОВОЙ АССОЦИАЦИИ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПАЛЕОГЕОДИНАМИКИ РЕГИОНА**

Описаны типы брекчий, в том числе впервые офиокальцитовые, в восточной части района мыса Фиолент, образование которых связано с формированием офиолитовой ассоциации. Показано, что формирование офиолитовой ассоциации района происходило в зоне пересечения рифтовой долины и трансформного разлома.

Ключевые слова: брекчии, офиокальциты, подушечные лавы, комплекс параллельных даек, геодинамические условия, Юго-Западный Крым.

The article describes the types of breccias of the eastern part of Cape Fiolent region, including for the first time verd antique (ophicalcite), which formation is associated with the ophiolites. It is shown that the formation of the ophiolite association of that area occurred in the intersection zone of the rift valley and transform fault.

Key words: breccias, ophicalcite, pillow lavas, complex of parallel dikes, geodynamic conditions, Southwestern Crimea.

Введение. В офиолитовых ассоциациях складчатых областей очень широко распространены брекчии, включающие разнообразные обломки пород ассоциации. Их образование связывают с перерывами в формировании офиолитов, когда в условиях сильнорасчлененного рельефа морского дна размываются верхние части разреза вплоть до серпентинитов [Абакумова и др., 1994]. Особое значение имеют так называемые офиокальциты, представляющие собой брекчии серпентинитов и серпентинизированных ультрабазитов, сцементированные карбонатным материалом.

Помимо ультрабазитов в обломках могут присутствовать подушечные лавы, породы даек и кремнистые образования [Зоненшайн, Кузьмин, 1993; Книппер, 1978]. Подобные брекчии известны в офиолитах Кипра, Лигурии, Малого Кавказа, Южного Тянь-Шаня, хр. Гуйран-Сайхан в Южной Монголии и в других областях. Во время полевых исследований в 2015 г. в береговых обрывах восточной части выходов офиолитов района мыса Фиолент, расположенного на южном окончании Гераклейского п-ова Юго-Западного Крыма, нами встречены офиокальциты [Промыслова и др., 2016], а также изучены другие типы брекчий.

В районе мыса Фиолент установлены все члены полного разреза офиолитовой ассоциации, включающей серпентинизированные ультрабазиты и серпентиниты, расслоенный базит-ультрабазитовый комплекс, габбро и габбро-долериты, фрагменты комплекса параллельных даек, подушечные лавы,

кремнистые черные слоистые образования и яшмы [Демина и др., 2015; Промыслова и др., 2016]. Нарастивание разреза офиолитовой ассоциации происходит в направлении с северо-запада на юго-восток. Детальное изучение химического состава, включая распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) и широкого спектра других микроэлементов, ультрабазитов, подушечных лав и долеритов из офиолитов в рассматриваемом районе, указывает на их надсубдукционную природу и принадлежность к задуговому бассейну, достигшему в развитии стадии спрединга [Промыслова и др., 2014; 2016].

Брекчии в восточной части района мыса Фиолент. На восточном участке Фиолента от Мраморной бухты до мыса Айя-Бурун (рис. 1) обнажаются две толщи подушечных лав, различающихся составом и текстурно-структурными особенностями, а также фрагменты комплекса параллельных даек и брекчии, среди которых встречаются офиокальциты. Нижняя толща лав сложена миндалекаменными базальтами с ярко выраженным зональным строением подушек, так что при выветривании лавы приобретают скорлуповидную отдельность. Количество миндалин, выполненных карбонатами, заметно возрастает от центральных частей подушек к краевым. Межподушечное пространство сложено обломками лав и яшмами зеленого цвета. Лавы прорваны серией параллельных даек, среди которых наблюдаются разности с клиновидным окончанием и характерными контактами, грани-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, ассистент, канд. геол.-минерал. н.; e-mail: mary.promyslova@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, вед. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; e-mail: lidem06@rambler.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, канд. геол.-минерал. н.; e-mail: alexmsu-824@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, зав. кафедрой, профессор, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: koronovsky@dynamo.geol.msu.ru

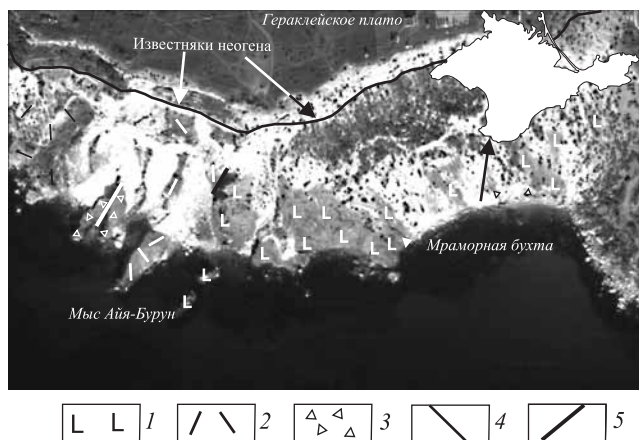


Рис. 1. Схема геологического строения восточной части района мыса Фиолент: 1 — подушечные лавы, дайки; 2 — риолиты, дациты; 3 — брекчии; 4 — граница известняков сарматского яруса; 5 — разрывные нарушения. Белое — осыпи известняков

цы которых повторяют подушечное строение лав. Это свидетельствует о том, что дайки внедрялись в незатвердевшие полностью лавы и представляют верхнюю часть комплекса.

В клифах западной части Мраморной бухты обнажаются глыбовые брекчии, состоящие из крупных (до 0,8–1 м) обломков долерито-базальтов параллельных даек. В цементе (помимо пород даек) присутствуют серпентинизированные породы и карбонатный материал. О первично обломочном характере толщи свидетельствует то, что в ней наблюдаются тонкие (до нескольких сантиметров) и протяженные относительно слабонарушенные прослои карбоната (рис. 2), а также соседствующие с брекчиями фрагменты параллельных даек с сохранившимися первичными взаимоотношениями со скринами.

Офиокальциты расположены на западе от обнажений глыбовых брекчий. Их восточный контакт скрыт под осыпями неогеновых известняков.

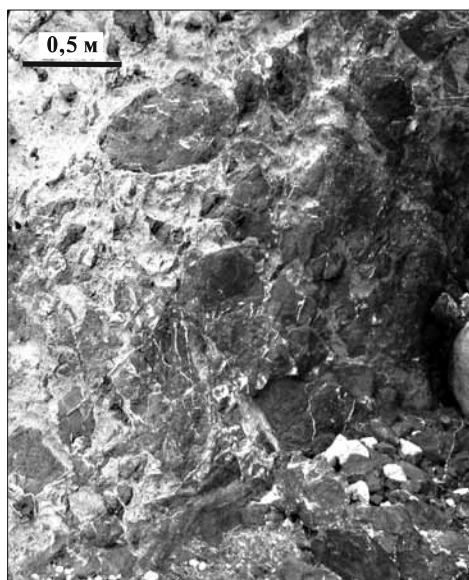


Рис. 3. Фото офиокальцитов



Рис. 2. Фото глыбовых брекчий долерито-базальтов комплекса параллельных даек. В правой части белое — прослой карбоната

В них присутствуют как остроугольные, так и в разной степени окатанные обломки разнообразных пород (серпентинитов, серпентинизированных ультрабазитов, даек, основных лав), размер некоторых из них достигает 0,5–0,8 м (рис. 3). Обломки сцементированы карбонатным материалом с небольшой долей (до 3%) силикатного компонента. Офиокальциты перекрыты верхней толщей подушечных лав (рис. 4), пропитанных карбонатным материалом, который концентрируется как в межподушечном пространстве, так и в радиальных расщепляющих подушки трещинах, утолщающихся от их центров к краям (рис. 5). Отдельные потоки лав разделены прослоями брекчий, также сцементированных карбонатным материалом (рис. 6). Присутствие значительного количества цементирующего карбонатного материала свидетельствует о том, что извержения основной лавы происходили на такой глубине морского дна, которая находилась выше или на уровне зоны карбонатной компенсации. Отметим, что западнее (мыс Львенок) в цементе брекчий, содержащих аподунитовые петельчатые серпентиниты, первичные карбонаты отсутствуют [Демина и др., 2015].

На западе от мыса Айя-Бурун обнажаются две толщи брекчий, различающихся размерами

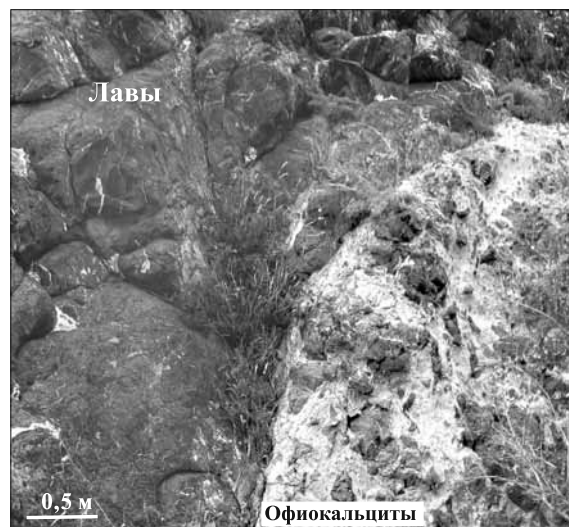


Рис. 4. Фото контакта офиокальцитов и подушечных лав

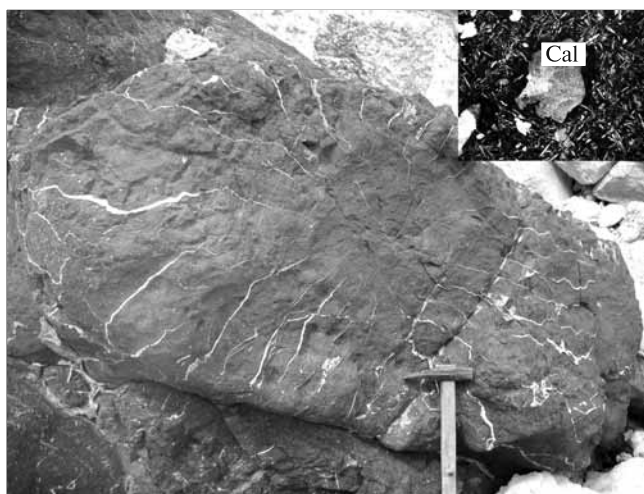


Рис. 5. Фото радиальных трещинок в подушечных лавах, заполненных кальцитом. На врезке — микрофотография лав, Cal — кальцит

обломков и их составом. Контакты этих толщ с окружающими породами полностью засыпаны продуктами разрушения неогеновых известняков. Первая состоит из крупноглыбовых брекчий (рис. 7, А), в которых размеры глыб составляют несколько десятков сантиметров, иногда достигают

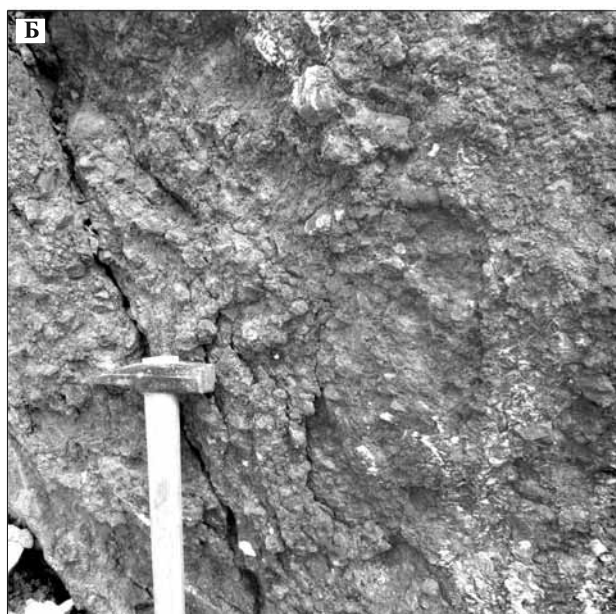


Рис. 7. Фото двух толщ брекчий на западе от мыса Айя-Бурун: А — глыбовая брекчия, Б — более тонкая брекчия



Рис. 6. Фото прослая брекчий в подушечных лавах

1 м и более. В обломках присутствуют преимущественно основные лавы, иногда их отдельные подушки. Крупные обломки погружены в мелкообломочную массу алевроитовой и пелитовой размерности с глинисто-кремнистым цементом, при этом карбонатный материал в цементе практически отсутствует. Грубообломочные брекции перекрывают подушечные лавы, что хорошо видно в юго-западном клифе небольшого мыса. Можно предположить также, что лавы слагают крупный кластолит, захороненный в брекциях. Подобный кластолит, состоящий из линзовидной формы метаморфизованных зеленых (предположительно ультраосновных) пород, наблюдается в подушечных лавах береговых обрывов небольшой бухточки, расположенной на западе от бухты Мраморная (рис. 8).

Вторая толща брекчий отделена от первой разрывом и заметно отличается размерами (от долей миллиметра до 10 см) обломков (рис. 7, Б), имеет пестрый состав — в обломках присутствуют как основные лавы, так и кислые, а также осадочные кремнистые породы, хлоритовые сланцы, ультрабазиты и др. Количество цемента в ней существенно выше, он имеет глинисто-кремнистый

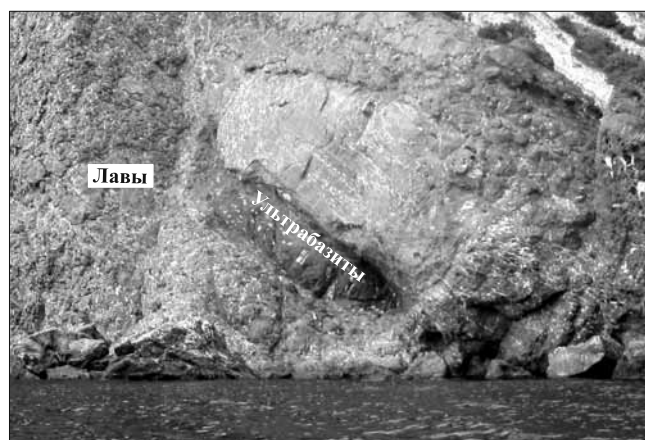


Рис. 8. Фото линзы ультраосновных (?) пород в подушечных лавах

состав. Толща пронизана многочисленными прожилками халцедона с цеолитами. Отсутствие карбонатного цемента позволяет предположить, что они формировались на глубине ниже уровня карбонатной компенсации. Эти толщи брекчий требуют дальнейшего более детального изучения.

Геодинамические условия формирования брекчий. Широкое развитие глыбовых брекчий — признак аномальных склонов рифтовых долин медленноспрединговых хребтов, которые возникают при пересечении их трансформными разломами [Зоненшайн, Кузьмин, 1993]. В этом случае происходит резкое поднятие внутреннего угла долины, разрушение слагающих его пород, образование у подножия поднятия глыбовых осыпей, которые при цементации превращаются в брекчий. Впоследствии осыпи заливаются новыми порциями лавы. Именно такие взаимоотношения брекчий и

лав наблюдаются в восточной части района мыса Фиолент. Подобные брекчий часто ошибочно относят либо к взрывным вулканогенным породам (туфам), либо к брекчиям и конгломератам, связанным с началом нового тектонического этапа. Именно в качестве туфов были закартированы брекчий геологами-производственниками в этом районе. Наличие «туфов» служило веским аргументом в пользу отнесения магматизма к островодужному типу.

Похожие взаимоотношения ультрабазитов, дайкового комплекса и подушечных лав описаны в офиолитовом массиве Тродос на Кипре, для которого также предполагается связь их формирования с трансформным разломом [Мурс и др., 1973].

Горные породы в области внутреннего угла, расположенного на пересечении рифтовой долины и активного участка трансформного разлома,

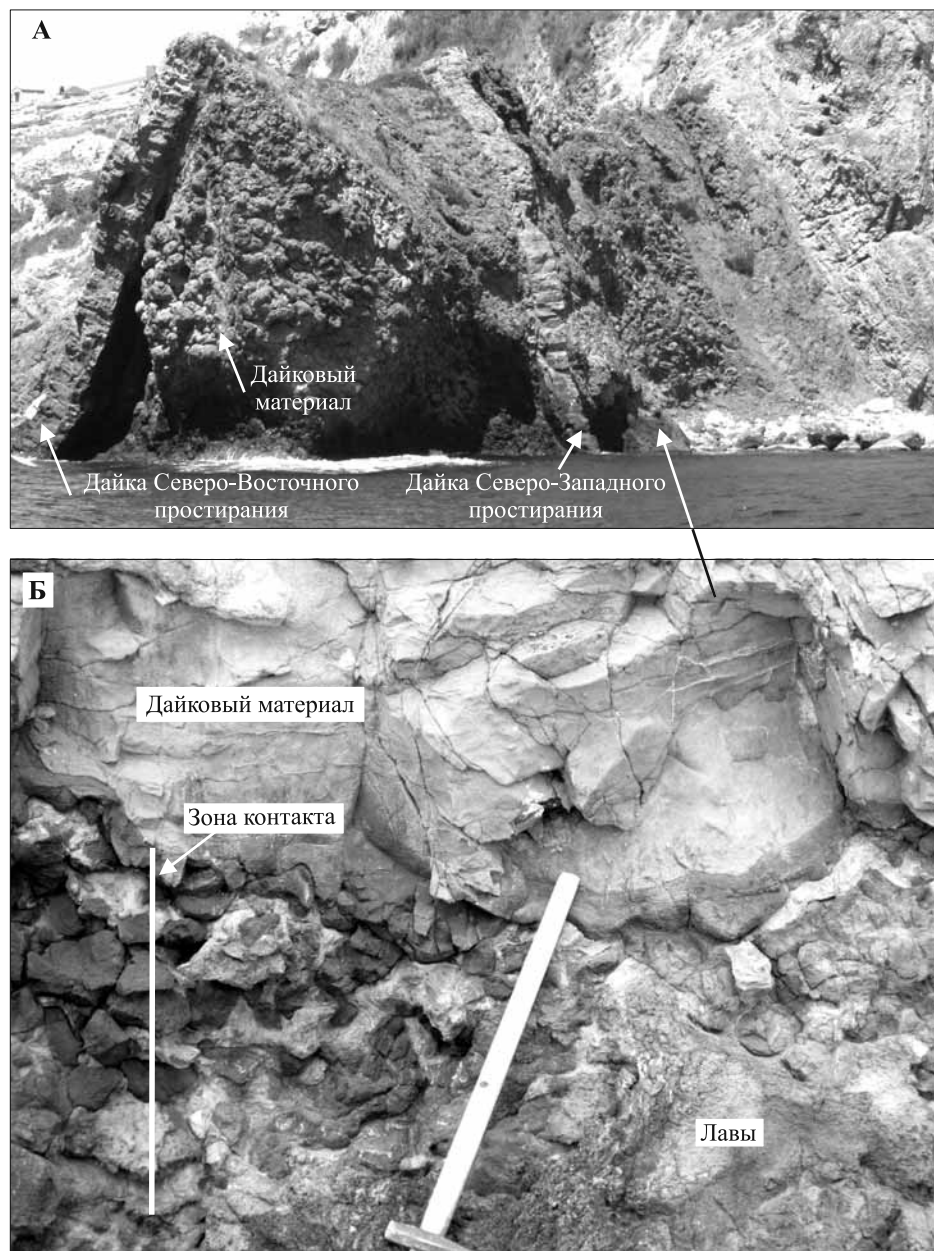


Рис. 9. Взаимоотношение даек (А) и проникновение дайкового материала в лавы (Б), мыс Броневой

испытывают разнонаправленное растяжение, что выражается перпендикулярным или косым (под углом 45°) расположением сбросов [Зоненшайн, Кузьмин, 1993]. Свидетельство существования таких условий в районе — взаимоотношение более поздних, чем параллельные, даек мыса Броневой (Кашалот), расположенного между мысами Лермонтова и Виноградным. Здесь в подушечных лавах наблюдаются две перпендикулярные дайки оливин-пироксеновых долеритов с порфировидной структурой, одна из которых падает на запад-северо-запад под углом 70° и экранирует субвертикальную дайку северо-западного простирания (рис. 9, А), так что в плане наблюдается их Т-образное сочленение. На контактах шириной от 20 до 80 см лавы брекчированы и обожжены, ожелезнены и пропитаны дайковым материалом, что наблюдается и в толще лав вне контактов с дайками (рис. 9, Б).

Лавы и дайки мыса Броневой в свою очередь срезаются сдвиговой зоной северо-западного простирания (рис. 10) с многочисленными зеркалами скольжения и интенсивной хлоритизацией. Вдоль зоны сдвига внедрилась более поздняя дайка, которая имеет кислый состав. Это свидетельствует об условиях трансформации в зоне сдвига. Подобные условия установлены в современных зонах трансформных разломов медленносрединного Срединно-Атлантического хребта, вдоль которых также проявлен магматизм [Кашинцев и др., 2008].

Таким образом, можно предположить, что трансформный разлом имел северо-западное простирание (в современных координатах), а зона спрединга — северо-восточное. Этот вывод не противоречит представлениям В.В. Юдина [2011] о северо-восточном простирании юрско-раннемеловой Предгорной коллизионной сутуры Крыма, представляющей собой след закрытия бассейна с корой океанического типа.

