

Модели долговременной миграции радиоактивных отходов в подземных водах: оценка чувствительности и достоверности прогнозов

Аннотация

Миграция радиоактивного загрязнения в подземных водах и связанные с ней неблагоприятные воздействия на источники питьевого водоснабжения, поверхностные воды и биоту уже более чем 40 лет подвергается анализу, как в российской, так и зарубежной литературе. Проект выполнен, используя уникальные данные крупнейшего российского объекта захоронения радиоактивных стоков, на котором в течение 50 лет проводится закачка жидких отходов в неоднородные песчано-глинистые отложения. На основе анализа этих данных проведено изучение и моделирование распространения нейтральных и радиоактивных изотопов в неоднородной среде и построены модели для долгосрочного прогнозирования их миграции в постинжекционный период. Задачи на весь срок выполнения проекта состоят в следующем:

- 1) Анализ и развитие теоретических моделей переноса радиоактивного загрязнения в неоднородных пластах для выполнения долговременных прогнозов миграции.
- 2) Исследование и модельное описание физико-химических процессов, замедляющих распространение радиоактивного загрязнения в потоке подземных вод: сорбция основных нуклидов из многокомпонентных растворов, многокомпонентная диффузия в слабопроницаемые элементы разреза
- 3) Обоснование расчетной модели миграции радиоактивного загрязнения для выполнения долговременных прогнозов (на примере полигона захоронения СХК)
- 4) Разработка методики калибровки, анализа чувствительности модели к исходным данным
- 5) Разработка методики оценки достоверности долговременных прогнозов, позволяющей учесть неопределенности исходных данных, используемых для прогнозирования

В результате выполнения работ получены следующие основные результаты:

- а) Впервые для района полигона СХК определены коэффициенты диффузии солей в ненарушенных образцах, отобранных из зоны закачки. Достоверность лабораторных определений подтверждена результатами микротомографических исследований и моделирования диффузии на поровом уровне.
- б). На основе анализа пространственной неоднородности и численного моделирования макродисперсии в неоднородной среде обоснована прогнозная модель долговременной миграции отходов в подземных водах в районе СХК в виде анизотропно-слоистой среды, гетерогенно-блокового строения с коэффициентами продольной дисперсии, имеющими макродисперсионную природу
- с). Для оценки достоверности долгосрочных прогнозов была проведена серия модельных экспериментов на разработанных геофильтрационных и геомиграционных моделях. Результаты прогнозного моделирования свидетельствуют о том, что в течение среднесрочного периода подземные воды, загрязненные несорбируемым компонентом (NaNO_3), а также ^{90}Sr и U , в основном будут локализованы в пределах зоны закачки (ниже буферного горизонта IV). Скорость латеральной миграции основной массы загрязненных вод меняется от 1 до 5 м в год, в среднем составляя 3 м в год. Показано, что результаты моделирования устойчивы к изменению

геофильтрационных и геомиграционных параметров, что свидетельствует о достоверности проведенных прогнозов и изолированности отходов от биоты в течение 1000 летнего постинжекционного периода.

Объявленные ранее цели Проекта

Задачи на весь срок выполнения проекта состоят в следующем:

- 1) Анализ и развитие теоретических моделей переноса радиоактивного загрязнения в неоднородных пластах для выполнения долгосрочных прогнозов миграции.
- 2) Исследование и модельное описание физико-химических процессов, замедляющих распространение радиоактивного загрязнения в потоке подземных вод: сорбция основных нуклидов из многокомпонентных растворов, многокомпонентная диффузия в слабопроницаемые элементы разреза
- 3) Обоснование расчетной модели миграции радиоактивного загрязнения для выполнения долгосрочных прогнозов (на примере полигона захоронения СХК)
- 4) Разработка методики калибровки, анализа чувствительности модели к исходным данным
- 5) Разработка методики оценки достоверности долгосрочных прогнозов, позволяющей учесть неопределенности исходных данных, используемых для прогнозирования

Конкретные научные задачи 2016 года включали:

1. Анализ результатов диффузионных экспериментов с помощью 3-D моделей микростроения: Исп. С.П. Поздняков и В.А. Лехов
2. Обоснование расчетной модели многокомпонентной миграции в гетерогенно-слоистой среде для долгосрочных прогнозов миграции ЖРАО с использованием модели двойной емкости с линейным массообменом канал-блок. Исп. А.В. Лехов и М.К. Шарапута
3. Верификация модели геофильтрационной неоднородности по данным динамики закачки отходов. Исп. В.А. Бакшевская и В.Н. Самарцев
4. Оценка достоверности долгосрочных прогнозов, выполняемых на основе данных изысканий, лабораторных исследований и мониторинга. Исп. Поздняков С.П., Бакшевская В.А., Самарцев В.Н.