Отметим, что помимо первичных брекчий в районе мыса Фиолент очень широко распростра-

нены брекчии тектонической природы, приуроченные к многочисленным зонам разломов, в том числе надвиговой природы. Породы в зонах разломов брекчированы, катаклизированы, милонитизированы и замещены вторичными минералами — альбитом, кварцем, хлоритом, карбонатами, актинолитом, эпидотом, карбонатами и др. Эти разломы связаны с формированием Предгорной коллизионной сутуры. Часть разломов подновлялась и в четвертичное время, что фиксируется в перекрывающих магматиты неогеновых известняках. Практически все породы в районе мыса Фиолент и вне зон разломов сильно тектонизированы (брекчированы) и изменены, что объясняется их расположением в Симферопольском меланже, выделенным В.В. Юдиным [1993]. Он отмечает, что мощные зоны брекчирования проявляются не только в самих сутурах, но и в оперяющих их высокоамплитудных надвигах [Юдин, 2008], что и наблюдается в Юго-Западном Крыму.

Выводы. 1. Офиолиты в северо-западной части района мыса Фиолент формировались на глубине ниже уровня карбонатной компенсации, а в юго-восточной части — выше.

2. Присутствие значительного количества глыбовых брекчий и офиокальцитов свидетельствует об аномальных склонах рифтовой долины, находящихся в зоне ее пересечения с трансформным разломом.

3. Зона спрединга имела северо-восточное простирание (в современных координатах), а трансформный разлом — северо-западное.

4. Последующие деформации, сопровождавшиеся брекчированием, катаклизированием и милонитизацией, связаны с формированием юрско-раннемеловой Предгорной коллизионной сутуры.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность О.В. Парфеновой, Б.Б. Шкурскому и В.Л. Косорукову за ценные консультации и плодотворные дискуссии.



Рис. 10. Зона сдвига, срезающая дайки мыса Броневой

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумова Л.Н., Березнер О.С., Гусев Г.С.* и др. Изучение офиолитовых комплексов при геологическом картировании. М.: Роскомнедра, Георгарт, МАНПО, 1994. 254 с.
- Демина Л.И., Промыслова М.Ю., Короновский Н.В., Царев В.В.* Первая находка серпентинитов в коренных обнажениях Горного Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 12–20.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И.* Палеогеодинамика. М.: Наука, 1993. 192 с.
- Кашинцев Г.Л., Шрейдер А.А., Максимоскин В.И.* и др. Транстенсия и щелочной магматизм разлоа Романш, Атлантика // Геотектоника. 2008. № 4. С. 85–92.
- Книппер А.Л.* Офиокальциты и некоторые другие типы брекчий, сопровождающие доорогенное становление офиолитовых комплексов // Геотектоника. 1978. № 2. С. 50–65.
- Мурс Э.М., Вайн Ф.Дж.* Массив Торос на Кипре и другие офиолиты как древняя океаническая кора // Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана. М.: Мир, 1973. С. 53–74.
- Промыслова М.Ю., Демина Л.И., Бычков А.Ю.* и др. Природа магматизма района мыса Фиолент (Юго-Западный Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 6. С. 14–22.
- Промыслова М.Ю., Демина Л.И., Бычков А.Ю.* и др. Офиолитовая ассоциация Юго-Западного Крыма // Геотектоника. 2016. № 1. С. 25–40.
- Промыслова М.Ю., Демина Л.И., Гуцин А.И.* Тектонические условия формирования офиолитовой ассоциации Юго-Западного Крыма // Проблемы региональной геологии Северной Евразии: Мат-лы X науч. чтений, посвященных памяти профессора М.В. Муратова. М.: МГРИ–РГГРУ, 2016. С. 74–77.
- Юдин В.В.* Симферопольский меланж // Докл. РАН. 1993. Т. 333, № 2. С. 250–252.
- Юдин В.В.* Геодинамика Черноморско-Каспийского региона. Киев: УкрГГРИ. 2008. 116 с.
- Юдин В.В.* Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАЙПИ. 2011. 333 с.

Поступила в редакцию
01.03.2017

УДК 550 (552.3)

С.Г. Ковалев¹, В.И. Сначев², М.А. Романовская³**ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАШКИРСКОГО МЕГАНТИКЛИНОРИЯ⁴**

Приведены материалы о геологии и геохимической специализации рифейских терригенных пород Башкирского мегантиклинория, в том числе углеродистых сланцев и конгломератов. В последних установлено высокое содержание золота и элементов группы платины, приуроченное преимущественно к интенсивно дислоцированным зонам. Сделан вывод о том, что потенциально рудоносные зоны в терригенных отложениях Башкирского мегантиклинория сформировались в результате многоэтапных полигенных процессов, обусловленных геодинамическим развитием региона в рифее–венде.

Ключевые слова: Башкирский мегантиклинорий, углеродсодержащие отложения, конгломераты, геохимическая специализация, элементы платиновой группы, самородное золото.

The paper presents materials on geology and geochemical specialization Riphean clastic rocks of Bashkirian meganticlinorium, including carbonaceous shales and conglomerates. In the last set high content of gold and platinum group elements, confined mainly to heavily dislocated zones. The conclusion is that the potentially ore-bearing zones in clastic sediments of the Bashkir meganticlinorium is a result of polygenic multistep processes, caused geodynamic development of the region in the Riphean-Vendian time.

Key words: Bashkir meganticlinorium, carbonaceous deposits, conglomerates, geochemical specialization, platinum group elements, native gold.

Введение. В последние десятилетия в разных регионах мира были открыты месторождения благородных металлов неизвестных ранее типов в углеродсодержащих осадочно-метаморфических комплексах. Эти месторождения в настоящее время относятся к одному из самых перспективных типов месторождений золота и платиноидов. Они имеют широкое географическое распространение и приурочены к различным возрастным уровням — от протерозоя до раннего мезозоя [Дистлер и др., 1996; Додин и др., 2000]. Выявленные месторождения отличаются по масштабности оруденения, морфологии рудных тел, интенсивности гидротермально-метасоматической проработки вмещающих пород и как следствие по концентрации полезных компонентов. Кроме того, значительный интерес во всем мире по-прежнему вызывают грубообломочные породы (конгломераты) в связи с более чем 100-летней эксплуатацией комплексного платино-золото-уранового месторождения Витватерсранд, которое обеспечивает от 25 до 50% добываемого в мире золота.

В пределах Башкирского мегантиклинория углеродсодержащие отложения широко распространены. В виде горизонтов переменной мощности они установлены в бурзянской (Rf₁) и

юрматинской (Rf₂) сериях — в составе большеинзерской, суранской и юшинской свит нижнего рифея и практически во всех свитах среднего рифея. Но особый интерес как с практической, так и с точки зрения изучения рудообразующих процессов представляют углеродсодержащие породы, приуроченные к тектоническим зонам и пронизанные магматическими телами основного состава. Грубообломочные породы также присутствуют на нескольких стратиграфических уровнях (Rf₁, Rf₂, V), но наиболее перспективны, по нашему мнению, конгломераты, входящие в состав машакской свиты (Rf₂) и обнажающиеся на хр. Большой Шатак. Ниже приводятся результаты изучения этих пород на комплексное благороднометалльное оруденение (таблица).

Методика исследований. Содержание Li, Be, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, REE, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U, а также благородных металлов (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Au) определено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) (аналитики В.А. Шишлов, В.Л. Кудрявцев; пределы обнаружения благородных металлов — 0,002 г/т). Кроме того, определение Pt, Pd и Au

¹ ФГБУН Институт геологии Уфимского научного центра РАН, зам. директора, доктор геол.-минерал. н.; e-mail: kovalev@ufaras.ru

² ФГБУН Институт геологии Уфимского научного центра РАН зав. лабораторией, доктор геол.-минерал. н., профессор; e-mail: Savant@inbox.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, канд. геол.-минерал. н., доцент; e-mail: maria-roman@mail.ru

⁴ Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект № 16-17-10192).

Репрезентативное содержание благородных металлов в терригенных породах Башкирского мегантиклинория (ppb)

Номер п/п	Название породы	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Au	Pt/Pd	Au/(Pt+Pd)	Номер п/п	Название породы	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Au	Pt/Pd	Au/(Pt+Pd)
1	жильный кварц	<2	<2	48	2,6	6,9	<2	0,14		30	метасоматит	<2	<2	22	2,6	8,4	9,9	0,38	0,32
2	сланец	<2	2,3	<2	<2	<2	<2		0,19	31	сланец	<2	<2	7,6	<2	2,8	5,2	0,36	0,5
3	—	<2	<2	11	<2	<2	2,1			32	гравелит	<2	<2	5,9	<2	2,9	3,5	0,49	0,39
4	—	<2	<2	2,2	<2	<2	<2		0,11	33	конгломерат	<2	<2	11	<2	<2	2,1		
5	—	<2	3,1	23	2,4	4,2	3,2	0,18		34	песчаник	<2	<2	17	<2	6,5	8	0,38	0,34
6	—	<2	2,4	<2	<2	2,1	4			35	—	<2	<2	6,3	<2	4	2,9	0,63	0,28
7	—	<2	<2	<2	<2	<2	4,6			36	—	<2	<2	5,6	<2	2,2	<2	0,39	
8	жильный кварц	<2	<2	16	<2	6,7	4,8	0,42	0,21	37	гравелит	<2	<2	<2	<2	3,3	2,4		
9	черный сланец	<2	<2	7,7	<2	5,1	6,8	0,66	0,53	38	песчаник	<2	<2	<2	<2	3,6	4,5		
10	—	<2	<2	6,4	<2	5,9	8,2	0,92	0,67	39	алевролит	<2	<2	16	<2	13	9,3	0,81	0,32
11	—	<2	<2	13	<2	2,8	<2	0,21		40	песчаник	<2	<2	2,5	<2	3	<2	1,2	
12	—	<2	<2	12	<2	3,8	21	0,31	1,32	41	—	<2	<2	2,7	<2	2,8	2,2	1,03	0,4
13	—	<2	<2	22	<2	20	6,3	0,91	0,15	42	—	<2	<2	10	<2	6,8	9	0,68	0,53
14	—	<2	<2	7,1	<2	4,3	5,6	0,60	0,49	43	конгломерат	<2	<2	3,6	<2	4,2	<2	1,16	
15	—	<2	<2	3,2	<2	2,7	2	0,84	0,33	44	—	<2	<2	3,4	<2	2,8	<2	0,82	
16	—	<2	<2	17	<2	2,5	3,1	0,14	0,15	45	песчаник	<2	4,8	<2	2,8	7,1	3,2		
17	—	<2	<2	9,4	<2	4,2	3	0,44	0,22	46	—	<2	5,7	3,4	<2	14	4,6	4,11	0,26
18	сланец	<2	<2	9,7	<2	3,1	<2	0,31		47	—	<2	6,9	37	<2	20	20	0,54	0,35
19	—	<2	<2	8,1	<2	2,9	3	0,35	0,27	48	—	2,9	9,2	36	4,2	12	7,9	0,33	0,16
20	черный сланец	<2	<2	19	<2	3,7	15	0,19	0,66	49	—	<2	7,6	<2	<2	5,9	<2		
21	сланец	<2	<2	18	<2	4	<2	0,22		50	—	<2	7,6	76	3	41	21	0,54	0,18
22	—	<2	<2	9	<2	<2	<2			51	сланец	<2	6,6	3,2	<2	4,4	<2	1,37	
23	—	<2	<2	5,2	<2	3,5	3	0,67	0,34	52	конгломерат	<2	7,1	<2	<2	<2	2,9		
24	—	<2	<2	25	<2	11	6,8	0,44	0,19	53	—	<2	7,6	3,2	<2	<2	9,4		
25	—	<2	8,8	22	<2	9,8	16	0,44	0,50	54	—	<2	3,6	<2	<2	3,7	<2		
26	алевросланец	<2	2	48	2,2	23	6,1	0,47	0,08	55	—	<2	4,1	3,1	<2	<2	<2		
27	—	<2	<2	<2	<2	3,9	4,8			56	—	<2	<2	3,5	2,1	4	<2	1,14	
28	—	<2	<2	<2	<2	2,9	8,7			57	—	<2	7,5	10	<2	9,2	5,1	0,92	0,26
29	—	<2	<2	<2	<2	4,3	3,8												

Примечания. № 1–7 — Интуратовский разрез; № 8–31 — Улуелгинско-Кудашмановская зона; № 32–57 — Шатакский комплекс. Содержание элементов платиновой группы (ЭПГ) и Au определены методом ICP-MS в ЦИИ ВСЕГЕИ (аналитики В.А. Шишлов, В.Л. Кудрявцев); пределы обнаружения ЭПГ и Au — 2 ppb.

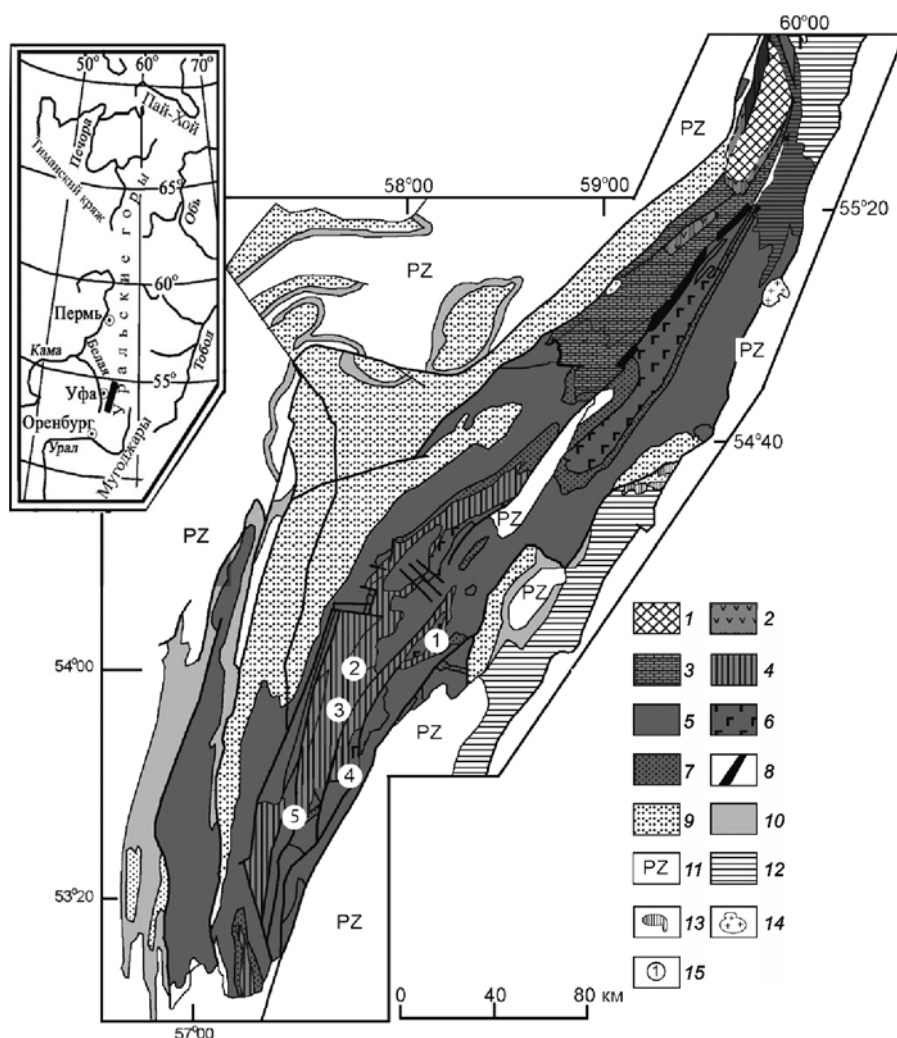
выполнено атомно-абсорбционным методом в ОАО «Иригиредмет» по методике МА ИАЦ-65-2004. Составы минералов анализировались на растровом электронном микроскопе РЭММ-202М в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс, аналитик В.А. Котляров).

Геологическое строение и минералогия перспективных зон. Улуелгинско-Кудашмановская зона приурочена к Юрюзано-Зюраткульскому разлому (рис. 1) и сложена породами среднерифейского возраста. Терригенные отложения представлены серицит-кварцевыми алевролитами и углеродсодержащими сланцами. Магматические породы образуют вулcano-плутоническую ассоциацию, включающую пластовые тела интрузивных габбродолеритов и эффузивов основного состава с небольшим количеством пирокластического материала. Ранее здесь была выявлена Au-Ag-U-Th-REE минерализация, приуроченная к сложнорасчлененным черносланцевым горизонтам [Ковалев, 2004a]. В результате детального изуче-

ния обнаружены многочисленные новообразованные минералы: сульфиды (пирит, пирротин, халькопирит, галенит, сфалерит); самородные элементы (Au, Sn, Pb, Ag); соединения, близкие к фурутобеиту ((Cu, Ag)₆PbS₄); промежуточные нестехиометричные соединения ряда халькопирит (CuFeS₂)–енаит (AgFeS₂); соединения ряда (Ag, Fe)_n(S, Se)_m–(Ag, Fe)_n(S, Te)_m, а также уранинит, коффинит, ураноцирцит, торит урановый, монацит и неидентифицированные редкоземельные фазы. Самородное Au установлено в пробе-протоалочке из будинированной кварцевой жилы. Золото высокопробное, микрозондовым методом в нем обнаружены Cu (0,21–0,41 масс.%) и Ag (4,58–6,50 масс.%).

Суран-Ишлинская площадь расположена на левобережье р. Бол. Инзер в зоне Караташского и Зюраткульского региональных разломов (рис. 1), где распространены углеродсодержащие сланцы, алевролиты и карбонатные породы суранской свиты (Rf₁). Прожилково-вкрапленное карбонат-

Рис. 1. Геологическая схема Башкирского мегантиклинория и местоположения изученных разрезов терригенных пород: 1 — тараташский метаморфический комплекс; 2 — айская свита (Rf_1); 3 — саткинская и бакальская свиты нерасчлененные (Rf_1); 4 — большеинзерская, суранская и юшинская свиты нерасчлененные (Rf_1); 5 — терригенные отложения нерасчлененные (Rf_2); 6 — вулканогенно-осадочные отложения нерасчлененные (Rf_2); 7 — зигальгинская свита (Rf_2); 8 — Кусинско-Копанский комплекс (Rf_2); 9 — верхнерифейские отложения нерасчлененные; 10 — вендские отложения; 11 — палеозойские отложения; 12 — метаморфические комплексы; 13 — ультраосновные породы; 14 — гранитоиды; 15 — изученные разрезы и комплексы (1 — Улуелгинско-Кудашмановский, 2 — Интуратовский, 3 — Суран-Ишлинский, 4 — Узянско-Кагармановский, 5 — Шатакский)



кварц-сульфидное оруденение развито в зонах дробления и морфологически представлено линейной минерализованной зоной, вытянутой в северо-восточном направлении. Пробуренные скважины вскрыли глинистую кору выветривания по углеродистым кварц-серицит-хлоритовым сланцам, долеритам и карбонатным породам, мощность которой варьирует от 53,6 до 325,0 м. По результатам химико-спектрального анализа содержание Au в породах изменяется от 0,5 до >2,0 г/т, а в единичных пробах (методом ICP MS) составляет 3,05; 5,31 и 27,29 г/т. В коре выветривания обнаружены самородное Au и аурикуприд (Cu_3Au).

Интуратовская зона расположена в 3,5 км южнее пос. Ишла в полосе развития отложений суранской свиты (Rf_1), которые представлены переслаиванием темно-серых и черных углеродсодержащих сланцев с серыми доломитами и доломитизированными алевропесчаниками (рис. 1). Здесь же присутствуют кварцевые жилы мощностью до 1–21,5 м, в которых содержится 2,2–2,4 г/т Au и 2,7–3,0 г/т Ag, а в пробах-протоколках выявлено 20 знаков мелкого (от $0,225 \times 0,075$ до $0,125 \times 0,075$ мм) золота неправильно-комковатой и уплощенно-изометричной формы с неровной ноздреватой поверхностью.

Узянско-Кагармановская зона находится в восточной части Башкирского мегантиклинория, в полосе развития пород авзянской (Rf_2) и зигазино-комаровской (Rf_2) свит, вблизи контакта докембрийского разреза Башкирского мегантиклинория с палеозойским обрамлением (рис. 1). Породы здесь представлены переслаиванием глинистых сланцев, мелкозернистых кварцитопесчаников и углеродсодержащих сланцев. В химическом составе последних установлено 1,0–3,2 г/т золота и 0,4–0,8 г/т серебра при повышенном количестве платиноидов (Pt 20–270, Pd 10–140, Ru 5–70, Rh 1–5 мг/т) [Рыкус и др., 2000].

Машакский комплекс (свита) представляет собой естественную ассоциацию стратифицированных вулканогенно-осадочных образований, пород жерловой, субвулканической и дайковой фаций. Стратифицированные образования комплекса слагают моноклиаль на юго-восточном крыле Ямантауского антиклинория, осложненную дизъюнктивными нарушениями и мелкой складчатостью. Южнее возрастным аналогом машакских отложений считаются вулканогенно-осадочные образования Шатакского комплекса (свиты), которые с угловым несогласием перекрывают юшинскую свиту нижнего рифея и постепенно

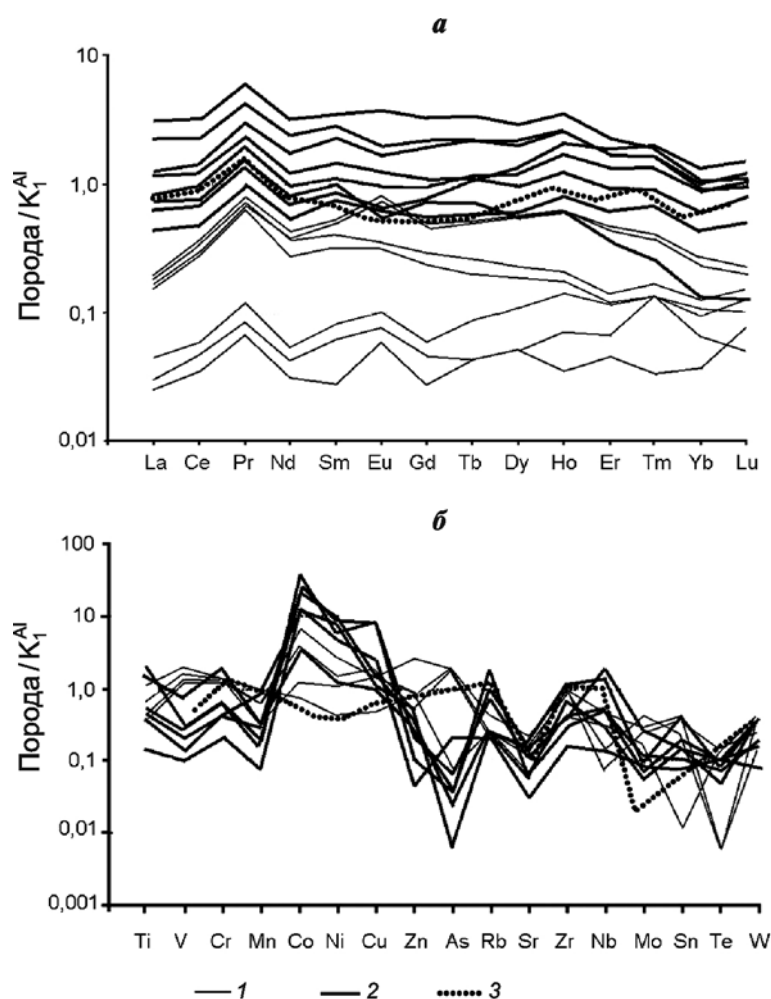


Рис. 2. Нормализованные содержания РЗЭ (а) и спайдер-диаграмма (б) для черносланцевых отложений: 1 — черные сланцы, 2 — сульфидизированные черные сланцы, 3 — терригенные породы зигазино-комаровской свиты, по [Маслов и др., 2008]. Нормализовано по средним составам терригенных и вулканогенных разновидностей черных сланцев, по [Юдович, Кетрис, 1988]

сменяются зигальгинскими кварцитами. Среди слагающих шатакский комплекс пород выделяются стратифицированная вулканогенно-осадочная ассоциация, а также образования субвулканической и дайковой фаций [Ковалев, Высоцкий, 2004]. Осадочные породы слагают около 25–45% объема комплекса и представлены преимущественно грубозернистыми разностями — конгломератами и песчаниками, реже алевритами, сланцами и известняками. Конгломераты развиты на нескольких стратиграфических уровнях. Они присутствуют в основании разреза (кузельгинская подсвита) и в его центральной части (каранская подсвита).

В монофракциях гематита, отобранных из цемента конгломератов нижней толщи кузельгинской подсвиты, атомно-абсорбционным методом установлено до 10,77 г/т золота и 1,12 г/т серебра, а в валовых пробах содержание Au достигает 1,8 г/т; Ag — 1,4; Pt — 1,25; Pd — 0,35 г/т, при массовой доле железа 8,22% [Ковалев, Высоцкий, 2008]. В верхней толще выделяется до трех горизонтов валунно-галечных конгломератов суммарной

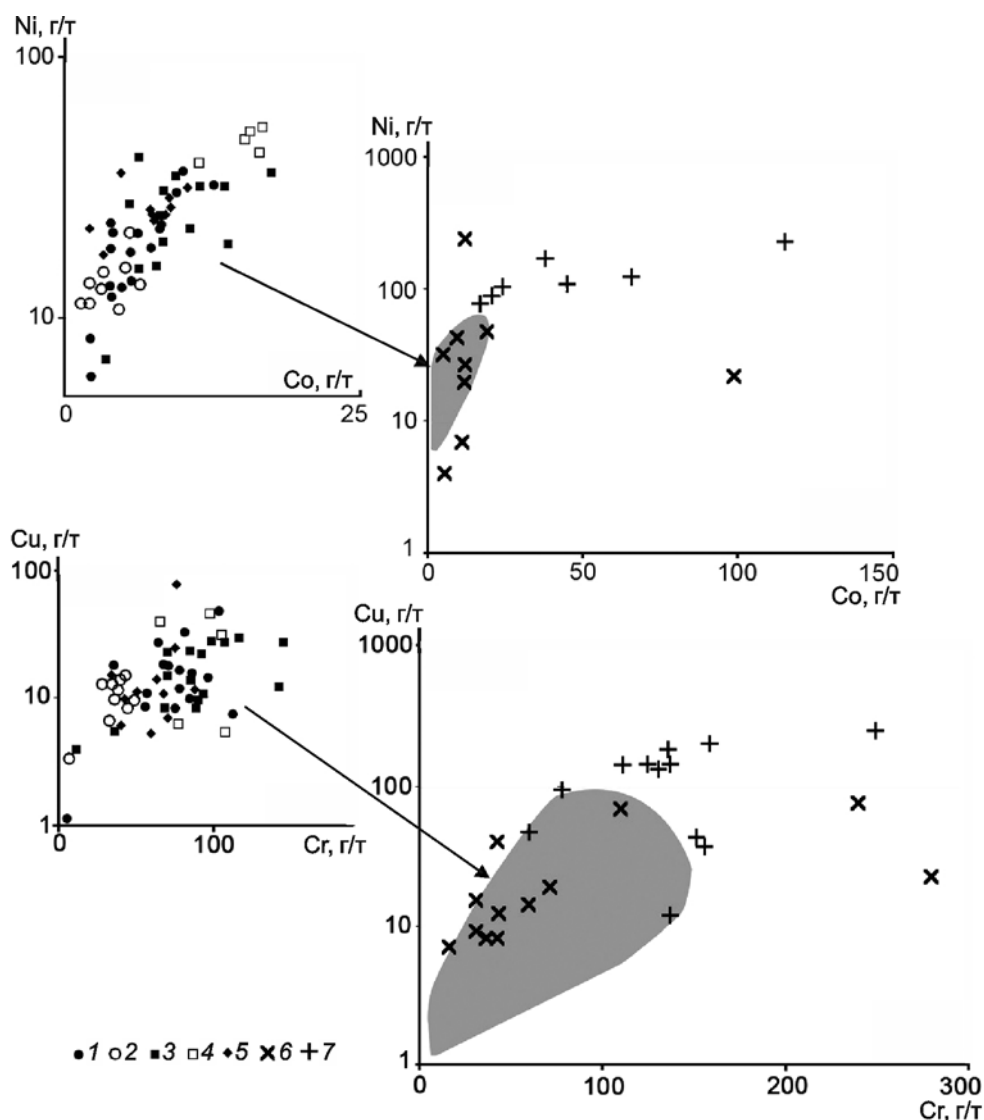
мощностью около 50 м в переслаивании с потоками базальтов и пластовыми телами долеритов, перекрытых в верхней части разреза риолитами. Рудная минерализация, приуроченная как к цементу, так и к галькам, представлена идиоморфными кристаллами магнетита размером 0,5–2 мм, в монофракции которого содержание золота составляет 4,9, а серебра 0,2 г/т. В валовых пробах концентрация благородных металлов составляет (г/т): Pt до 1,75; Pd до 0,30; Au до 2,15; Ag до 5,25 г/т, массовая доля железа 6,54% [Ковалев, Высоцкий, 2008]. Кроме железо-кислой минерализации в конгломератах выявлены самородные золото и серебро, нигглит (PtSn_3), гессит (TeAg_2), пирит (FeS_2), халькопирит (CuFeS_2), борнит (Cu_5FeS_4), сфалерит (Zn,FeS), халькозин (Cu_2S), бетехтинит ($\text{Cu}_{21}\text{Pb}_2\text{S}_{15}$), пентландит ($\text{Fe,Ni}_9\text{S}_8$), а также соединения селена с мышьяком и теллура с железом.

Геохимическая специализация терригенных комплексов. Геохимическая специализация рассматриваемых терригенных пород Башкирского мегантиклинория во многом определяется их геологическим положением, а именно приуроченностью к зонам тектонических нарушений и пространственной ассоциацией с магматическими породами. Так, в частности, содержание и распределение РЗЭ, а также элементов, важных для понимания процессов рудогенеза, показано на примере черносланцевых отложений Улуелгинско-Кудашмановской зоны (рис. 2). Изучение проводилось для двух

типов пород: неизмененных черных сланцев и их сульфидизированных разновидностей. Количество сульфидов в последних составляло около 50–60% от общего объема пробы. Из анализа построенных диаграмм видно, что нормализованное содержание редкоземельных элементов (рис. 2, а) в породах различается на 1–2 порядка. Повышенное количество РЗЭ в сульфидизированных сланцах свидетельствует о том, что эти элементы были подвижны при рудообразовании, накапливаясь в породах с сульфидной минерализацией, где входили в состав монацита и неидентифицированные редкоземельные фазы. Кроме того, сульфидизированные сланцы обогащены Co, Ni и Cu — элементами, типоморфными для магматических пород основного состава (рис. 2, б), что может свидетельствовать о генетической связи минерализации черносланцевых толщ с ассоциирующимися магматическими породами.

Особенно отчетливо это видно из сопоставления углеродсодержащих сланцев Улуелгинско-Кудашмановской зоны с терригенными отложениями

Рис. 3. Диаграммы Ni–Co и Cu–Cr для терригенных пород нижнего и среднего рифея из стратотипических разрезов Башкирского мегантиклинория [Маслов и др., 2008] и одновозрастных им образований из тектонических зон: 1–5 — терригенные породы из стратотипических разрезов (1 — большеинзерская свита (Rf_1), 2 — суранская свита (Rf_1), 3 — юшинская свита (Rf_1), 4 — машакская свита (Rf_2), 5 — зигазино-комаровская свита (Rf_2)); 6 — углеродистые глинистые и карбонатно-глинистые сланцы, суранская свита, Интуратовская зона; 7 — углеродсодержащие сланцы, машакская свита, Улуелгинско-Кудашмановская зона



ями зигазино-комаровской свиты (Rf_2), в составе которой черносланцевые отложения присутствуют в значительном количестве (до 70% от общего объема свиты) [Маслов, 1988], но какая-либо их связь с магматическими породами отсутствует. Отметим, что в отдельных пробах черных сланцев с сульфидной минерализацией установлено «ураганное» содержание свинца (65,4 кг/т), серебра (1,7 кг/т) и вольфрама (103–190 г/т), что не учитывалось при геохимическом анализе, но в то же время аномальное количество Pb и Ag было подтверждено находками собственных минеральных фаз этих элементов.

Обогащенность рудогенными элементами (Co, Ni, Cr и Cu) по сравнению с породами из стратотипических разрезов характерна практически для всех изученных разрезов и площадей. Из распределения фигуративных точек на диаграммах Co–Ni и Cr–Cu (рис. 3) видно, что осадочные породы стратотипа нижнего и среднего рифея и аналогичные им по возрасту образования из тектонических зон существенно различаются. Если первые образуют относительно компактные поля со слабо выраженными вариациями содержания Co, Ni, Cr и Cu

без четкой привязки максимальных и минимальных значений их концентрации к определенным стратиграфическим уровням, то для измененных пород из зон тектонических нарушений разброс минимальных и максимальных значений достигает двух порядков, что свидетельствует о привносе Co, Ni, Cr, Cu извне и/или перераспределении их в процессе метаморфизма.

Для характеристики благороднометалльной геохимической специализации терригенных отложений Башкирского мегантиклинория изучена распространенность платиноидов и золота в породах нижнего и среднего рифея из стратотипических разрезов для определения «фоновых» значений содержания благородных металлов в толщах, не подвергшихся воздействию флюидно-магматических систем и процессов метаморфизма [Ковалев и др., 2014]. Полученные результаты сводятся к следующему:

— для «неизмененных» ниже- и среднерифейских терригенных пород характерна четко выраженная палладиевая геохимическая специализация (рис. 4). По отношению к содержанию Pd в континентальной коре, по [Wedepohl, 1995], его

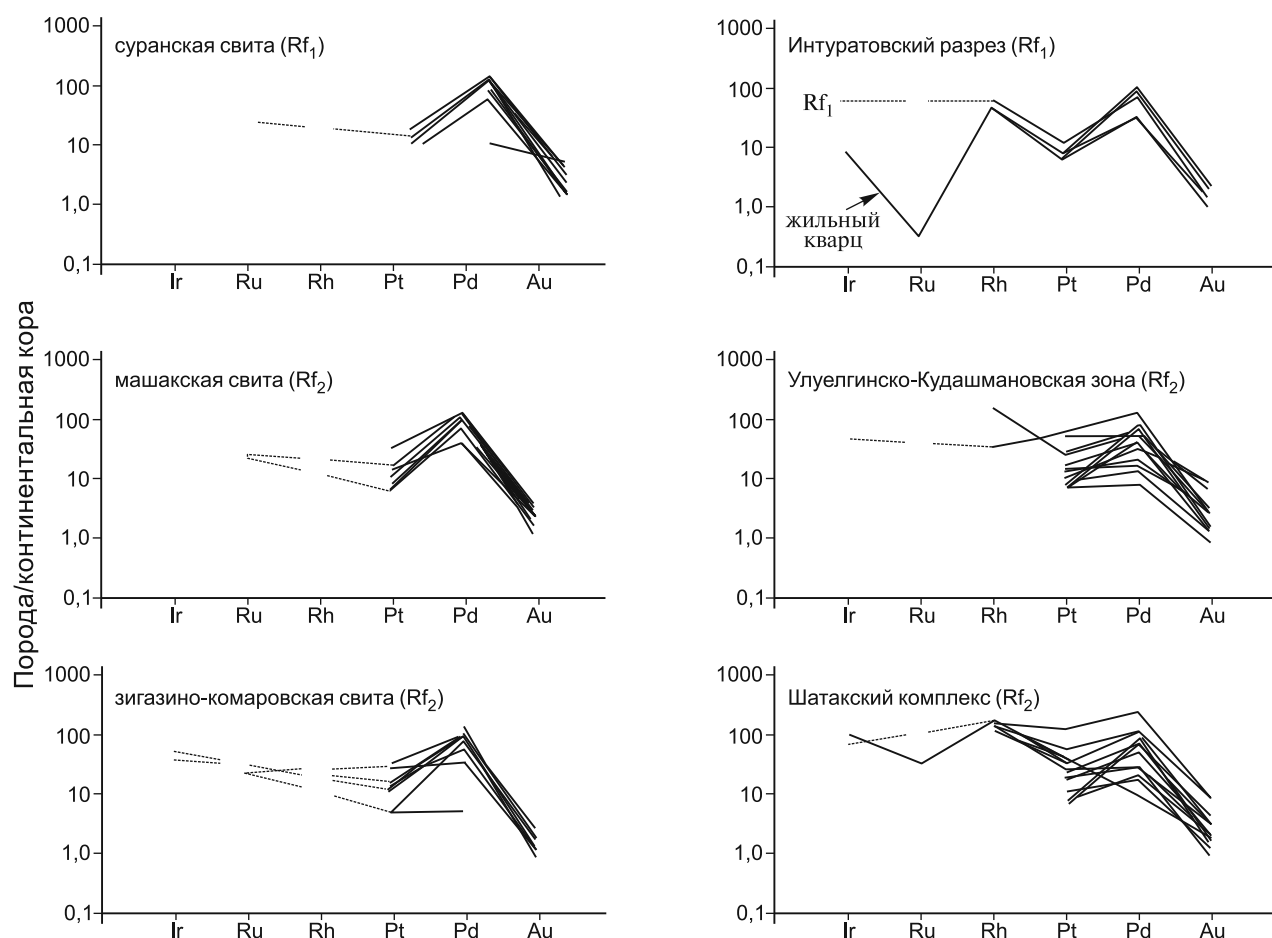


Рис. 4. Нормализованное содержание благородных металлов в терригенных отложениях Башкирского мегантиклинория, континентальная кора, по [Wedepohl, 1995]

количество в сланцах различных уровней нижнего и среднего рифея весьма стабильно и составляет в среднем 40–100 (для Pt этот параметр составляет 2–13, для Ru 2–25, для Ir 6–25);

– нормализованное содержание Au в этих «неизменных» терригенных породах, напротив, близко к коровому и варьирует в пределах 0,63–2,46;

– отличительная черта «фоновых» значений содержания ЭПГ в породах нижнего и среднего рифея — отсутствие Rh, значимое количество которого не установлено ни в одном из 116 проанализированных образцов.

Данные о содержании ЭПГ и Au в рифейских отложениях из стратотипических разрезов сопоставлены с концентрацией этих элементов в породах Интуратовской, Улуелгинско-Кудашмановской зон и Шатакского комплекса. В результате выявлены значительные различия в распределении ЭПГ и Au между «неизменными» образованиями и их метаморфизованными аналогами. Так, для низкоуглеродистых глинистых и карбонатно-глинистых сланцев Интуратовской зоны характерна Pd–Rh специализация, а параметр Pt/Pd на порядок выше, чем в «неизменных» породах этого же стратиграфического уровня. Нормированное же содержание Ir в разных породах этой зоны значительно раз-

личается. На перераспределение ЭПГ в процессе метаморфизма отчетливо указывает и повышенное содержание Pt, Pd и Ir в кварцевых жилах, секущих сланцы Интуратовской зоны (рис. 4). Для пород Улуелгинско-Кудашмановской зоны характерна Pt–Rh–Pd-специализация (рис. 4), при этом отношение Pt/Pd изменяется от 0,14 до 0,91, а Au/(Pt+Pd) — от 0,11 до 1,32, что свидетельствует о значительной подвижности платины, палладия и золота в процессе минералообразования.

Определенное своеобразие в распределении нормированного на континентальную кору содержания Au и ЭПГ установлено и для терригенных пород Шатакского комплекса. Для них характерна Pd–Pt–Rh- и Pt–Pd–Rh-специализация при величине Pt/Pd от 0,33 до 4,11. Смена типа благороднометалльной специализации терригенных пород с Pt–Pd на Pd–Pt хорошо коррелирует с материалами, полученными при изучении рудности докембрийских конгломератов Шатакского комплекса, в которых выявлена Os–Pd–Pt-специализация пород при значении Pt/Pd, равном приблизительно 4 [Ковалев, Высоцкий, 2004].

Специфика благороднометалльной специализации терригенных пород из тектонических зон и стратотипических разрезов выявляется при сравнительном анализе значений отношений Pt/Pd и

$Au/(Pt+Pd)$, изображенных на рис. 5. Как видно из анализа этих диаграмм, породы стратотипа и тектонических зон образуют два относительно четко выраженных локальных поля, а изменение специализации в ряду породы стратотипа → породы тектонических зон направлено в сторону увеличения количества золота и платины.

Определенный интерес представляет сравнительный анализ величин Pt/Pd и $Au/(Pt+Pd)$ в терригенных и магматических породах Башкирского мегантиклинория (рис. 5). Как видно на диаграмме, поле магматических пород в целом аналогично полю терригенных, причем наблюдается слабо проявленная тенденция к увеличению количества золота и платины от древних пород к более молодым.

Обсуждение результатов. Приведенные выше материалы свидетельствуют о том, что процессы формирования геохимической специализации терригенных пород Башкирского мегантиклинория обусловлены многими причинами, зависящими от геодинамического развития территории. В обобщенном виде в истории Южного Урала можно выделить несколько этапов, каждый из которых характеризовался специфическим режимом развития и как следствие влиял на перераспределение благородных металлов.

Первый этап (рифтогенный). Начало формирования благороднометалльной специализации терригенных пород было синхронно образованию в раннем рифее интракратонного прогиба с компенсированным осадконакоплением терригенных отложений [Маслов, 1988] и связано с внедрением мелких рассредоточенных базитовых и базит-гипербазитовых интрузий в зоны конседиментационных разломов. Проявление магматизма на обширной территории преимущественно в интрузивной форме, а также повышенная основность пород (пикриты, пикродолеритовые комплексы, дайки меланократовых габбро-долеритов) свидетельствуют о его плюмовой природе [Пучков, Ковалев, 2013], эволюционным развитием которого, на наш взгляд, и определялось во многом геодинамическое развитие региона.