Полученные в ходе выполнения Проекта важнейшие результаты

1. Впервые для района полигона СХК определены коэффициенты диффузии солей в ненарушенных образцах, отобранных из зоны закачки. Достоверность лабораторных определений подтверждена результатами микротомографических исследований и моделирования диффузии на поровом уровне. В результате этого моделирования удалось уточнить связь между диффузионной извилистостью и пористостью, показав, что она хорошо описывается законом Арчи с показателем степени 1.8-2.2. Этот результат подробно представлен в работах [2,6,8,10,15,16]
2. На основе анализа пространственной неоднородности, численного моделирования макродисперсии в неоднородной среде обоснована прогнозная модель долгосрочной миграции отходов в подземных водах в районе СХК в виде анизотропно-слоистой среды, гетерогенно-блокового строения с коэффициентами продольной дисперсии, имеющими макродисперсионную природу. Этот результат опубликован в работах [1,3,13,14]
3. На основе моделирования конвективного и конвективно-диффузионного переноса загрязнения получено, что в рассматриваемых условиях при вертикальной миграции несорбируемого компонента в условиях относительно высоких (сотые доли) гидравлически градиентов основную

роль играет конвективный перенос. Диффузия принципиально не меняет характер выходных кривых. Этот результат представлен в работах [7,13,14]

4. Вертикальная миграция сорбируемого слабопроницаемыми элементами разреза компонента существенно зависит как от конвективного переноса, так и от сорбции. При этом первые порции загрязнения поступают так же быстро, как и в случае несорбируемого компонента, а приход центра масс определяется сорбционной задержкой. Это свидетельствует о высокой связности хорошо проницаемых элементов разреза. Этот результат представлен в работах [1,7]

5. Субгоризонтальная миграция загрязнения в исследуемых условиях определяется конвективным переносом по хорошо проницаемым слоям и диффузионным оттоком в слабопроницаемые элементы разреза, что позволяет использовать для долгосрочных прогнозов конвективно-дисперсионную модель с двойной емкостью. Результаты экспериментального определения коэффициента диффузии и геостатистического анализа распределения мощностей прослоев позволили обосновать эффективные параметры модели с двойной емкостью: долю немобильной части среды и кинетический параметр обмена. Этот результат представлен в работах [3,7]

6. Для оценки достоверности долгосрочных прогнозов была поставлена серия модельных экспериментов на разработанных геофильтрационных и геомиграционных моделях участка ПГЗ ЖРО «Северский». Использована двухуровневая система моделей – более грубая региональная модель и более детальные локальные модели с использованием двойной емкости и стохастического описания дисперсии для прогнозирования миграции. На региональной модели рассчитаны карты напоров подземных вод с учетом естественных гидродинамических границ для различных сценариев эволюции ПГЗ ЖРО. На локальных моделях смоделировано движение мигрантов (компонентов ЖРО) с потоком подземных вод. Результаты подробно изложены в работах [3,12].

7. Результаты прогнозного моделирования свидетельствуют о том, что в течение среднесрочного периода подземные воды, загрязненные несорбируемым компонентом (NaNO_3), а также ^{90}Sr и U , в основном будут локализованы в пределах зоны закачки (ниже буферного горизонта IV). Скорость латеральной миграции основной массы загрязненных вод меняется от 1 до 5 м в год, в среднем составляя 3 м в год. Показано, что результаты моделирования устойчивы к изменению геофильтрационных и геомиграционных параметров, что свидетельствует о достоверности проведенных прогнозов [3].

8. Построена физико-химическая модель внедрения стока ЖРО в природные подземные воды для репрезентативного элемента гетерогенно-слоистой среды в многокомпонентной постановке. Состав природных вод соответствует химическим анализам и скорректирован для возможности расчетов, рассчитан состав обменного комплекса. Состав стока упрощен до нитратов натрия (преобладание), стронция и цезия. Учитываются конвективно-дисперсионный перенос в песчаном слое и диффузионный в глинистом с индивидуальными коэффициентами диффузии веществ. Скорость фильтрации и пористость соответствуют полигону закачки. Дополнительно учитывается неравновесное восстановление нитрата при окислении пирита [4].

В результате в точке наблюдений нитрат появляется позже натрия и имеет меньшую концентрацию, но со временем они практически уравниваются. Появляется волны сульфата и растворенного азота за счет окисления пирита нитратом, сходящие на нет после практической стабилизации нитрата. Стронций и цезий запаздывают относительно нитрата натрия. Отставание фронта стронция незначительное, тогда как выходная кривая цезия показывает эффект макродисперсии и существенно отстает. Причина – более высокая способность сорбироваться и высокий коэффициент диффузии в блоке [4-5].

Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

В мировой литературе в последнее десятилетие опубликован целый ряд работ в которых предлагается использование гетерогенно- блоковых моделей (MIM - mobile-immobile model) вместо моделей конвективнодисперсионного переноса (ADV - advective-dispersive model). То есть сама идея использовать MIM вместо (или вместе) с ADV не нова. Однако, в настоящее время отсутствуют алгоритмы оценки параметров MIM для сред с нерегулярной неоднородностью, как на исследуемом объекте. Поэтому метод, использованный в данной работе, включающий определение коэффициента диффузии на образцах и с помощью моделирования процесса диффузии на микроуровне, изучение и моделирование неоднородности и конвективно-диффузионных потоков в неоднородной среде на основе ADV модели, с последующим переходом к MIM модели достаточно нов и перспективен для обоснования долговременных моделей миграции в которых обмен между хорошо и слабопроницаемыми элементами разреза может сыграть решающую роль в формировании ореола загрязнения от мигрирующих отходов. Полученные результаты, показывающие, что выходные кривые при вертикальной и горизонтальной миграции различны с одной стороны свидетельствуют о важности учета связности хорошо проницаемых слоев, а с другой стороны показывают, что эффективные параметры обмена для гетерогенно-блоковой модели, оцененные для условий субгоризонтальной миграции, могут не достаточно хорошо описывать субвертикальную миграцию. В явном виде описание этой проблемы в других публикациях нами не найдено. Построенная для долговременных прогнозных расчетов модель анизотропно-слоистой среды, гетерогенно-блокового строения с коэффициентами продольной дисперсии, имеющими макродисперсионную природу в литературе нами не встречена.

Полученная при помощи микромоделирования связь диффузионной извилистости и пористости, хорошо описываемая законом Арчи отмечалась ранее в различных публикациях, однако ни кем не был проведен такой объем (более 3000) численных экспериментов, Кроме того никем ранее не выполнялся на одних и тех же образцах и лабораторный эксперимент и микромоделирование, дающие сопоставимые коэффициенты извилистости

Методы и подходы, использованные в ходе выполнения Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)

Поскольку важнейшей проблемой долгосрочного прогнозирования миграции радиоактивных отходов является обоснование достоверности прогнозных моделей, которые строятся по данным полученные в периоды, на порядки более короткие, чем требуемый период прогноза, основным методом исследований в данном проекте являлись модельные эксперименты. Идеология этих экспериментов состоит в том, что для обоснования параметров, определяющих миграцию загрязнения требуется комплексный подход. При этом часть может быть определена с использованием калибрации региональной геофильтрационной модели по данным мониторинга естественных уровней подземных вод, их возмущений в процессе закачки, положению наблюдаемых ореолов загрязнения.

Другая часть параметров, в частности дисперсия закаченных растворов в постинжекционный период могут быть оценены только с помощью численных экспериментов на специально построенных высокоразрешимых моделях миграции в неоднородной среде. Физико-химические процессы, определяющие сорбционную задержку мигрантов так же могут быть уточнены и параметризованы путем проведения специальных численных экспериментов, исследующих закономерности миграции в представительном элементе среды.

Для определения параметров обмена хорошо и слабопроницаемой частей среды за счет диффузионных процессов потребовалось использование данных лабораторных исследований

диффузионных свойств, моделирование диффузии в микромасштабе и моделирование диффузионного переноса в макромасштабе в постинжекционный период.