Собственно рифтогенный этап знаменовался переходом от рассредоточенного типа растяжения литосферы к линейно сконцентрированному, что в пределах западного склона Южного Урала выразилось в формировании серии грабенообразных структур с максимальным развитием интрузивного магматизма и вулканизма при большом разнообразии продуктов его деятельности — интрузий, эффузивных и пирокластических фаций [Ковалев, 2004б]. Процессы дифференциации в промежуточных очагах и, возможно, контаминация в их верхних частях привели к образованию магм, различающихся как по основности (пикриты, базальты, риолиты), так и по геохимическим характеристикам (обогащенность рудогенными

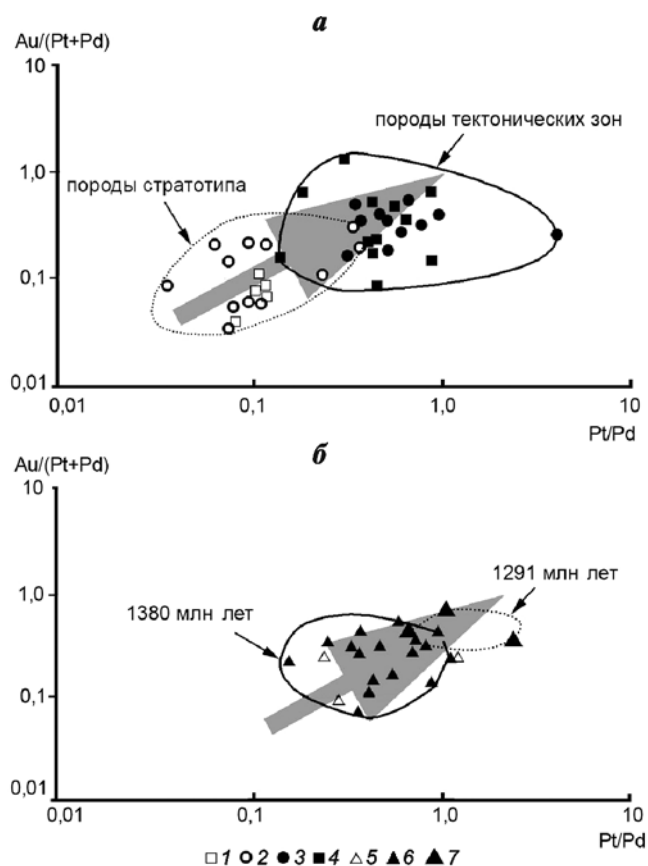


Рис. 5. Диаграмма Pt/Pd – $Au/(Pt+Pd)$ для терригенных (а) и магматических (б) пород Башкирского мегантиклинория: 1–2 — отложения стратотипических разрезов (1 — суранская свита (Rf_1); 2 — машакская свита (Rf_2); 3 — шатакский комплекс; 4 — Улуелгинско-Кудашмановская зона); 5 — шуйдинский комплекс (Rf_1); 6 — шатакский комплекс (Rf_2); 7 — ишлинский комплекс (Rf_2). Возраст магматических пород шатакского комплекса по [Пучков и др., 2007]; ишлинских пикритов — по [Сазонова и др., 2011]

элементами — Ti, V, Ni, Co, Cu, Cr, а также Au, Pt и Pd по сравнению с мантийным субстратом). При этом формировавшиеся осадки и осадочные породы верхних горизонтов коры были пронизаны потоками глубинных флюидов углеводородно-водородного состава, существование которых на крыльях срединно-океанических хребтов и, что важно для нашего случая, на активизированных континентальных склонах доказано прямыми измерениями флюидопроявлений [Авилов, Авилова, 2003]. В исследованных породах воздействие глубинных флюидов реконструируется по благороднометалльной специализации терригенных отложений, чередующихся с магматическими образованиями, которые имели аналогичную специализацию. Таким образом, флюидная проработка осадочного субстрата при рифтогенезе, а также сорбирующая способность черносланцевых отложений привели к формированию геохимических аномалий рудогенных элементов, включая Au и платиноиды.

Второй этап (коллизионный) метаморфогенно-гидротермальный. В соответствии с современными

представлениями о геодинамическом развитии региона в поздневендское время территория Южного Урала развивалась в режиме сжатия [Пучков, 2000]. На этом этапе физико-химические условия формирования геохимической специализации пород определялись функционированием флюидно-гидротермальной системы, которая образовалась при смене рифтогенного магматизма процессами водного корового палингенеза и регионального метаморфизма. В частности, для конгломератов шатакского комплекса процессы перераспределения вещества в обобщенном виде можно охарактеризовать следующей моделью. В растворах, отделившихся от магматических очагов и характеризующихся повышенной щелочностью и низкими значениями окислительно-восстановительного потенциала, железо присутствовало, вероятнее всего, в виде карбонильных или цианидных комплексов. При достижении зоны, в которой в силу снижения давления и температуры, повышения Eh и кислотности нарушились условия равновесия, произошло разложение комплексов железа, что выразилось в активном осаждении из постмагматических растворов магнетита и гематита с параллельным обогащением рудной зоны углекислотой и углеводородами.

По данным А.Ф. Коробейникова и Н.Н. Перцева [1998], магнетит и гематит — минералы-концентраторы благородных металлов в скарновом гидротермальном процессе, поэтому разложение карбонильных и/или цианидных комплексов приводит к формированию ассоциации оксидов железа и благородных металлов. А.А. Маракушевым и М.И. Безменом [1971] было показано, что возрастание положительной свободной энергии реакций типа $\text{MeO}_2 + \text{S}_2 = \text{MeS}_2 + \text{O}_2$ с повышением температуры свидетельствует о все большем смещении равновесия реакций влево, в сторону образования оксидов, что соответствует эмпирически выявленной закономерности, согласно которой смена окисного оруденения сульфидным на рудных месторождениях происходит с понижением температуры. Смена силикатных парагенезисов сульфидными также соответствует общей тенденции к снижению температуры. Расчеты равновесных соотношений между магнетитом и сульфидами железа в системах с участием ионов HS^- и OH^- позволили установить, что при темпе-

ратуре выше 400 °С магнетит более устойчив, чем сульфиды железа. Снижение температуры системы ниже 400 °С уже предопределяет появление в системе парагенезиса пирита с пирротином вместо магнетита.

Следовательно, при повышенной температуре возрастание активности кислорода, выражающееся в увеличении сродства металлов к кислороду, предопределяет устойчивость минералов — оксидов и силикатов железа. Золото и платина в этих условиях проявляют свои сидерофильные свойства, что и обуславливает совместную миграцию благородных металлов и железа, концентрация которых в высокотемпературных щелочных восстановленных растворах может быть достаточна велика. Палладий, в отличие от платины, — типичный халькофильный элемент, поэтому он не характерен для рассматриваемой ассоциации, о чем свидетельствуют высокие значения Pt/Pd отношения, в среднем равного 4 в магнетит-гематитовых конгломератах. На основе приведенных выше материалов можно предположить, что формирование золото-платино-железооксидной ассоциации в конгломератах шатакского комплекса происходило из щелочных восстановленных растворов при температуре не ниже 400 °С, а последующее сульфидообразование усложнило картину распределения золота и платиноидов.

Аналогичные, но не тождественные процессы реализовывались и в черносланцевых отложениях, подвергшихся тектонической и флюидно-магматической проработке. Сформировавшиеся флюидно-гидротермальные системы, физико-химические параметры функционирования которых в значительной степени определялись локальными характеристиками зон их проявления, воздействовали на субстрат, что приводило к перераспределению вещества. формированию своеобразной геохимической специализации пород и образованию комплексных типов минерализации.

Заключение. Таким образом, масштабность процессов рудообразования и распространенность зон, охарактеризованных выше, позволяет предполагать наличие в пределах Башкирского мегантиклинория не типичного для региона оруденения с промышленно значимыми значениями концентрации полезных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авилов В.И., Авилова С.Д. Потоки газов в придонной зоне глубоководной части океана // Докл. РАН. 2003. Т. 389, № 4. С. 519–523.

Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. Форма нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38, № 6. С. 46–484.

Додин Д.А., Чернышев Н.М., Яцкевич Б.А. Платинометаллы месторождения России. СПб.: Наука, 2000. 755 с.

Ковалев С.Г. Сложнодислоцированные углеродсодержащие породы западного склона Южного Урала // Докл. РАН. 2004а. Т. 396, № 4. С. 511–514.

Ковалев С.Г. Динамика формирования средне-рифейской рифтогенной структуры (западный склон Южного Урала) // Докл. РАН. 2004б. Т. 396, № 2. С. 219–222.

Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новый тип оруденения в докембрийских конгломератах западного склона Южного Урала // Докл. РАН. 2004. Т. 395, № 4. С. 503–506.

Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новые данные по геологии Шатакского комплекса (западный склон Южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 3. С. 280–289.

Ковалев, С.Г., Гареев Э.З., Маслов А.В. Первые данные о благороднометальной специализации терригенных пород нижнего и среднего рифея Южного Урала // Изв. вузов. Геология и разведка. 2014. № 4. С. 33–37.

Коробейников А.Ф., Перцев Н.Н. Золото, платина и палладий в диабазах Шитового комплекса Костариканской рифтовой зоны в Тихом океане // Докл. РАН. 1998. Т. 359, № 5. С. 663–667.

Маракушев А.А., Безмен Н.И. Термодинамика сульфидов и окислов в связи с проблемами рудообразования. М.: Наука, 1971. 229 с.

Маслов А.В. Рифейские углеродистые отложения Башкирского мегантиклинория // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 3. С. 101–109.

Маслов А.В., Ножкин А.Д., Подковыров В.Н. и др. Геохимия тонкозернистых терригенных пород верхнего докембрия Северной Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 274 с.

Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.

Пучков В.Н., Ковалев С.Г. Плюмовые события на Урале и их связь с субглобальными эпохами рифтогенеза // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы. Иркутск: ИЗК СО РАН. 2013. С. 34–38.

Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Козлов В.И. и др. Предварительные данные о возрастных рубежах нео- и мезопротерозоя в свете новых U-Pb датировок // Геол. сборник Иг УНЦ РАН. № 6. Уфа: ДизайнПоиграфСервис, 2007. С. 3–14.

Рыкус М.В., Сначев В.И., Сначев А.В. Золото в дислоцированных углеродистых толщах палеоконтинентального сектора Южного Урала // Геологическая служба и горное дело Башкортостана на рубеже веков. Уфа: Тау, 2000. С. 179–191.

Сазонова Л.В., Носова А.А., Ларионова Ю.О. и др. Мезопротерозойские пикриты восточной окраины Восточно-Европейской платформы и Башкирского мегантиклинория: петрогенезис и особенности составов оливина и клинопироксена // Литосфера. 2011. № 3. С. 64–83.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 271 с.

Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochimic. et Cosmochimic. Acta. 1995. Vol. 495. P. 1217–1239.

Поступила в редакцию
01.03.2017

УДК 556.182

Р.С. Штенгелов¹, Е.А. Филимонова², И.С. Шубин³**ОБРАБОТКА ОТКАЧКИ ИЗ НАПОРНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ДЕБИТЕ И АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ⁴**

Рассмотрены проблемы, возникающие при интерпретации данных длительных асинхронных опытно-эксплуатационных опробований с учетом колебаний атмосферного давления. Для Удомельского месторождения подземных вод рассчитаны барометрическая эффективность и поправки к фактическим понижениям уровней, проанализированы диагностические признаки пространственно-временного развития депрессионной воронки. Полученные гидрогеодинамические параметры служат основой для калибровки математической модели месторождения и прогнозирования периодического компенсационного водоотбора для подпитки озер-охладителей Калининской АЭС.

Ключевые слова: опытно-эксплуатационная откачка, барометрическая эффективность, асинхронный режим дебита, алексинско-протвинский водоносный горизонт, верейские глины.

Interpretation problems of long-term anisochronous multi-well pumping test under oscillating atmosphere pressure is analyzed. The barometric efficiency and corrections of measured drawdowns are calculated to Udomlya groundwater basin, evaluation of space and temporal moving of depression cone is investigated. Obtained hydraulic parameters is used for numerical model of groundwater basin and forecasting of periodical compensation wells pumping for recharge lake-coolers of Kalininskaya Nuclear Power Plant.

Key words: pumping test, barometric efficiency, anisochronous schedule of pumping rate, aleksinsko-protvinskiy aquifer, vereiskiy aquitard.

Введение. Опытнo-эксплуатационное опробование (ОЭО) — основной метод оценки запасов месторождений подземных вод с высокой степенью сложности гидрогеологических условий, обусловленных хаотической фильтрационной неоднородностью трещинно-карстовых коллекторов и проявлением процессов взаимодействия горизонтов в пластовых водоносных системах. Оно предпринимается с целью общей диагностики расчетной схемы месторождения, получения количественных показателей для прогнозных расчетов гидравлическим методом и постановки эпигнозных (обратных) задач. Значительная продолжительность и высокая производительность ОЭО, которая приближает к заявленной потребности, приводят к формированию обширной области влияния, что позволяет диагностировать макронеоднородности фильтрационных свойств коллектора, проявление действия удаленных граничных условий и длительно протекающих балансово-гидрогеодинамических процессов.

Достоверность и достаточность результатов ОЭО зависят как от обоснования условий постановки (число и расстановка наблюдательных скважин в плане и в разрезе, необходимые длительность и интенсивность откачки, детальность

выполнения замеров и др.), так и от методики обработки опытных данных, учитывающей природные и технологические факторы, которые неизбежно проявляются в ходе длительного опыта и влияют на положение уровней подземных вод. Устранение влияния этих факторов и вычленение собственно понижения уровней — методически сложная задача, комплексного решения которой не существует. Если некоторые из этих факторов (например, целенаправленное или случайное изменение дебита, режим действующих соседних водозаборов, изменчивость атмосферного давления) можно количественно устранить относительно корректно, то многие природные процессы (сезонные изменения питания водоносной системы, гидрологический режим и др.) могут быть учтены, как правило, лишь на качественном уровне.

Некоторые проблемы диагностики и обработки данных рассмотрим ниже на примере группового ОЭО на Удомельском месторождении подземных вод.

Объект исследования. В гидрогеологическом разрезе Удомельского месторождения подземных вод, расположенного в западной части Московского артезианского бассейна, выделяются водоносный комплекс в четвертичных отложениях;

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, докт. геол.-минерал. н., профессор; e-mail: rssteng@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, канд. геол.-минерал. н., ст. науч. с.; e-mail: ea.filimonova@yandex.ru

³ ЗАО «ГИДЭК», гидрогеолог; e-mail: ivan.shubin@gmail.com

⁴ Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 16-17-10187).

водоносный каширско-мячковский терригенно-карбонатный горизонт; слабопроницаемый верейский терригенный горизонт; водоносный алексинско-протвинский терригенно-карбонатный горизонт.

Подробная геолого-гидрогеологическая характеристика Удомельского месторождения приведена в [Беляков, 2011, Болгов..., 2012]. Разведочные работы на месторождении с 1969 г. связаны с проектированием, строительством и эксплуатацией Калининской АЭС. В 2001–2004 гг. для целей резервного технического водоснабжения АЭС сотрудниками компании ЗАО «ГИДЭК» (Б.В. Боровский, А.М. Просеков, И.Б. Колотов) оценены запасы подземных вод алексинско-протвинского водоносного горизонта (50,4 тыс. м³/сут, из них на участке «Елманова Горка» 25,2 тыс. м³/сут). Расчеты выполнены на специально разработанной численной геофильтрационной модели с обоснованием минимального ущерба поверхностному стоку. В 2010–2013 гг. силами ЗАО «ГИДЭК» (Б.В. Боровский, М.В. Беляков) проведена переоценка запасов подземных вод алексинско-протвинского водоносного горизонта на участке «Елманова Горка», которые составили 57,7 тыс. м³/сут. В составе этих работ выполнена групповая опытно-эксплуатационная откачка, результаты которой рассмотрим ниже.

Уточнение расчетной фильтрационной схемы и запасов Удомельского месторождения подземных вод потребовалось в связи с увеличением мощности АЭС и возникшей проблемой увеличения температуры воды и потерь на испарение с акватории озер-охладителей Песьво и Удомля, для пополнения которых необходим дополнительный источник подпитки. Дефицит ресурсов поверхностных вод предлагается компенсировать за счет периодической кратковременной эксплуатации подземных вод алексинско-протвинского водоносного горизонта на водозаборном участке «Елманова горка» [Беляков, 2011; Болгов и др., 2012].

Условия проведения групповой опытно-эксплуатационной откачки. Компенсационный водозабор предполагается разместить на берегу оз. Котемля (рис. 1). Групповая опытно-эксплуатационная откачка (ГОЭО) проводилась в 2012 г. в два этапа — в периоды зимней (20.03–23.04, 34 суток) и летней (21.06–4.10, 105 суток) межени. В опыте участвовали два водозаборных узла (ВЗУ), включающих 4 эксплуатационных и наблюдательную скважину глубиной в среднем 180 м. Режим откачки на обоих

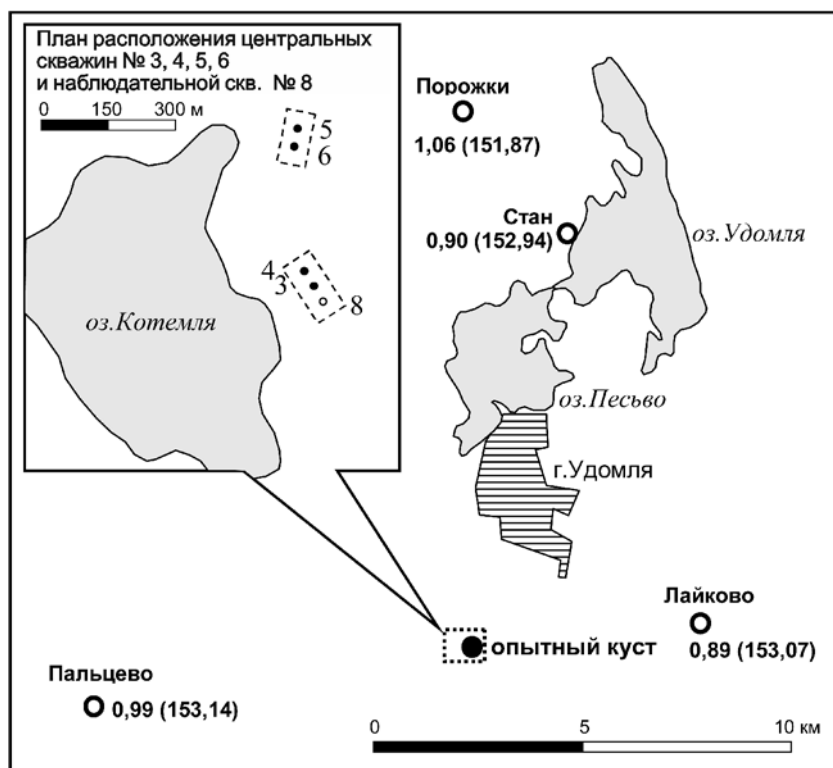


Рис. 1. Обзорная карта района проведения ГОЭО на Удомельском месторождении подземных вод. Цифры у пунктов наблюдения — конечное понижение уровня на летнем этапе, в скобках — абсолютная отметка пониженного уровня

этапах асинхронный; диапазон изменения суммарного дебита на зимнем этапе составил 13 520–27 270 м³/сут, на летнем — 20 640–46 080 м³/сут. При снижении и восстановлении уровней проводились непрерывные автоматические наблюдения за дебитом и уровнями в эксплуатационных и наблюдательных скважинах в деревнях Лайково (5000 м от опытного куста), Пальцево (9000 м), Стан (10500 м), Порожки (13000 м) (рис. 1). Дебит и уровни измеряли каждые 2 часа, атмосферного давления — 3 раза в сутки.

Анализ и корректировка данных ГОЭО. Первичная диагностика опытных данных проводится по графикам временного прослеживания для обоих этапов ГОЭО, а также по данным режимных наблюдений в предшествующий период преимущественно ненарушенного уровня режима. Во всех случаях графики имеют пилообразную форму с амплитудой колебаний 5–10 см и более (при величине понижений при ГОЭО около 1 м). Возможными причинами наблюдаемых осцилляций уровня могут быть:

— изменчивость дебита городского водозабора г. Удомля, эксплуатирующего вышележащий (над верейскими глинами) каширско-мячковский водоносный горизонт; однако при значительном удалении наблюдательных пунктов (5 км и более) этот фактор вряд ли может вызывать подобную реакцию в смежном алексинско-протвинском горизонте;

— влияние частых изменений атмосферного давления на положение уровня подземных вод в открытых скважинах;

— колебания суммарного дебита ГОЭО, однако они имеют скачкообразный характер и не могут приводить к постоянным волнообразным осцилляциям уровней. В периоды практически постоянного дебита подобные колебания уровней сохраняются.

Таким образом, наиболее вероятной причиной периодических малоамплитудных колебаний уровней можно предположить изменчивость атмосферного давления.

Введение поправки на изменения атмосферного давления. Необходимость учитывать изменчивость атмосферного давления в ходе ГОЭО диктуется малыми величинами (и низким темпом соответственно) понижения уровней. В таких условиях даже ординарные изменения атмосферного давления могут спровоцировать существенные диагностические ошибки, например, его монотонное снижение на 10–20 мм в течение 5–10 сут заметно задерживает темп понижения уровней, что может быть ошибочно диагностировано как наступление ложностационарного режима фильтрации.

Связь между колебаниями атмосферного давления и положением уровней подземных вод исследовали Н.Н. Биндеман, Ч. Джейкоб, В.М. Шестаков, В.С. Ковалевский и др. Обзор различных моделей этого явления подробно освещен в работе [Волейшо, 1984]. Согласно «гидрогеостатической» модели в стволе открытой скважины атмосферное давление полностью передается на уровень воды, а в водоносном пласте распределяется между поровой водой и скелетом водовмещающей породы, т.е. часть его изменения расходуется на уплотнение/разуплотнение породы. Таким образом, часть давления, приложенного к уровню воды в скважине, по отношению к водоносному горизонту оказывается неуравновешенной, и уровень воды в скважине понижается/повышается в соответствии с величиной давления, воспринимаемой скелетом водовмещающей породы. Количественно эта взаимосвязь выражается уравнением:

$$\Delta H = \frac{\beta \Delta P}{\gamma}, \quad (1)$$

где ΔP — амплитуда изменения атмосферного давления, ΔH — соответствующее изменение уровня подземных вод в скважине, β — барометрическая эффективность, γ — объемный вес воды (для пресных вод равен 1 г/см³).

Барометрическая эффективность (β) характеризует упругие свойства водоносного пласта и степень изоляции его от атмосферы и позволяет рассчитать упругоемкость водовмещающих пород (η^*), упругую водоотдачу пласта (μ^*) и пьезопроводность водоносного горизонта (a) [Ковалевский, 1986]:

$$\eta^* = \frac{n}{\beta E_w}; \quad \mu^* = m\eta^*; \quad a = \frac{km}{\mu^*}, \quad (2)$$

где n — пористость, k — коэффициент фильтрации водовмещающих отложений, m — мощность водоносного горизонта, E_w — модуль упругого сжатия воды.

По натурным наблюдениям диапазон барометрической эффективности для напорных водоносных горизонтов составляет от 0,20 до 0,95, а наименьшие погрешности оценки емкостных параметров по формуле (2) получаются при $\beta \approx 0,5$ [Волейшо, 1984].

Оценка влияния атмосферного давления на уровень подземных вод выполнена для пунктов Лайково, Стан и Порожки за период 03.2011—01.2012, предшествующий ГОЭО и характеризующийся отсутствием иных режимобразующих факторов природного или техногенного характера (за исключением отдельных интервалов активного режима при проведении пробных откачек.) Диапазон колебаний атмосферного давления за этот период (по метеостанции г. Удомля) составил 721–774 мм рт.ст., а колебание уровней алексинско-протвинского горизонта — $\sim 0,5$ м.

Барометрическая эффективность оценена по величине углового коэффициента C на графиках в координатах $\Delta H - \Delta P$. В соответствии с формулой (1) барометрическая эффективность равна (в согласованных размерностях)

$$\beta = \gamma C. \quad (3)$$

Для всех указанных пунктов наблюдения фактическая совокупность наблюдений уверенно аппроксимируется прямой линией с высокой степенью корреляции и незначительным среднеквадратическим отклонением (рис. 2, табл. 1). Полученные значения барометрической эффективности для всех пунктов практически совпадают (в среднем $\beta = 0,4333$). Согласно литературным данным [Волейшо, 1984], такое значение свидетельствует об изолированности водоносного горизонта при относительно небольшой глубине залегания, что соответствует условиям залегания алексинско-протвинского горизонта в гидрогеологическом разрезе Удомельского месторождения.

Таблица 1

Результаты режимных пьезобарометрических наблюдений

Пункты наблюдения	Барометрическая эффективность, β	Коэффициент корреляции	Среднеквадратическое отклонение, м	C , м/мм
Лайково	0,4366	–0,965	0,0085	–0,00594
Стан	0,4353	–0,946	0,0105	–0,00592
Порожки	0,4280	–0,963	0,0093	–0,00582
Среднее	0,4333	–0,958	0,0094	–0,0059

Оценка емкостных свойств алексинско-протвинских известняков по уравнениям (2) возможна лишь в обобщенном виде в связи с площадной неоднородностью фильтрационных свойств и неопределенностью параметров трещинной пустотности. При характерном для трещинно-карстового коллектора значении $n = 0,05$, мощности горизонта $m=70$ м и осредненной проводимости пласта $km=14\ 000\div15\ 000$ м²/сут упругость водовмещающих известняков составляет $\eta^*=5,2\cdot10^{-7}$ м⁻¹, упругая водоотдача пласта — $\mu^*=3,6\cdot10^{-5}$, а пьезопроводность — $3,8\cdot10^8$ м²/сут.

При практических расчетах уровневых поправок на изменения атмосферного давления удобнее пользоваться регрессионной связью ΔH и ΔP с размерностью давления мм рт. ст. Для Удомельского месторождения свободным членом регрессии можно пренебречь в силу его малости (0,0003 м); среднее значение углового коэффициента $C = -0,0059$ м/мм (табл. 1).

Для периода естественного режима барометрическая поправка вводится на величины напоров (абсолютная отметка уровня):

$$H = H^0 - C \cdot \Delta P,$$
 (4)

где H — скорректированное значение напора, H^0 — фактически наблюдаемое значение напора, ΔP рассчитывается как разность со значением атмосферного давления на некоторый условный начальный момент.

При введении барометрической поправки в значительной степени нивелируются вышеупомянутые осцилляции уровней; остаточные величины не превышают 1–2 см и связаны, скорее всего, с методическими погрешностями оценки барометрической эффективности.

Для периода ГОЭО (рис. 3) значения понижений S , откорректированных с учетом изменений атмосферного давления, определяются по формуле

$$S = S^0 + C \cdot \Delta P,$$
 (5)

где S^0 — фактически наблюдаемое понижение, ΔP рассчитывается как разность со значением атмосферного давления на момент пуска откачки (табл. 2).

Введение поправки на асинхронный режим дебита. В течение зимнего этапа ГОЭО дебит изменяли в две ступени, в течение летнего дебит изменялся несколько раз при включении/выключении разных скважин. Расстояния до пунктов наблюдения (5000–13000 м) значительно больше размеров площади расположения возмущающих скважин (около 350 м), поэтому введение поправки на асинхронный режим дебита можно осуществить по методу сосредоточенного скачкообразного

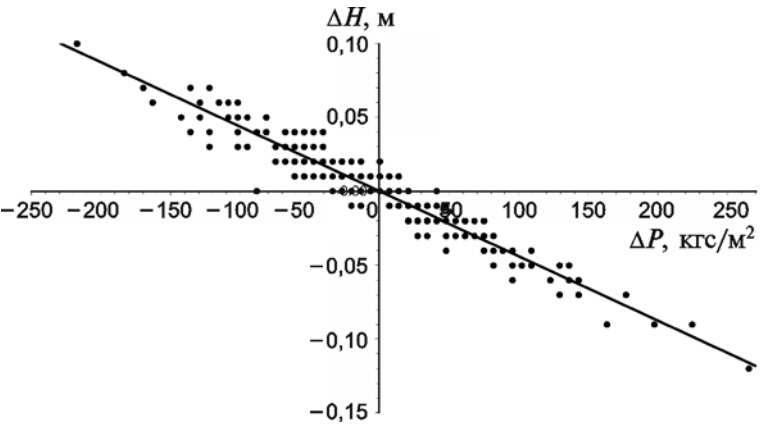


Рис. 2. График зависимости уровня подземных вод алексинско-протвинского водоносного горизонта ΔH от атмосферного давления ΔP (наблюдательный пункт Лайково)

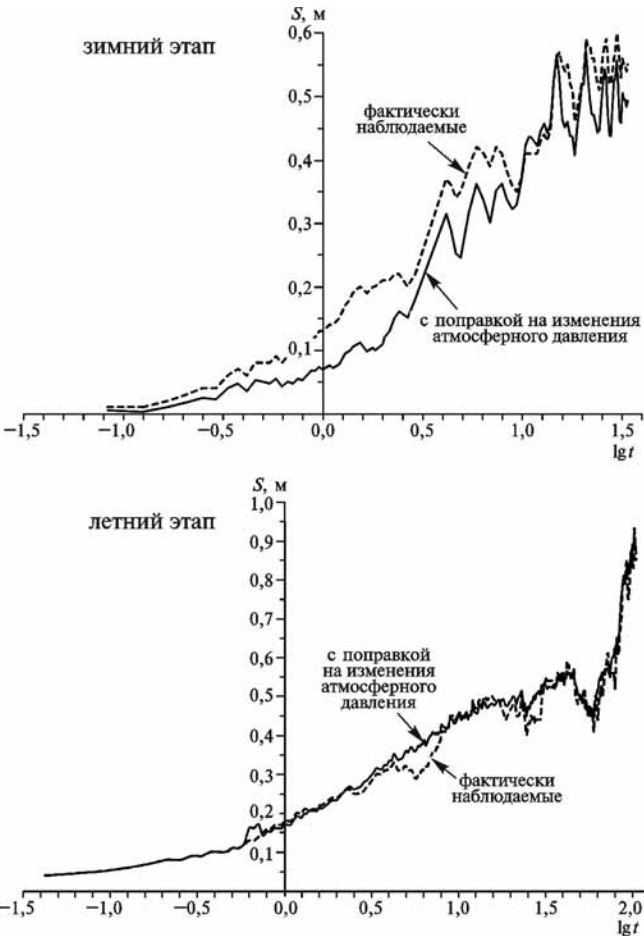


Рис. 3. Фактически наблюдаемые и откорректированные (с поправкой на изменения атмосферного давления) понижения уровня алексинско-протвинского водоносного горизонта (наблюдательный пункт Лайково)

Таблица 2
Основные показатели расчета барометрической поправки

Этап ГОЭО	Атмосферное давление, мм рт. ст.			Поправка, м	
	начальное	максимум	минимум	максимум	минимум
Зимний	732,2	749,9	727,4	0,028	−0,104
Восстановление	741,9	754,9	739,5	0,014	−0,077
Летний	747,9	754,5	734,1	0,081	−0,039

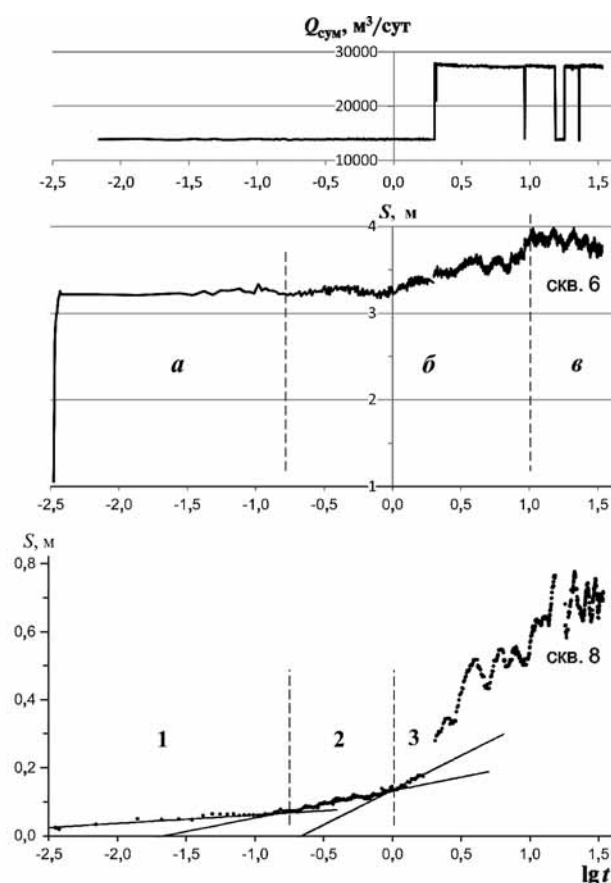


Рис. 4. Временное прослеживание снижения и восстановления уровней (по центральной скважине № 6 и наблюдательной скважине № 8) и суммарного дебита на зимнем этапе ГОЭО

возмущения [Боревский..., 1979], основанного на преобразовании уравнения Тейса–Джейкоба:

$$\varphi = \frac{0,183}{T} \lg \frac{2,25at_{\text{пр}}}{r^2}, \quad (6)$$

$$\lg t_{\text{пр}} = \frac{Q_1 \lg t \pm \Delta Q_1 \lg(t - t_2) \pm \dots \pm \Delta Q_{n-1} \lg(t - t_n)}{Q_n}, \quad (7)$$

где $\varphi = s/Q_n$ — удельное понижение; Q_n — суммарный дебит на n -й ступени изменения дебита; $\Delta Q_i = Q_{i+1} - Q_i$, $t_{2...n}$ — время начала соответствующих ступеней; t — текущее время от начала опыта; $t_{\text{пр}}$ — приведенное время.

Учитывая, что ежесуточные колебания дебита в ходе обоих этапов ГОЭО составляли 2–5% (эпизодически до 25–30%), привodka времени выполнена с длительностью ступеней 1 сут. Для устранения кратковременных колебаний и более четкого выявления закономерностей поведения уровней было выполнено линейное сглаживание временных графиков прослеживания (по 5 точкам).

Диагностика откорректированных данных ГОЭО. Диагностика откорректированных (с учетом изменения атмосферного давления и дебита) данных обоих этапов опытно-эксплуатационного опробования проводится путем комплексного анализа графиков временного, комбинированного

и площадного прослеживания понижения и восстановления уровней в центральных и наблюдательных скважинах.

Центральные и наблюдательные скважины в составе ВЗУ. На зимнем этапе во всех центральных скважинах в течение первых 0,5–1,5 мин наблюдается скачок уровня от 2 до 6 м (рис. 4, табл. 3), свидетельствующий о несовершенстве при-скважинной зоны, несмотря на то что скважины в рабочем интервале имеют открытый ствол. После этого графики прослеживания резко выполаживаются (рис. 4, участок *а*) и лишь через 4–5 ч начинается постепенное возрастание их крутизны (рис. 4, участок *б*), сохраняющееся примерно до 10 сут, после чего происходит практическая стабилизация уровней (рис. 4, участок *в*). Эти общие тенденции осложнены несистематическими колебаниями уровней на 0,2–0,3 м, не сопоставляющимися с изменениями дебита и вызванными, вероятно, внешними режимобразующими воздействиями.

Аналогичная форма кривых прослеживания подтверждается и по наблюдательной скважине № 8 (рис. 4).

Учитывая практически мгновенное наступление квазистационарного режима (не более 1–2 мин даже для наблюдательной скважины № 8, удаленной на 300 м от площадки центральных скважин № 5 и 6), можно предположить две равноправные причины существования пологого участка *а*: 1) он может быть обусловлен проявлением эффекта «двойной пористости», свойственного трещинно-карстовым коллекторам («трещинно-трещинная» среда [Боревский..., 1979]); 2) он может характеризовать чрезвычайно высокую проводимость пласта в зоне расположения опытного куста, а последующее монотонное возрастание уклона графика свидетельствует об ограниченности этой зоны и ухудшении фильтрационных свойств пласта в основной части месторождения.

На летнем этапе ГОЭО форма графиков прослеживания понижений и восстановления не противоречит описанному для зимнего этапа, но здесь не иллюстрируется в связи со сложным не-закономерным режимом откачки.

Удаленные наблюдательные скважины. Графики временного прослеживания для всех этапов сниже-

Таблица 3

Данные по скважинам в составе ВЗУ (зимний этап)

Номер скважины	Средний дебит, м³/сут	Конечное понижение, м	Величина скачка уровня, м
3 (центральная)	6765	6,40	~6
4 (центральная)	6815	2,90	~2
5 (центральная)	7035	3,50	~3
6 (центральная)	6720	3,70	~3
8 (наблюдательная)	—	0,70	—

ния и восстановления уровней в удаленных наблюдательных скважинах близки по форме (рис. 5, табл. 4), что позволяет говорить о единообразии факторов, обуславливающих пространственно-временное развитие воронки депрессии. Характерна чрезвычайно быстрая реакция наблюдательных скважин на возмущение (2–4 ч при расстоянии более 5 км), что свидетельствует об очень высокой пьезопроводности, которая обусловлена высокой проводимостью и незначительной трещинно-карстовой пустотностью известняков.

На графиках временного прослеживания удельных понижений $\phi - \lg t_{пр}$ на летнем, более продолжительном этапе выделяются три основных периода (рис. 5):

I — после наступления квазистационарного режима во всех скважинах темп снижения несколько возрастает, но уже к концу первых суток наблюдается выход на практически прямолинейный участок, устойчиво сохраняющийся до 10 сут;

II — далее происходит достаточно ясно выраженное (особенно для ближних скважин) замедление темпа снижения, устойчиво продолжающееся до 50 сут;

III — на завершающей стадии летней откачки вновь происходит возрастание темпа снижения. Оно выражено не вполне отчетливо, поскольку осложнено разнонаправленными колебаниями уровней, связанными, по-видимому, с естественными режимными процессами в августе–сентябре 2012 г. По этой же причине недостаточно подтверждается и выполаживание графиков перед окончанием откачки.

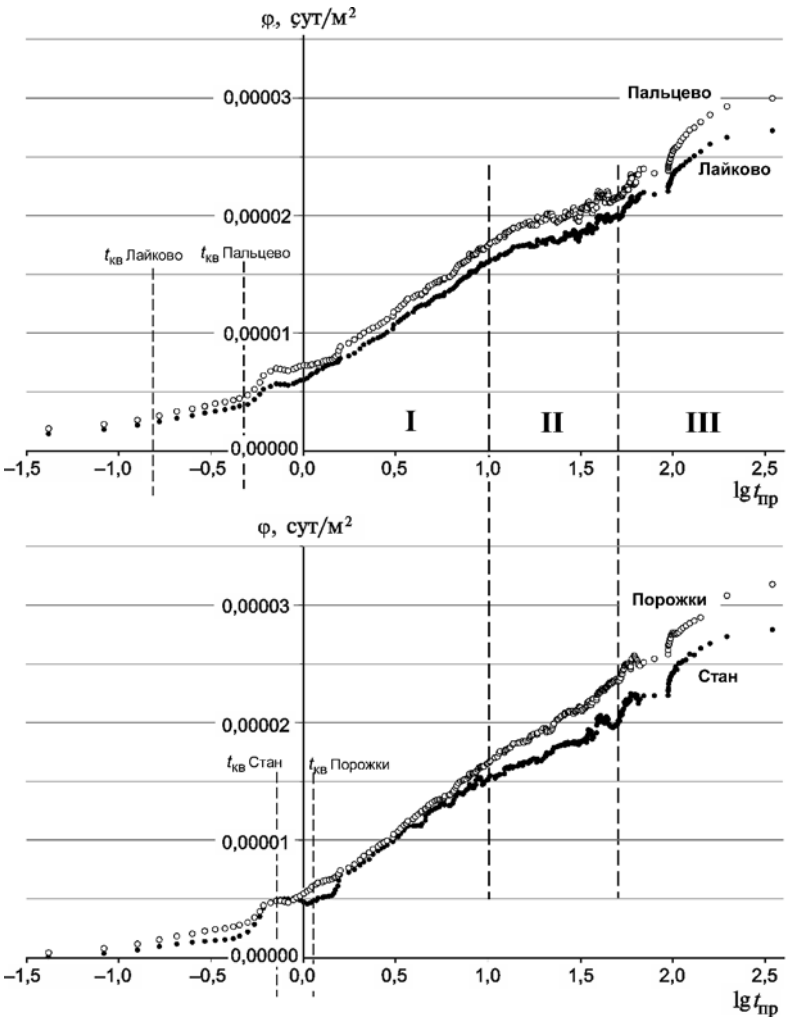


Рис. 5. Временное прослеживание удельных понижений в наблюдательных скважинах на летнем этапе ГОЭО

На зимнем этапе ГОЭО в целом подтверждается выделение участков I и II, однако временное прослеживание также существенно осложнено режимными колебаниями уровней (конец марта–апрель 2012 г.), наличие которых отчетливо видно при синхронизированном сопоставлении временного прослеживания на зимнем и летнем этапах опробования и при восстановлении уровней после зимнего этапа (рис. 6).

Площадное прослеживание на обоих этапах ГОЭО критически деформировано (табл. 4). Можно предполагать две основные природные причины, обуславливающие незакономерное площадное распределение единовременных понижений уровня:

1) существенная фильтрационная макронеоднородность коллектора в области, охваченной депрессией уровней. В зонах с относительно невысокой проводимостью понижение уровней отстает во времени и при равных радиальных координатах меньше, чем в смежных зонах с более высокой проводимостью. В частности, понижение уровня в наиболее близком пункте наблюдения Лайково меньше, чем в остальных, значительно более

Таблица 4

Данные по удаленным наблюдательным скважинам

Пункт, <i>r</i> , м	Время наступления квазистационарного режима		Конечные понижения			
			зимний этап		летний этап	
	<i>t</i>	$\lg t$	<i>S</i> , м	ϕ , сут/м ²	<i>S</i> , м	ϕ , сут/м ²
Лайково, 5000 м	4 ч	−0,8	0,49	$1,81 \cdot 10^{-5}$	0,89	$2,77 \cdot 10^{-5}$
Пальцево, 9000 м	12 ч	−0,3	0,66	$2,44 \cdot 10^{-5}$	0,99	$3,05 \cdot 10^{-5}$
Стан, 10 500 м	17 ч	−0,15	0,51	$1,87 \cdot 10^{-5}$	0,90	$2,80 \cdot 10^{-5}$
Порожки, 13 000 м	1,1 сут	0,05	0,48	$1,78 \cdot 10^{-5}$	1,06	$3,30 \cdot 10^{-5}$

* При пьезопроводности $3,8 \cdot 10^8$ м²/сут (по данным пьезобарометрических наблюдений).