Таким образом, методика исследований включала изучение миграции загрязнения на разных масштабах от микромоделей пористой среды до региональной геофильтрационной модели долговременной миграции в постинжекционный период.

Используя данный подход, оказалось, что в результате проведения калибрационных расчетов и численных экспериментов появляется возможность обосновать расчетную модель для выполнения долгосрочных (тысячи) и сверхдолгосрочных прогнозов миграции, учитывающую основные особенности переноса загрязнения в неоднородной среде.

[Вклад каждого члена коллектива в выполнение Проекта в 2016 году \(указать работу, выполненную каждым членом коллектива по Проекту в 2016 году с новой строки\)](#)

Поздняков С.П. - общее руководство работами, написание отчета и статей. Разработка методики геостатистического анализа трехмерной томографии и микромоделирования диффузии, оценка достоверности долговременных прогнозов миграции.

Лехов В.А. Проведение моделирования диффузии на микроуровне, обработка результатов численных экспериментов, написание статей, участие в полевых работах на СХК, выступление с докладами на конференциях

Бакшевская В.А. Моделирование миграции и оценка достоверности прогнозов

Самарцев В.Н. Верификация прогнозной модели, участие в полевых работах на СХК, прогнозное моделирование миграции

Лехов А.В. Обоснование расчетной модели многокомпонентной миграции в гетерогенно-слоистой среде для долговременных прогнозов миграции ЖРАО с использованием модели двойной емкости с линейным массообменом канал-блок

Шарапута М.К. Расчеты миграции при помощи многокомпонентной миграции в гетерогенно-слоистой среде для долговременных прогнозов миграции ЖРАО с использованием модели двойной емкости с линейным массообменом канал-блок

[Список опубликованных в ходе выполнения проекта работ](#)

1. Bakshevskay V.A. Pozdnyakov S.P. Simulation of Hydraulic Heterogeneity and Upscaling Permeability and Dispersivity in Sandy-Clay //Mathematical Geosciences. 2015. 1-20
2. Лехов В.А. , Соколов В.Н Экспериментальное определение коэффициента фильтрации и коэффициента диффузии в слабопроницаемых отложениях./Геоэкология. Принято в печать, 2016
3. Моделирование последствий эксплуатации полигона глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов Сибирского химического комбината на среднесрочный и сверхдолгосрочный периоды / М. Глинский, С. Поздняков, Л. Чертков и др. // Радиохимия. — 2014. — Т. 56, № 6. — С. 554–560.
4. Lekhov V.A. Fedorova J.V., Simulating Multicomponent Diffusion at Industrial Waste Migration in a Heterogeneously Layered Medium Water Resources. 2015.42, № 7, с. 975-982
5. Лехов А.В. Неравновесные задачи моделирования загрязнения подземных вод // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием, г. Владивосток, 06 – 11 сентября 2015 г. / Под ред. М. В. Борисов, А. В. Лехов. — Дальнаука, Владивосток, 2015. — С. 33–38.