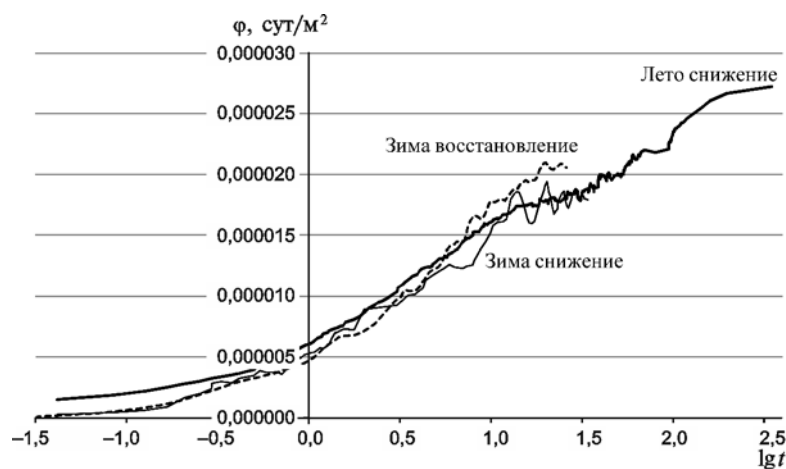


Рис. 6. Сопоставление режимов временного прослеживания удельных понижений по наблюдательному пункту Лайково

удаленных пунктах, что позволяет предполагать здесь пониженную проводимость по сравнению с остальной областью месторождения;

2) другой вероятной причиной может быть проявление естественных режимных процессов, различающихся по интенсивности в разных частях области. Так, например, в пункте Порожки конечное понижение на зимнем этапе меньше, чем во всех остальных, а на летнем этапе, напротив, самое высокое (табл. 4).

Существование фильтрационной макроеднородности подтверждается «гребенчатым» расчленением графика комбинированного прослеживания — чем больше радиальная координата точки наблюдения, тем больше ее график сдвинут влево по оси абсцисс (рис. 7). Такой вид комбинированного прослеживания — характерный признак существования крупных зон пониженной проводимости в области влияния откачки [Максимова, Штенгелов, 2003]. Можно полагать, что пониженная проводимость пласта существует в восточном направлении, где наблюдаются аномально низкие понижения при малых радиальных координатах (пункт Лайково).

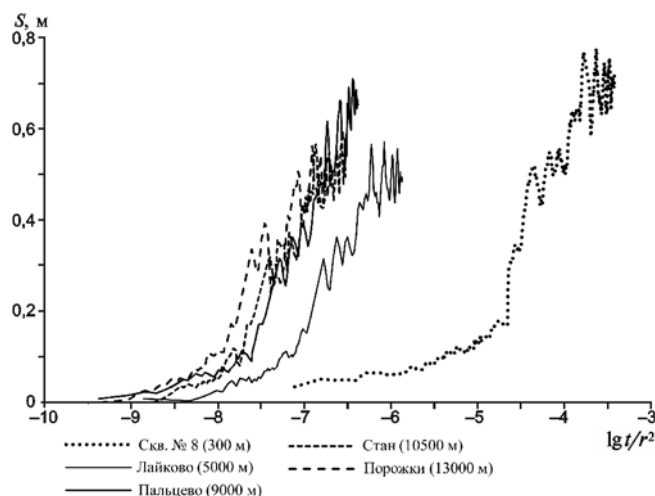


Рис. 7. Комбинированное прослеживание понижений на зимнем этапе ГОЭО

По совокупности рассмотренных диагностических признаков представляется возможным сделать следующие выводы:

- 1) алексинско-протвинский водоносный горизонт в области Удомельского месторождения, охваченной депрессионной воронкой ГОЭО, обладает значимой фильтрационной макроеднородностью;
- 2) наибольшей проводимостью обладает участок расположения разведочно-эксплуатационных скважин и зона на западе от него;
- 3) уменьшение проводимости происходит при погружении водоносного горизонта в восточном направлении;
- 4) на начальной стадии откачки (около 0,5 сут) проявляется эффект «двойной пористости», задерживающий развитие понижений в опытных скважинах;
- 5) интегральный темп снижения уровней на участке I, устанавливающийся через 1,5–2 сут, отвечает обобщенным параметрам алексинско-протвинского водоносного горизонта в области депрессии.
- 6) участок II (в интервале 10–50 сут) можно квалифицировать как зону ложностационарного режима, вызванного началом взаимодействия с вышележащим каширско-мячковским напорным водоносным горизонтом через верейские глины;
- 7) участок III предположительно отвечает совместному снижению уровней алексинско-протвинского и каширско-мячковского горизонтов, однако в силу малых абсолютных величин понижений на этом участке (не более 0,2 м) и вероятного проявления естественных режимных процессов надежное инструментальное фиксирование взаимодействия водоносных горизонтов проблематично.

Оценка гидрогеодинамических параметров по данным ГОЭО. Исходя из диагностических выводов по данным ГОЭО для количественной идентификации доступны параметры проводимости алексинско-протвинского водоносного горизонта (в зоне ВЗУ и в обобщенном виде для области месторождения), а также параметры его взаимодействия с каширско-мячковским горизонтом.

Проводимость алексинско-протвинского горизонта в зоне ВЗУ идентифицируется неоднозначно. Если исходить из модели однородной трещинной среды, то расчетным для наблюдательной скважины № 8 следует принимать участок 1 (рис. 4), уклон которого отвечает проводимости около 100–105 тыс. м²/сут. Тогда участок 2 (рис. 4) соответствует постепенному выходу воронки в основную область месторождения с существенно меньшей проводимостью. Если же участок 1 рассматривать как ложностационарный в «трещинно-трещинной»

среде, то проводимость зоны ВЗУ следует оценивать по уклону участка 2 — 30–32 тыс. м²/сут. Эта оценка представляется более вероятной, поскольку согласуется с ориентировочной (за вычетом начального скачка уровней) величиной удельного дебита около 15–20 тыс. м²/сут для скважин № 5, 6.

Уклон графика на участке 3 (рис. 4) в любом случае отвечает уже обобщенной проводимости области месторождения 12,5 тыс. м²/сут.

Обработка временного прослеживания в удаленных наблюдательных скважинах выполнена по участкам I и II по расчетной схеме неограниченного напорного пласта с перетеканием при постоянном уровне в смежном пласте методом билогарифмической эталонной кривой (рис. 8), позволяющим оценить обобщенную проводимость и пьезопроводность алексинско-протвинского водоносного горизонта и фактор перетекания для разделяющей верейской толщи. Результаты оценок для всех этапов ГОЭО представлены в табл. 5. Значения обобщенной для области месторождения проводимости имеют порядок $T = n \cdot 10^4$ м²/сут при генеральном среднем 11 720 м²/сут. Максимальные значения фиксируются для пункта Лайково, минимальные — для пунктов Пальцево и Стан. Такое различие оценок (на 25–30%) косвенно подтверждает предположение о пониженной проводимости в сторону пункта Лайково, поскольку при нарушении предпосылки о равномерно-радиальном притоке в условиях крупных зон неоднородности создается обратный эффект — по наблюдательным скважинам в зонах с низкой проводимостью ее величина получается формально завышенной, а по скважинам в зонах с высокой проводимостью, наоборот, заниженной. То же относится и к величине упругой водоотдачи (генеральное среднее $\mu^* = 2,7 \cdot 10^{-4}$), поскольку депрессионная воронка в зонах пониженной проводимости развивается медленнее, что создает ложный эффект низкой пьезопроводности.

Фильтрационные свойства разделяющего слоя верейских глин оцениваются по величине фактора перетекания B :

$$K = \frac{m_0 T}{B^2},$$

что при средней мощности $m_0 = 20$ м дает значение обобщенного коэффициента фильтрации — $K_0 = 1,7 \cdot 10^{-4}$ м/сут.

Выводы. 1. Опыт проведения группового опытно-эксплуатационного опробования на Удомельском месторождении подземных вод подтверждает существование известных методических и технических сложностей, значительно снижающих достоверность диагностики и идентификации параметров опробуемой водоносной системы.

2. Даже при опробовании относительно глубоко залегающих межпластовых водоносных горизонтов принципиальное значение для диагностики

Таблица 5

Результаты оценки гидрогеодинамических параметров

Этап	T , м ² /сут	B , м	K_0 , м/сут	a , м ² /сут	μ^*
Лайково					
Зимний	$\frac{14\ 850}{12\ 290}$	$\frac{34\ 620}{31\ 870}$	$\frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{2,4 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{2,1 \cdot 10^7}{2,0 \cdot 10^7}$	$\frac{7,1 \cdot 10^{-4}}{6,1 \cdot 10^{-4}}$
Летний (снижение)	15 290	33 290	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^7$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
Среднее	14 145	33 260	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^7$	$5,9 \cdot 10^{-4}$
Пальцево					
Зимний	$\frac{10\ 090}{11\ 010}$	$\frac{36\ 000}{45\ 000}$	$\frac{1,6 \cdot 10^{-4}}{1,1 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{2,9 \cdot 10^7}{4,5 \cdot 10^7}$	$\frac{3,4 \cdot 10^{-4}}{2,5 \cdot 10^{-4}}$
Летний (снижение)	11 210	33 825	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Среднее	10 770	38 275	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Стан					
Зимний	$\frac{10\ 670}{10\ 230}$	$\frac{31\ 780}{32\ 660}$	$\frac{2,1 \cdot 10^{-4}}{1,9 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{5,2 \cdot 10^7}{4,4 \cdot 10^7}$	$\frac{2,1 \cdot 10^{-4}}{2,3 \cdot 10^{-4}}$
Летний (снижение)	11 120	30 550	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Среднее	10 670	31 660	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Порожки					
Зимний	$\frac{11\ 860}{12\ 070}$	$\frac{36\ 890}{60\ 945}$	$\frac{1,7 \cdot 10^{-4}}{6,5 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{1,2 \cdot 10^8}{7,4 \cdot 10^7}$	$\frac{9,9 \cdot 10^{-5}}{1,6 \cdot 10^{-4}}$
Летний (снижение)	11 920	51 990	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Среднее	11 950	49 940	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Генеральное среднее*	11 720	36 790	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^{-4}$

Примечания. Над чертой — снижение, под чертой — восстановление. *За вычетом пары экстремальных значений.

опытных данных имеют проявления внешних природных и техногенных режимобразующих факторов. Особенно важно это при длительных опытах и при небольших понижениях уровня в высокопроницаемых коллекторах (в первую очередь в трещинно-карстовых). Количественный учет этих обстоятельств возможен путем введения поправок на основе парных и множественных корреляционных связей, что в методическом смысле требует существенного расширения временных границ опыта, охватывающих разные гидрометеорологические сезоны до и после завершения ОЭО, и проведения комплексных режимных наблюдений за метеоэлементами и уровнями в опробуемом и смежных горизонтах, на гидропостах и ближайших действующих водозаборах.

3. Временное прослеживание понижений весьма чувствительно к незакономерным разнонаправленным колебаниям дебита. Существующие приемы расчета приведенного времени основаны на квазистационарном решении (уравнения 6–7). Поэтому для удаленных скважин, в которых время наступления квазистационара больше длительно-

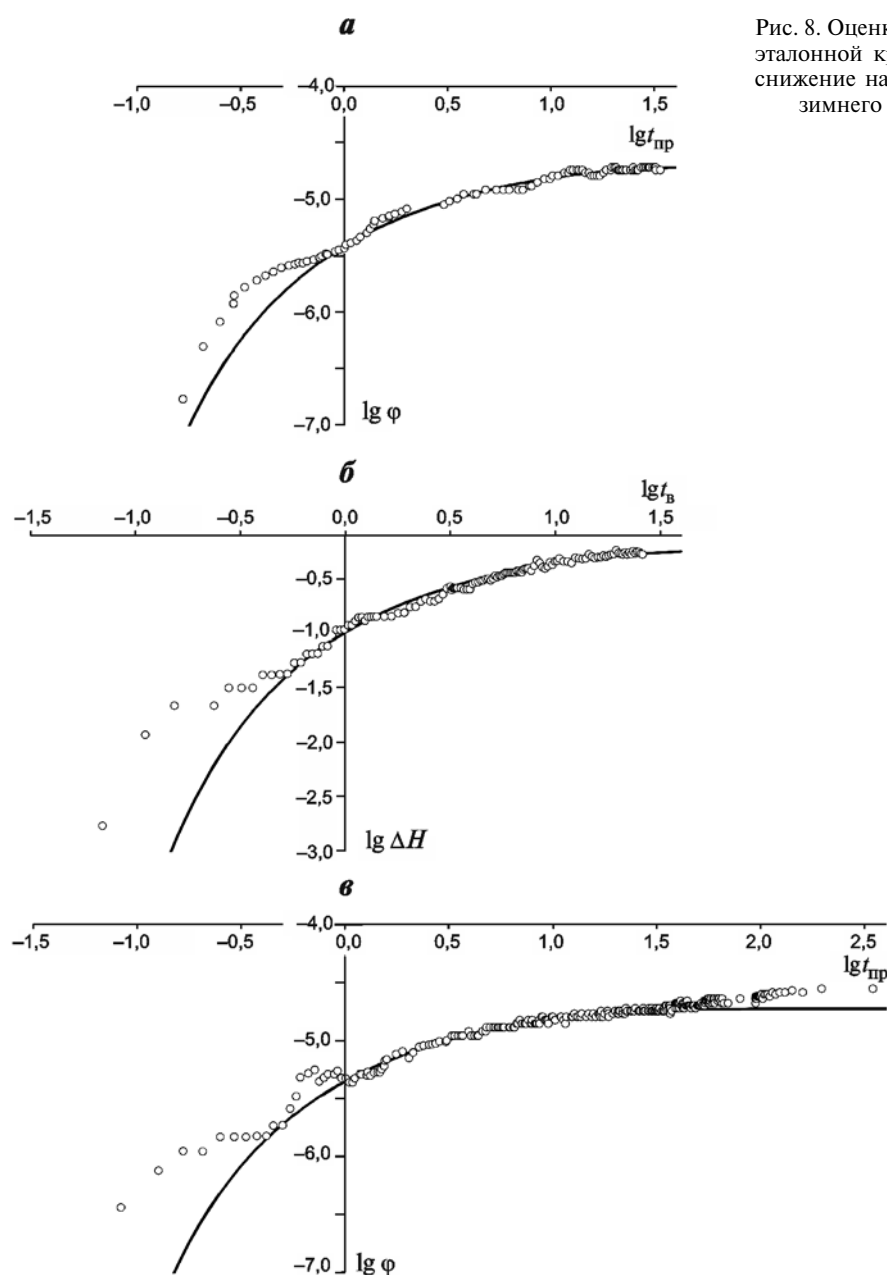


Рис. 8. Оценка параметров методом билогарифмической эталонной кривой (наблюдательный пункт Стан, *a* — снижение на зимнем этапе, *b* — восстановление после зимнего этапа, *v* — снижение на летнем этапе)

сти периодов колебания дебита, использование приведенного времени приводит к хаотическому нарушению временного прослеживания. Необходимы надежное техническое обеспечение постоянства дебита и четкая фиксация моментов его изменения при ступенчатом опробовании.

4. Использование «обобщенных» параметров в макронеоднородных и/или гетерогенных коллекторах может приводить к значительным погрешностям прогнозных расчетов понижений в центральных скважинах, поскольку при этом не учитываются локальные процессы в ближайшей области. Так, теоретический расчет понижения в скважине № 6 на время 2 сут во время зимнего этапа с использованием обобщенных для всей области параметров проводимости и пьезопроводности (табл. 5) дает величину около 1,7 м при фактически наблюдаемой не более 0,35–0,4 м (за

вычетом начального скачка уровня, табл. 3); такая разность параметров определяется фактической длительной задержкой понижения на ложностационарном этапе.

5. Прогноз неравномерной работы компенсационного водозабора по периодическому диспетчерскому графику [Болгов..., 2012] на участке «Елманова Горка» будет выполняться с использованием гидрогеодинамического моделирования. Результаты выполненного ГОЭО дают основу для постановки на разрабатываемой модели обратной калибрационной задачи с использованием предварительного значения параметра перетекания через верейские глины ($\chi_0 \approx 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ сут}^{-1}$) и данных временного прослеживания в наблюдательных скважинах как индикаторов согласования при подборе фильтрационной макронеоднородности алексинско-протвинского водоносного горизонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беляков М.В. Влияние отбора подземных вод для подпитки озер-охладителей реакторных блоков Калининской АЭС на изменение их водного баланса // Геозкология. 2011. № 3. С. 254–264.

Болгов М.В., Штенгелов Р.С., Маслов А.А., Филимонова Е.А. Оценка эффективности комбинированного использования поверхностных и подземных вод для технического водоснабжения Калининской АЭС // Водные ресурсы. 2012. № 2. С. 218–226.

Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. 2-е изд. М.: Недра, 1979. 326 с.

Волейшо В.О. Гидрогеологическая реакция подземных вод на проявления внешних природных сил атмосферного давления, океанических и земных приливов // Гидрогеология и инженерная геология. М.: ВИЭМС, 1984. 57 с.

Ковалевский В.С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией. М.: Недра, 1986. 198 с.

Максимова Е.С., Штенгелов Р.С. Диагностика и интерпретация опытно-фильтрационного опробования полосообразных водоносных пластов // Проблемы гидрогеологии XXI века: наука и образование. М.: Изд-во РУДН, 2003. С. 325–341.

Поступила в редакцию
01.03.2017

УДК 504.06

М.Л. Кулешова¹, Н.Н. Данченко², В.Л. Косоруков³,
В.И. Сергеев⁴, Т.Г. Шимко⁵

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ–ДЕСОРБЦИИ СТРОНЦИЯ И ЦЕЗИЯ НА БЕНТОНИТАХ РАЗНОГО СОСТАВА

В статическом режиме проведено насыщение цезием и стронцием пяти образцов бентонитов разного состава и генезиса. Десорбцию изучали в условиях фильтрации дистиллированной воды через насыщенные образцы. Большинство образцов бентонитов эффективно удерживают оба элемента: десорбция Cs составила 12–20%, Sr — 2,5–23%. Структурные изменения, происходящие в глинистой фракции бентонитов в результате сорбции, а затем вымывания Cs и Sr изучались с помощью метода рентгеновской дифрактометрии.

Ключевые слова: бентониты, Cs, Sr, сорбция, десорбция, рентгеноструктурные исследования.

Five bentonites samples of the different composition were saturated with Cs and Sr under the static conditions. The desorption were examined under the filtration of distilled water through the saturated bentonite samples. Most of the studied bentonites effectively retarded both Cs and Sr. Cs desorption values were 12–20%, and Sr desorption — 2,5–23%. Structural alterations took place in the clay fraction of bentonites as a result of the sorption-desorption processes were studied by X-ray diffraction.

Key words: bentonites, Cs, Sr, sorption, desorption, structure alteration, X-ray diffraction study.

Введение. При решении задач охраны подземных и поверхностных вод от загрязнения в районах размещения токсичных и радиоактивных отходов все большую актуальность приобретает использование протекторных свойств природных грунтов наиболее доступных материалов для защитных экранов. Бентонитовые глины обладают уникальной комбинацией свойств (высокой сорбционной емкостью, экстремально низкими фильтрационными характеристиками и термической устойчивостью) и в наибольшей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалам геохимических барьеров (горизонтальные и вертикальные экраны в ложе накопителей отходов, наполнители пространства между контейнерами и стенками хранилища РАО) [Лаверов, 2000, 2008; Сабодина, 2008].

При планировании сооружения противомиграционных и провифильтрационных экранов важно оценить эффективность работы природных дисперсных грунтов в качестве геохимического барьера для конкретного объекта. В.И. Сергеевым с сотрудниками разработан способ количественной

оценки естественных и искусственных грунтовых экранов как геохимических барьеров на пути миграции опасных элементов, содержащихся в отходах [Сергеев и др., 1993, 2002]. Способ основан на определении поглощающей способности грунтов конкретного объекта, расчете миграционных параметров элементов-загрязнителей по данным экспериментов и математического моделирования их массопереноса. На практике количественная оценка позволяет установить время, в течение которого предприятие может складировать свои отходы на участке, не загрязняя подземные воды. Однако и после прекращения эксплуатации объекта и его консервации возможен выход загрязнителей за пределы защитного экрана за счет их десорбции под влиянием инфильтрации атмосферных осадков и т.п. Таким образом, определение поглощающей способности грунтов, выбранных в качестве материала экрана, по отношению к элементам-загрязнителям, а также выявление возможной степени их десорбции из грунтов необходимо для количественной оценки возможного времени эксплуатации хранилища отходов.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, лаборатория охраны геологической среды и взаимодействия подземных и поверхностных вод, ст. науч. с.; *e-mail:* rita5715@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, лаборатория охраны геологической среды и взаимодействия подземных и поверхностных вод, ст. науч. с.; *e-mail:* nataly danch@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра литологии и морской геологии, ст. преподаватель; *e-mail:* aberkin@mail.ru

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, лаборатория охраны геологической среды и взаимодействия подземных и поверхностных вод, профессор; *e-mail:* bazismo@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, лаборатория охраны геологической среды и взаимодействия подземных и поверхностных вод, вед. науч. с.; *e-mail:* shimko@geol.msu.ru

Изучение сорбционно-десорбционного поведения Cs и Sr на бентонитовых глинах — важное направление исследований, связанных с радиационной безопасностью, так как их изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr представляют собой одни из наиболее экологически опасных компонентов радиоактивных отходов (РАО). Им посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных авторов: определены коэффициенты распределения этих элементов между раствором и грунтом в разных условиях, получены и описаны изотермы [Сабодина, 2008; Hsu, Chang, 1994; Galamboš et al., 2009, 2010; Murali et al., 2002; Yildiz et al., 2011]. В нескольких работах дана приблизительная оценка степени десорбции [Lima et al., 1998; Khan, 2003; Маслова, 2014]. Однако в большинстве работ используются мономинеральные коммерческие образцы (Na-монтмориллонит) либо один или два вида бентонита, но при этом авторы указанных работ не приводят подробные характеристики состава этих образцов. В нашей недавней публикации [Кулешова и др., 2014] были изложены результаты сравнительного исследования сорбционных свойств пяти разновидностей бентонитовых глин, различающихся по возрасту, генезису и составу в отношении Cs и Sr.

В продолжение этой темы мы изучали десорбцию Cs и Sr из бентонитов в динамическом режиме при фильтрации дистиллированной воды, а также структурные изменения, происходящие с глинистой фракцией этих бентонитов в результате: 1) насыщения ионами Cs и Sr; 2) их последующей частичной десорбции в процессе промывания водой. Изучение процесса десорбции Cs и Sr позволит оценить долю обратимо сорбированных ионов, которые способны мигрировать при воздействии на загрязненную экранирующую грунтовую толщу атмосферных осадков или на фильтрационный поток подземных вод, для более точного прогноза ее эффективности при длительной иммобилизации

загрязнителей при сооружении защитных экранов в местах депонирования РАО. Рентгеноструктурные исследования позволят сделать некоторые выводы о возможных механизмах и местах фиксации Cs и Sr на бентонитах.

Материалы и методы исследования. В качестве объектов исследования использованы 5 образцов бентонитовых глин: Б1 — бентонит щелочной из Асканского месторождения (Грузия) гидротермально-метасоматического генезиса; Б2 — бентонит (щелочной) из Огланлинского месторождения (Туркмения) вулканогенно-осадочного типа, морского подтипа; Б3 — бентонит щелочноземельный из Дашковского месторождения (Московская обл., г. Серпухов) терригенно-коллоидно-осадочного типа, континентального подтипа; Б4 — бентонит щелочноземельный из Зырянского месторождения (Курганская обл.) терригенно-коллоидно-осадочного типа, континентального подтипа; Б5 — бентонит щелочноземельный из Дашуковского месторождения (Черкасская обл., Украина) терригенно-коллоидно-осадочного типа, морского подтипа, промышленно-модифицированный. Их подробная характеристика приведена в статье [Кулешова и др., 2014].

Наиболее важные показатели минерального, гранулометрического и химического состава исследуемых образцов, которые потенциально могут влиять на процессы сорбции-десорбции и могут быть полезны при обсуждении полученных результатов, приведены в табл. 1.

Исходные грунты насыщали Cs и Sr в статических условиях до содержания элементов, близкого к предельному значению в грунте, на основе ранее полученных данных [Кулешова и др., 2014]. Насыщали образцы растворами нитратов Sr и Cs, приготовленными из солей квалификации «х.ч.». Навеска грунта уравнивалась с раствором, содержащим около 1 г/л соответствующего элемента при соотношении грунт: раствор = 1:50 (10 г грунта

Характеристика состава исследуемых образцов бентонитовых глин

Таблица 1

Образец бентонита	Минеральный состав, %							Химический состав, %					Гранулометриче- ский состав, %	
	смектиты		карбонаты		гидро- слюда	каоли- нит	цеолит	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	фракции	
	Na	Ca—Mg	кальцит	доломит									<0,01	<0,001
асканский (Б1)	83	—	—	—	1	—	13	2,66	1,45	1,58	3,16	4,36	92,2	59
	83							4,11		4,71				
огланлинский (Б2)	70	—	—	—	4	13,5	9	0,94	0,24	1,58	2,39	1,13	73	43
	70							1,18		3,97				
дашковский (Б3)	—	70	4,7	3,9	2	—	—	0,59	3,14	1,23	3,38	6,10	87	74
	70							3,73		4,61				
зырянский (Б4)	38	29	—	4,5	—	4,5	—	1,40	1,75	1,40	1,75	6,90	88	71
	67							3,15		3,15				
дашуковский (Б5)	48	24	—	2	—	2		4,38	0,18	1,40	1,25	6,55	95	86
	72							4,56		2,65				

и 500 мл раствора), время экспозиции 1 сут. По истечении этого срока раствор декантировали и фильтровали через запаренный тройной бумажный фильтр. Образцы бентонитов высушивали и в таком виде использовали для экспериментов по десорбции.

Так как задачей исследования было оценить десорбцию в условиях непрерывной фильтрации в сжатые сроки, отведенные под эксперимент, для повышения фильтрующей способности образцы бентонитов, насыщенные Sr и Cs, смешивали с мелкозернистым кварцевым песком. Соотношение бентонит:песок составляло 1:8 (5 г бентонита и 40 г песка). Кварцевый песок был предварительно отмыт кислотой для удаления всех неинертных примесей. Бентонитово-песчаные образцы помещали в колонки сечением 7,06 см² и высотой 4 см, через которые с постоянной скоростью фильтровалась дистиллированная вода. Скорость фильтрации (V_f) в экспериментах составляла около 0,2 м/сут.

В последовательных порциях фильтрата определяли концентрацию десорбирующегося элемента (Sr или Cs). Остаточное содержание элемента в грунте рассчитывали по разнице между исходным количеством сорбированного элемента и вынесенным в процессе фильтрации. Величину предельно возможной десорбции элемента-сорбата для каждого из исследованных образцов оценивали на этапе фильтрации, когда заканчивался интенсивный вынос элемента, а его концентрация в пробах приближалась к пределу определения метода анализа (ААС в пламени).

Структурные исследования образцов проводили методом рентгеновской дифрактометрии с использованием прибора «ДРОН-3М». Оценивали изменения в структуре смектитовой составляющей бентонитов при поглощении и десорбции ионов Sr и Cs. Так как изучаемые грунты состоят преимущественно из глинистой фракции, исследования проводились на фракции <0,002. Влияние частичного вымывания ионов-сорбатов при длительной фильтрации дистиллированной воды на структуру смектита определяли для насыщенных стронцием образцов Б1, Б2, Б4, Б5, а также для насыщенного цезием образца Б1.

Результаты исследований и их обсуждение.

Исследование десорбции. Изучение процесса десорбции поглощенных элементов из бентонитов представляет собой весьма сложную задачу из-за их низкой фильтрующей способности. За исключением нескольких указанных выше публикаций такие данные практически отсутствуют. Результаты исследований процесса десорбции Cs и Sr из насыщенных этими элементами бентонитовых глин представлены в виде графиков зависимости остаточного содержания сорбированного элемента в грунте (%) от объема профильтровавшейся дистиллированной воды (рис. 1, рис. 2 соответственно).

Все графики десорбции имеют вид плавно спадающих кривых, асимптотически приближающихся к постоянному значению. Как видно на графиках, большинство исследованных образцов достаточно прочно удерживает Cs и Sr. Существенное вымывание наблюдается только для зырянского бентонита (Б4), который отличается от относящегося к тому же подтипу дашковского бентонита (Б3) более низким содержанием щелочных металлов и смешанным составом смектитовой составляющей (табл. 1).

Обобщенные количественные результаты сорбционно-десорбционных исследований бентонитовых глин приведены в табл. 2.

Таблица 2

Количественные характеристики сорбционно-десорбционного поведения Cs и Sr на бентонитах разного состава и генезиса

Бентониты	Cs		Sr	
	сорбция, мэкв/г	десорбция, %	сорбция, мэкв/г	десорбция, %
Асканский (Б1)	0,29	12	0,63	8
Огланлинский (Б2)	0,25	18	0,48	23
Дашковский (Б3)	0,27	20	0,42	15
Зырянский (Б4)	0,22	49	0,48	43
Дашуковский (Б5)	0,34	15	1,24	2,5

Кривые десорбции (рис. 1, 2) и вычисленные по ним величины суммарной десорбции (табл. 2) показывают, что прочность закрепления, поглощенного бентонитами Sr, в среднем несколько выше, чем Cs. Для цезия значения величины десорбции для большинства исследованных бентонитов (исключая образец Б4) укладываются в достаточно узкий интервал — 12–20%. Десорбция стронция характеризуется более широким разбросом величин для разных образцов — от 2,5 до 23% (исключая образец Б4). Выделяется образец зырянского бентонита (Б4), в котором установлено наиболее слабое закрепление как Cs, так и Sr (величина десорбции Cs составляет 49%, а Sr — 43%), что объясняется, по всей видимости, структурными особенностями этой глины. Наиболее прочная фиксация Sr отмечена в дашуковском бентоните (десорбция всего 2,5%), что, вероятно, определяется максимальной среди образцов дисперсностью этой глины и обогащенностью обменного комплекса смектитов ионами Na за счет промышленной обработки. В работе [Khan, 2003] десорбцию с бентонита оценивали в статических условиях под действием 0,01 М раствора CaCl₂ и установили, что необратимо сорбируется (т.е. не вымывается) около 95% Cs и 85–90% Sr, поглощенных в течение от 5 мин до 24 ч для Cs и 30 мин для Sr. Однако эти данные сложно сравнить с величинами, полученными нами, так как помимо того, что использовался статический режим и рас-

твор CaCl_2 , в этой статье точно не указано, к каким именно этапам эксперимента относятся эти показатели десорбции.

В работе [Lima et al., 1998] приведены результаты исследования десорбции при промывании дистиллированной водой в статических условиях трех насыщенных цезием образцов: 1) природного бентонита (34,6%); 2) бентонита, предварительно обработанного CaCl_2 (29%); 3) бентонита, обработанного NaOH (12%). Нами получены близкие величины: для модифицированного натрием образца Б5 — 15%, для натриевого природного образца Б1 — 12%; для щелочноземельного Б3 — 20%.

В соответствии со структурой смектитов предполагается, что возможны разные механизмы их взаимодействия с катионами металлов: ионный обмен с участием как межслоевых, так и поверхностных катионов; образование поверхностных комплексов с алюмоиольными и силаноиольными группами бентонитов; физическая сорбция; осаждение; соосаждение. В работе [Маслова, 2014] указана также на наличие на поверхности частиц смектитов клинообразных центров специфического связывания Cs, которые прочно фиксируют его даже при избытке в растворе конкурирующих ионов Ca и K.

Структурные исследования бентонитов методом рентгеновской дифрактометрии. С целью получения информации о природе сорбционно-десорбционных процессов с участием Cs и Sr на бентонитовых глинах, а также вероятных местах локализации ионов-сорбатов выполнены рентгеноструктурные исследования глинистой фракции бентонитовых глин исходных образцов, а также после сорбции на них Cs и Sr и после фильтрации дистиллированной воды.

Основным исследуемым параметром было изменение положения рефлекса d_{001} , диагностического для смектитов с разными обменными катионами в межслоевом пространстве. В табл. 3 и 4 приведены данные о изменении положения этого рефлекса для всех изученных образцов в сопоставлении с величинами сорбции (N , мэкв/г) и десорбции (D , %).

Для удобства интерпретации полученных данных в табл. 5 приведены радиусы гидратированных ионов для основных обменных катионов бентонитов, а также для Cs и Sr, являющихся ионами-сорбатами в наших экспериментах.

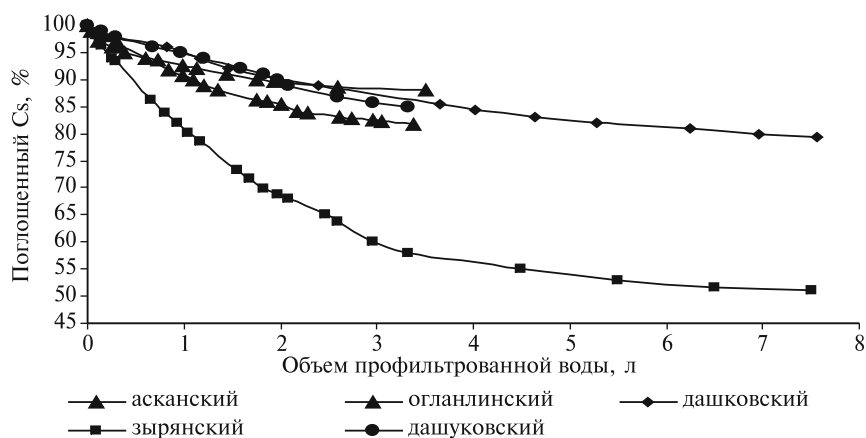


Рис. 1. Десорбция поглощенного Cs из бентонитов разного состава

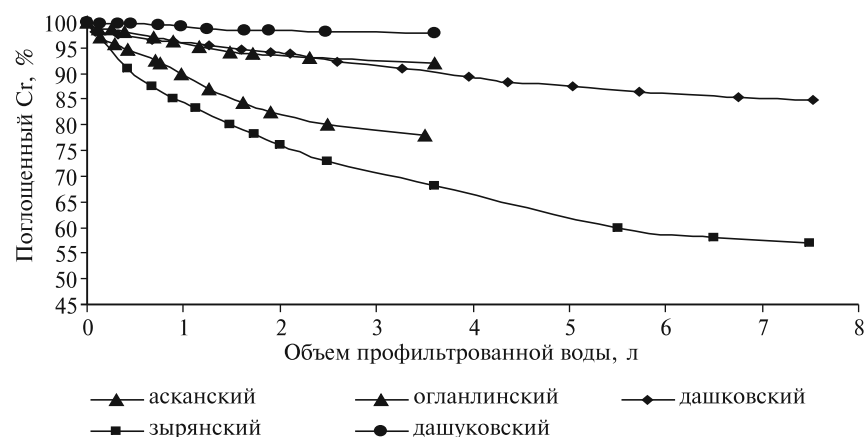


Рис. 2. Десорбция поглощенного Sr из бентонитов разного состава

Рентгеноструктурные исследования образцов Б1 и Б2 бентонитов показали, что они хорошо окристаллизованы — на исходных и насыщенных этиленгликолем препаратах наблюдается целочисленная серия межплоскостных отражений до 5-го порядка, межплоскостное расстояние в насыщенных этиленгликолем образцах возрастает до стандартного ($d_{001}=16,962 \text{ \AA}$).

Рентгеноструктурные исследования образца Б1. Обменный комплекс асканского бентонита (Б1) преимущественно натриевый ($d_{001}=12,994 \text{ \AA}$), с примесью магния ($d_{001}=13,778 \text{ \AA}$). На рис. 3 приведены все полученные дифрактограммы для этого образца.

Насыщение стронцием приводит к увеличению межплоскостного расстояния образца Б1 до $d_{001}=14,878 \text{ \AA}$, характерного для смектитов, содержащих в межслоевом пространстве двухвалентные катионы, т.е. происходит обмен одновалентных ионов натрия из межслоевого промежутка смектита на двухвалентный стронций. Окристаллизованность бентонита при этом ухудшается, что, по-видимому, связано с искажением кристаллической структуры под действием вхождения более крупного стронция (табл. 5). После промывания дистиллированной водой, сопровождающегося частичной десорбцией Sr, межплоскостное расстояние уменьшается до

Таблица 3

Изменение межплоскостных расстояний в образцах бентонитов при насыщении Sr и последующей фильтрации через них дистиллированной воды

Образец бентонита	N_{Sr} , мэкв/г	D_{Sr} , %	d_{001} , Å				
			исходный	насыщенный Sr		после фильтрации воды	
				d_{001}	Δ_1	d_{001}	Δ_2
Асканский (Б1)	0,63	8	12,994	14,874	+1,88	12,752	-2,122
Огланлинский (Б2)	0,48	23	12,994	15,318	+2,324	14,983	-0,335
Дашковский (Б3)	0,42	15	14,983	15,668	+0,685	н/о*	н/о*
Зырянский (Б4)	0,48	43	14,874	16,035 14,355	+1,161 -0,519	14,768	-1,267
Дашуковский (Б5)	1,24	2,5	12,832	14,874	+2,042	12,369	-2,505

* н/о — не определялось.

Таблица 4

Изменение межплоскостных расстояний в образцах бентонитов при насыщении Cs

Образец бентонита	N_{Cs} , мэкв/г	D_{Cs} , %	d_{001} , Å		
			исходный	насыщенный Cs	Δ
Асканский (Б1)	0,29	12	12,994	12,752	-0,242
Огланлинский (Б2)	0,25	18	12,994	12,994	0
Дашковский (Б3)	0,27	20	14,983	14,874 13,506	-0,109 -1,477
Зырянский (Б4)	0,22	49	14,874	разрушен	-
Дашуковский (Б5)	0,34	15	12,832	12,444	-0,388

12,752 Å, которое, как и в случае с десорбцией Cs, меньше расстояния для исходного образца. Тот факт, что незначительное (8%) вымывание Sr из образца (табл. 3) сопровождается заметным уменьшением межплоскостного расстояния, заставляет предположить, что происходит перераспределение поглощенного Sr между внутренними и внешними поверхностями кристаллов смектита. В работе [Закусин, 2012] сравниваются дифрактограммы образцов бентонитов, насыщенных Cs, и тех же образцов, отмытых от излишка электролита. В отмытых образцах рефлексы становятся более узкими и интенсивными за счет большей степени ориентации частиц при подготовке препарата для анализа, но положение максимумов рефлексов не изменяется. На дифрактограмме же исследованного нами насыщенного Sr образца Б1 максимум сдвигается. Следовательно, механизм фиксации и распределение в кристаллитах бентонита принципиально отличаются для Cs и Sr.

Таблица 5

Радиусы гидратированных ионов щелочных и щелочноземельных металлов*

Ион	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cs ⁺	Sr ²⁺
Радиус, Å	3,3	2,7	4,4	4,2	2,3	4,2

* По [Эрдеи-Груз, 1976].

После насыщения Cs межплоскостное расстояние в смектитовой составляющей образца Б1 уменьшается до $d_{001}=12,752$ Å и появляется дополнительный пик ($d_{001}=15,668$ Å), при этом окри-

сталлизованность ухудшается (пропадают целочисленные межплоскостные отражения). Появляются асимметрия и уширение базального рефлекса, что, по-видимому, связано с разной реакцией слоев на вхождение цезия в межслоевое пространство (табл. 4), а также с изменением размеров частиц или агрегатов. Незначительное уменьшение межплоскостного расстояния при насыщении образца цезием указывает лишь на частичное замещение обменных катионов (Na—Mg) в асканском бентоните ионами цезия ($N_{Cs}=0,29$ мэкв/г). Основная масса Cs фиксируется, по-видимому, не в межслоевом пространстве смектита, а на внешних поверхностях его кристаллитов за счет ионообменных процессов и образования поверхностных комплексов с гидратированными в растворе алюминольными и силанольными группами. В работе [Шлыков, 2006] отмечено, что количество обменных центров, расположенных на внешних поверхностях частиц смектитов, может достигать 60–70% от их общей обменной емкости. После фильтрации дистиллированной воды и частичной десорбции Cs (14%) межплоскостное расстояние в образце Б1 уменьшается до $d_{001}=12,596$ Å, что наблюдалось и для других образцов.

Рентгеноструктурные исследования образца Б2. Обменный комплекс смектитов огланлинского бентонита (Б2) натриевый ($d_{001}=12,994$ Å). При поглощении Sr этим образцом межплоскостное расстояние увеличивается до $d_{001}=14,983$ Å, при этом окристаллизованность бентонита значительно ухудшается — пропадают целочисленные межпло-

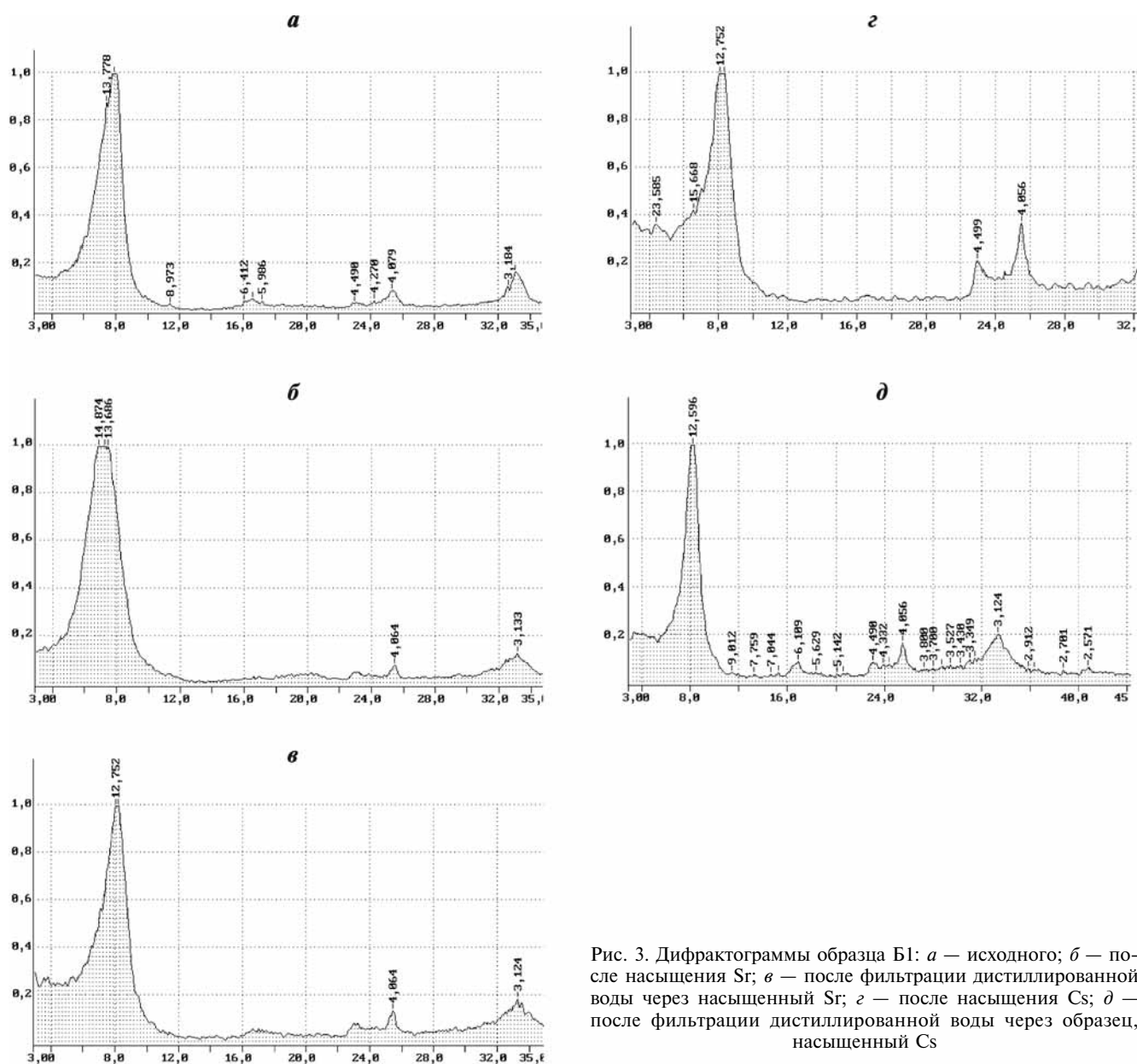


Рис. 3. Дифрактограммы образца Б1: *а* — исходного; *б* — после насыщения Sr; *в* — после фильтрации дистиллированной воды через насыщенный Sr; *г* — после насыщения Cs; *д* — после фильтрации дистиллированной воды через образец, насыщенный Cs

скостные отражения. Эти явления связаны с входением более крупных ионов Sr в кристаллическую решетку бентонита за счет ионного обмена с Na. После фильтрации воды и частичной десорбции Sr межплоскостное расстояние уменьшилось до $d_{001}=14,768$ Å.

Сорбция Cs не изменяет межплоскостное расстояние в смектитовой составляющей этого бентонита ($d_{001}=12,994$ Å), однако дифрактометрический пик становится ассиметричным, с отклонением в сторону меньших углов. Таким образом, поглощенный Cs, как и в образце Б1, закрепляется не в межслоевом пространстве, а на поверхности смектита, а большая величина десорбции при фильтрации воды (18%) связана со структурными особенностями этого бентонита.

Меньшая прочность закрепления Sr и Cs на огланлинском бентоните, чем на асканском, согласуется с более низкими величинами содержания

щелочных металлов, магния и железа, а также с меньшими обменной емкостью и степенью дефектности кристаллов (табл. 1).

Рентгеноструктурные исследования образца Б3. Рентгеноструктурные исследования дашковского бентонита (Б3) показали, что окристаллизованность исходного образца значительно хуже по сравнению асканским и огланлинским образцами. Его обменный комплекс имеет Ca–Mg состав ($d_{001}=14,983$ Å). Адсорбция Cs и Sr происходит главным образом по тому же механизму, что и в щелочных бентонитах образцов Б1 и Б2. Межслоевое пространство смектитов при входении Sr увеличивается (но меньше, чем у щелочных разностей), а при поглощении Cs уменьшается (но больше, чем у щелочных бентонитов), при этом наблюдается широкий разброс значений межплоскостных расстояний: после насыщения цезием от $d_{001}=14,983$ Å до $d_{001}=14,874$ Å и $13,506$ Å, а стронцием — от

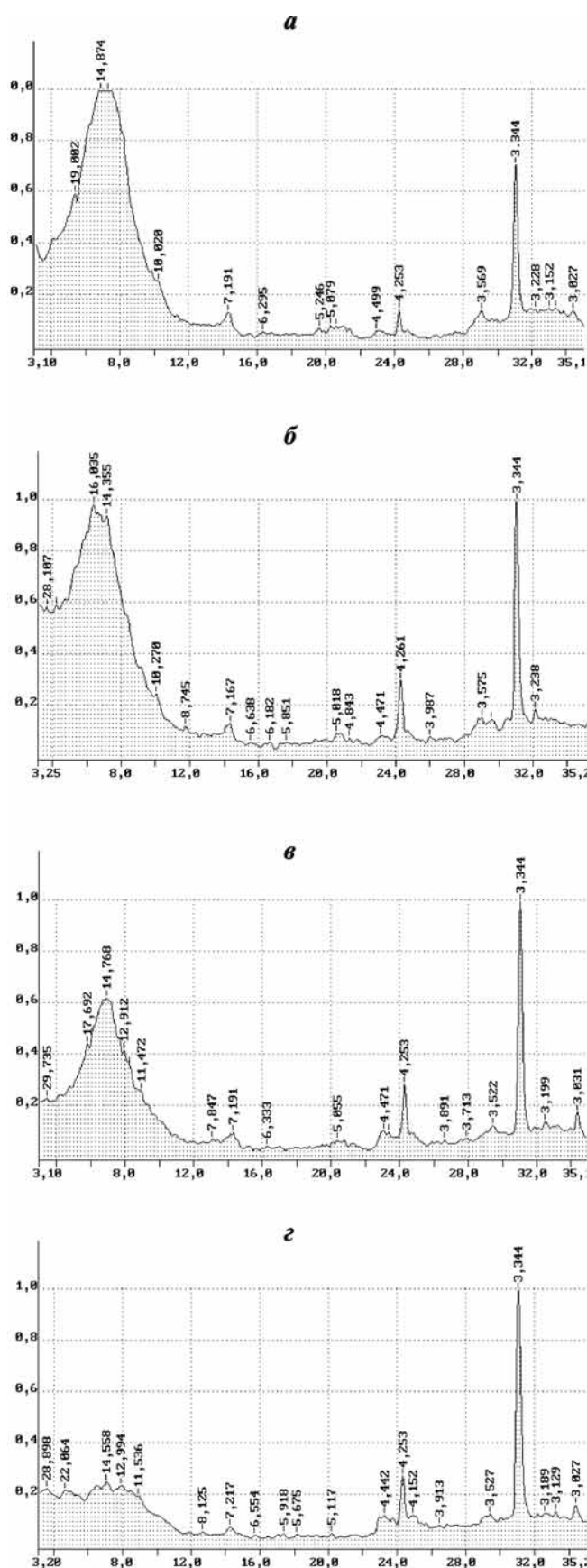


Рис. 4. Дифрактограммы образца Б4: а — исходного; б — после насыщения Sr; в — после фильтрации дистиллированной воды через насыщенный Sr; г — после насыщения Cs (разрушение кристаллической структуры)

$d_{001}=14,983$ до $d_{001}=15,668$ Å. Базальный рефлекс d_{001} расширяется, а форма его становится асимметричной. Здесь происходит не только заметное изменение межплоскостных расстояний, но и нарушение порядка в наложении элементарных слоев из-за их различной реакции на вхождение элементов-адсорбатов в межслоевые промежутки. По-видимому, в смектитах дашковского бентонита содержатся слои, отличающиеся слоевым зарядом, поэтому они по-разному реагируют на вхождение Cs и Sr в структуру [Закусин, 2012].

Рентгеноструктурные исследования образца Б4. Зырянский бентонит (Б4), имеющий Na–Ca–Mg обменный комплекс, характеризуется наихудшей окристаллизованностью и дефектностью структуры по сравнению с другими образцами — отражение исходного образца самое широкое ($d_{001}=14,160$ Å и $d_{001}=14,874$ Å). Увеличение ширины базального рефлекса может быть следствием нарушения упорядоченности слоев, наличия дефектов и дислокаций в структуре смектитов [Шлыков, 2006]. На рис. 4 показаны все дифрактограммы, полученные для зырянского бентонита.

При поглощении Sr межплоскостное расстояние у части смектитов образца Б4 заметно выросло ($d_{001}=16,035$ Å), а у другой — снизилось ($d_{001}=14,355$ Å), что, по-видимому, вызвано теми же причинами, что и для образца Б3 — нарушением порядка в наложении элементарных слоев, которые значительно отличаются слоевыми зарядами. После фильтрации воды через образец, насыщенный стронцием, межплоскостное расстояние смектитовой составляющей уменьшилось до $d_{001}=14,768$ Å — значения, практически равного исходному, что согласуется со значительной величиной десорбции Sr (43%).

При насыщении Cs кристаллическая структура бентонита разрушается, что выражается в резком уменьшении интенсивности межплоскостного пика (рис. 4, г). При подготовке препарата для дифрактометрии — смешивании образца с водой — вместо суспензии образовывался гель. Аналогичное явление почти полного исчезновения рефлекса d_{001} наблюдали и авторы работы [Lima et al., 1998] при насыщении Cs природного бентонита. Десорбция Cs в образце Б4 под действием фильтрации воды составила 49%.

Рентгеноструктурные исследования образца Б5. Дашуковский бентонит Б5 был промышленно обработан содой, что привело к преобразованию Ca–Mg обменного комплекса на Na с наименьшим из всех образцов межплоскостным расстоянием ($d_{001}=12,832$ Å). После сорбции Sr межплоскостное расстояние кристаллитов Б5 существенно возросло ($d_{001}=16,420$ Å), что хорошо согласуется с его максимальной из всех исследованных бентонитов поглощающей способностью ($N_{Sr}=1,24$ мэкв/г). Незначительная десорбция Sr (2,5%) показывает особую прочность его связывания модифици-

рованным бентонитом Б5 в результате ионного обмена с натрием.

После сорбции Cs межплоскостное расстояние этого образца заметно уменьшается ($d_{001}=12,444 \text{ \AA}$), что согласуется с его значительным поглощением и меньшим радиусом гидратированных ионов Cs по сравнению с Na (табл. 5). В форме базального рефлекса d_{001} проявляется асимметрия, что, по-видимому, как и в случае с другими образцами, объясняется разной реакцией слоев на вхождение Cs в межслоевой промежуток и преимущественным ионным обменом на поверхности смектита.

Обобщая результаты исследования сорбционно-десорбционного взаимодействия разных по составу и свойствам бентонитов с ионами Cs и Sr, а также их рентгеноструктурных исследований, можно отметить следующее:

- все исследованные бентониты достаточно прочно удерживают Cs и Sr (десорбция для большинства образцов не превышает 20 и 23% соответственно). Существенное вымывание наблюдается только для зырянского бентонита Б4 (49% Cs и 43% Sr);

- интенсивность десорбции зависит от степени окристаллизованности смектитов, наличия нарушений в упорядоченности слоев и других дефектов в структуре. Так, плохая окристаллизованность и дефектность структуры бентонита (Б4) приводит не только к значительной десорбции поглощенных элементов-адсорбатов при промывании водой, но и к разрушению кристаллической структуры его смектитовой составляющей при насыщении Cs;

- сорбция Cs приводит к небольшому уменьшению межплоскостного расстояния смектитовой составляющей бентонитов, что предполагает преимущественную фиксацию Cs на внешних

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т 8 / Отв. ред. Н.П. Лавров. М.: ИФЗ РАН, 2008. 254 с.

Кулешова М.Л., Данченко Н.Н., Сергеев В.И., Шимко Т.Г. Свойства бентонитов как материалов для создания сорбционных барьеров // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 5. С. 87–95.

Лавров Н.П., Величкин В.И., Омеляненко Б.И. и др. Новые подходы к подземному захоронению высокоактивных отходов в России // Геоэкология. 2000. № 1. С. 3–12.

Маслова К.М. Динамический метод изучения сорбционно-десорбционного поведения ^{137}Cs в почвах и органо-минеральных сорбентах с измерением радиоактивности в твердой фазе: Автореф. канд. дисс. Обнинск, 2014.

Попов В.Е., Маслова К.М., Степина И.А. Влияние периодического увлажнения и высушивания на селективную сорбцию ^{137}Cs смесями почвы и органо-минерального сорбента // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1357–1366.

Сабодина М.Н. Закономерности поведения радионуклидов при создании техногенно-геохимического барьера на основе глин: Автореф. канд. дисс. М., 2008.

поверхностях частиц смектитов; при этом появляются расширение и асимметрия формы базального рефлекса d_{001} ;

- сорбция Sr приводит к увеличению межплоскостного расстояния, что свидетельствует о его поглощении в межслоевом пространстве смектитов;

- щелочные бентониты эффективнее, чем щелочноземельные, поглощают элементы-загрязнители. Стронций сорбируется в большем количестве, чем цезий, что указывает на преобладающее влияние заряда, а не размера иона на эффективность связывания;

- наилучшей способностью к длительной иммобилизации загрязнителей характеризуется модифицированная содой бентонитовая глина (Б5).

Заключение. Исследования и анализ полученных материалов показали, что бентонитовые глины обладают значительной поглощающей способностью в отношении Cs и Sr. Оценив степень десорбции во времени, можно утверждать, что эти глины достаточно эффективны для длительной иммобилизации загрязнителей и могут служить материалом для создания противомиграционных барьеров при сооружении хранилищ РАО. Наиболее эффективна разность модифицированная содой.

При выборе бентонитовой глины для сооружения защитных экранов на конкретных объектах можно ориентироваться на полученные нами показатели, однако для точных прогнозов необходимы лабораторные исследования сорбционно-десорбционных характеристик доступных и экономически выгодных разновидностей бентонитов в отношении всех выявленных в отходах потенциальных загрязнителей подземных вод.

Сергеев В. И., Сквалецкий М.Е., Кулешова М.Л. Оценка грунтовой толщ как естественного барьера на пути миграции токсичных загрязнителей // География. Программа «Университеты России». М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. С. 285–296.

Сергеев В.И., Шимко Т.Г., Кулешова М.Л., Свиточ Н.А. Количественная оценка грунтовой толщ как геохимического барьера // Геохимические барьеры в зоне гипергенеза / Под ред. Н.С. Касимова, А.Е. Воробьева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. С. 334–346.

Шлыков В.Г. Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов. М.: ГЕОС, 2006. 176 с.

Эрдеи-Груз Т. Явления переноса в водных растворах. М.: Мир, 1976. 592 с.

Galamboš M., Kufčáková J., Rajec P. Sorption of strontium on Slovak bentonites // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2009. Vol. 281. P. 347–357.

Galamboš M., Paučová V., Kufčáková J. et al. Cesium sorption on bentonites and montmorillonite K10 // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2010. Vol. 284. P. 55–64.

Khan S.A. Sorption of the long-lived radionuclides caesium-134, strontium-85 and cobalt-60 on bentonite // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2003. Vol. 258 (1). P. 3–6.

Lima E.J., Bosch P., Bulbulian S. Modification of the structure of natural bentonite and study on the sorption of Cs^+ // J. Radioanal. Nucl. Chem. 1998. Vol. 237, N 1–2. P. 41–45.

Murali M.S., Mathur J.N. Sorption characteristics of Am(III), Sr(II) and Cs(I) on bentonite and granite // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2002. Vol. 254 (1), P. 129–136.

Yildiz B., Erten H.N., Kiş M. The sorption behavior of Cs^+ ion on clay minerals and zeolite in radioactive waste management: kinetics and thermodynamics // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2011. Vol. 288. P. 475–483.

Поступила в редакцию
01.03.2017

**ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ
«ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. Серия 4. ГЕОЛОГИЯ»**

Для публикации в журнале принимаются статьи сотрудников, аспирантов и студентов МГУ (в том числе в соавторстве с представителями других организаций). Текст сопровождается выпиской из протокола заседания кафедры, актом экспертизы, сведениями обо всех авторах: фамилия, имя и отчество (полностью), кафедра, должность, ученое звание, ученая степень, телефон домашний и рабочий, мобильный, *e-mail* (обязательно). Статьи принимают на геологическом факультете МГУ, комн. 515а.

**Требования к оформлению статьи
и краткого сообщения**

1. Суммарный объем статьи (включая рисунки и список литературы) не должен превышать 24 страницы, объем краткого сообщения суммарно составляет 6 страниц. Рекомендуются стандартизировать структуру статьи, используя подзаголовки, например: **введение, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и их обсуждение, заключение (выводы)** и пр.

2. К статье на отдельной странице прилагаются аннотация (6–8 строк) и ключевые слова (6–8) на русском языке, а также аннотация и ключевые слова на английском языке. На отдельной странице необходимо приложить перевод фамилий, инициалов авторов и названия статьи на английский язык.

3. Перед заголовком работы необходимо проставить УДК.

4. Текст должен быть подготовлен в редакторе Word с использованием шрифта Times New Roman 12. Имя файла может содержать до 8 символов и иметь расширения .doc или .txt. Текст должен быть распечатан через 2 интервала, поля со всех сторон по 2,5 см. Текст представляют на отдельном носителе (компакт-диске) и в 2 экз. распечатки. Страницы следует пронумеровать.

5. Рисунки, фотографии, таблицы, подрисовочные подписи прилагаются отдельно в 2 экз. в конце статьи. Каждая таблица должна быть напечатана на отдельной странице тем же шрифтом, через 2 интервала, иметь тематический заголовок и не дублировать текст. Таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку их упоминания в тексте. Все графы в таблицах должны иметь заголовки и быть разделены вертикальными линиями. Сокращения слов в таблицах не допускаются. Материал по строкам должен быть разделен горизонтальными линиями.

6. Формулы, математические и химические знаки должны иметь четкое написание.

7. Размерность всех физических величин должна соответствовать Международной системе единиц (СИ).

8. Список литературы должен содержать в алфавитном порядке все цитируемые и упоминаемые в тексте работы, иностранная литература помещается после отечественной тоже по алфавиту. При ссылке на изобретение необходимо указать год, номер и страницу «Бюллетеня изобретений». Ссылки на неопубликованные работы не допускаются (возможны ссылки на устное сообщение и автореферат кандидатской или докторской диссертации). Библиографическое описание дается в следующем порядке: фамилии и инициалы авторов, название статьи, полное название работы, место издания, издательство, год издания (для неперидических изданий), для периодических — фамилии и инициалы авторов, название статьи, год выпуска, том, номер, страницы. Ссылка на литературный источник в тексте приводится так: «В работе [Иванов и др., 1999] указано, что...».

9. Никакие сокращения слов, имен, названий, как правило, не допускаются. Разрешаются лишь общепринятые сокращения названий мер, физических, химических и математических величин и терминов и т.д. Все аббревиатуры, относящиеся к понятиям, методам аналитическим и обработки данных, а также к приборам, при первом употреблении в тексте должны быть расшифрованы.

10. Каждый рисунок должен быть выполнен на белой бумаге в виде компьютерной распечатки на лазерном принтере. Для растровых (тоновых) рисунков использовать формат TIFF с разрешением 600 dpi; векторные рисунки необходимо предоставлять в формате программы, в которой они сделаны; для фотографий использовать формат TIFF с разрешением не менее 300 dpi. Рисунки и фотографии должны быть черно-белыми, четко выполнены и представлены в 2 экз. Компьютерный вариант должен иметь расширения .tiff или .cdr (Corel Draw) и предоставляться на отдельном носителе (компакт-диске), рисунки следует записывать в той программе, в которой они сделаны. На обороте всех иллюстраций указывают их номер, фамилию автора и название статьи. **Обращаем ваше внимание на то, что текст и рисунки предоставляются на отдельных дисках.**

11. Подрисовочные подписи прилагаются на отдельной странице и оформляются согласно требованиям, изложенным в п. 4.

12. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, не принимаются.

13. Дополнения в корректуру не вносятся.

14. Редакция журнала оставляет за собой право производить сокращение и редакционные изменения текста статей.

Плата за публикацию не взимается.

*Благодарим вас за соблюдение наших правил
и рекомендаций!*

УЧРЕДИТЕЛИ:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
геологический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Д.Ю. ПУЩАРОВСКИЙ — **главный редактор**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАН
Е.А. ВОЗНЕСЕНСКИЙ — **зам. главного редактора**, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Р.Р. ГАБДУЛЛИН — **ответственный секретарь**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент
И.М. АРТЕМЬЕВА — профессор Университета Копенгагена, Дания
И.С. БАРСКОВ — доктор биологических наук, профессор
А.Б. БЕЛОНОЖКО — профессор Университета Стокгольма, Швеция
С.В. БОГДАНОВА — профессор Университета Люнд, Швеция
М.В. БОРИСОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. БРУШКОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.А. БУЛЫЧЕВ — доктор физико-математических наук, профессор
Е.Б. БУРОВ — профессор Университета Пьера и Марии Кюри, Франция
М.Л. ВЛАДОВ — доктор физико-математических наук, профессор
М.С. ЖДАНОВ — профессор Университета Солт-Лейк-Сити, США
Н.В. КОРОНОВСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
Д.Г. КОЩУТ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.С. МАРФУНИН — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.М. НИКИШИН — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.Р. ОГАНОВ — профессор Университета Стони-Брук, США
А.Л. ПЕРЧУК — доктор геолого-минералогических наук
С.П. ПОЗДНЯКОВ — доктор геолого-минералогических наук
В.И. СТАРОСТИН — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. СТУПАКОВА — доктор геолого-минералогических наук, доцент
В.Т. ТРОФИМОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
В.К. ХМЕЛЕВСКОЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
В.В. ШЕЛЕПОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор

Редактор **А.Е. ЛЮСТИХ**

Адрес редакции:

e-mail: vmu_red@mail.ru

*Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.*

Подписано в печать 20.06.2017. Формат 60×90¹/₈.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. . Тираж экз.
Изд. № 10 735. Заказ

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15
(ул. Академика Хохлова, 11)
Тел.: (495) 939-32-91; e-mail: secretary@msupublishing.ru

ISSN 0201-7385
ISSN 0579-9406

ИНДЕКС 70995 (каталог “Роспечать”)
ИНДЕКС 34114 (каталог “Пресса России”)