6. Лехов В.А., Поздняков С.П., Денисова Л.Г. СВЯЗЬ ПОРИСТОСТИ И ДИФфуЗИОННОЙ ИЗВИЛИСТОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ МИКРОТОМОГРАФИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИФфуЗИИ В ПОРОВОМ МАСШТАБЕ. Инженерная геология, 2017 в печати
7. Поздняков С., Лехов В., Бакшевская В. Экспериментальное исследование и численное моделирование влияния диффузии на миграцию загрязнения в неоднородных песчано-глинистых отложениях // Материалы II Всероссийск. научн. конф. с международным участием "Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами". — Дальнаука Владивосток, 2015. — С. 205–209.
8. Лехов В.А. Методика определения коэффициента диффузии в слабопроницаемых отложениях. В сборнике Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии», г. Томск, 2015, с. 720-723
9. Лехов В.А. Experimental study of diffusion coefficient in low permeable sediments. В сборнике тезисы докладов Международной научной школы молодых ученых "Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах", г. Москва, ИПМех, МАКС ПРЕСС Москва, 2015, с. 14-16
10. Лехов В.А., Поздняков С.П., Денисова Л.Г. Определение диффузионной извилистости глинистых грунтов по данным микротомографии и моделирования диффузии в поровом масштабе. В сборнике Инженерные изыскания в строительстве / Материалы XII Общероссийской конференции изыскательских организаций, изд. ООО «Геомаркетинг», Москва, Россия, 2016, с. 436-441.
11. Татарников И.П., В.Н. Самарцев, Анализ эффективности создания противодиффузионных завес для хранилищ жидких радиоактивных отходов/ / Материалы рабочего совещания "Развитие, верификация и аттестация программных средств, предназначенных для моделирования геофильтрации и геомиграции, на объектах Госкорпорации "Росатом" — Москва, 2014. — С. 57–62
12. Поздняков С., Спорышев В. Опыт использования программы seawat для моделирования процессов теплогенерирующего радиоактивного загрязнения подземных вод // Материалы рабочего совещания: Развитие, верификация и аттестация программных средств, предназначенных для моделирования геофильтрации и геомиграции, на объектах Госкорпорации "Росатом". — Москва, 2014. — С. 52–56
13. Pozdniakov S. P., Lekhov V. A., Bakshevskaja V. A. Effect of uncertainty of low permeable unit hydraulic parameters on prediction of long term contaminat transport// Abstracts of AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA
14. Pozdniakov S. P., Bakshevskaja V. A. Simulation of hydraulic heterogeneity and upscaling permeability and dispersivity in heterogeneous sandy-clay formation// Abstracts of GeoEnv 2014: 10 conference on Geostatistics for Environmental Applications. Paris. 2014
15. Лехов В.А. Определение параметров многокомпонентного диффузионного переноса в слабопроницаемых отложениях. XXIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016», Москва, Россия 11 – 15 апреля 2016.
16. Lekhov V.A., Pozdniakov S.P., Denisova L.G. Lab and pore-scale study of low permeable soils diffusional tortuosity. AGU Fall Meeting 2016, San-Francisco, USA 12-16 December 2016.

Результаты выполнения проекта в популярной форме:

Анализ и развитие теоретических моделей переноса радиоактивного загрязнения в неоднородных пластах для выполнения долговременных прогнозов миграции

На основе анализа пространственной неоднородности, численного моделирования макродисперсии в неоднородной среде обоснована прогнозная модель долговременной миграции отходов в подземных водах в районе СХК. Для построения этой модели использовались исследования миграционных процессов на различных масштабах – от масштаба образца до масштаба регионального потока подземных вод в районе СХК:

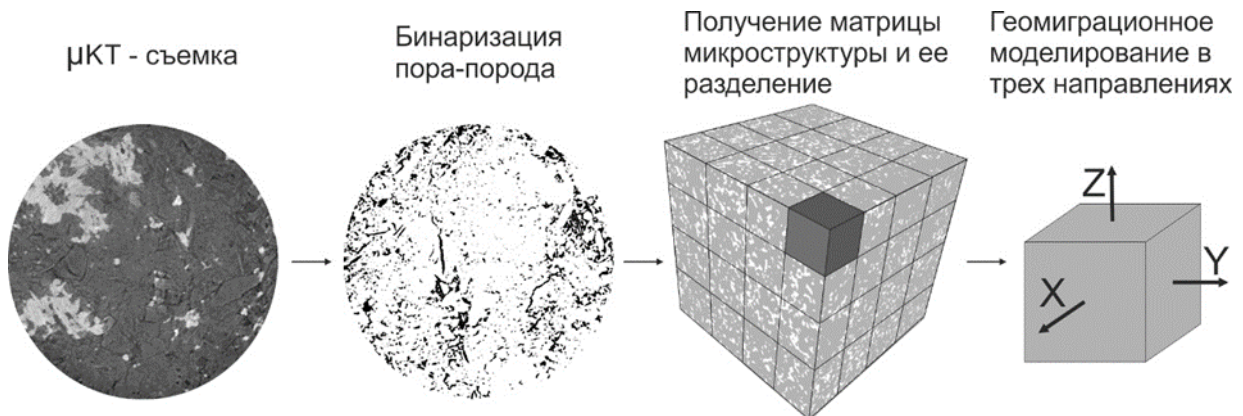


Рис 1. Общая последовательность действий для определения коэффициента диффузии глинистых пород методом микромоделирования.

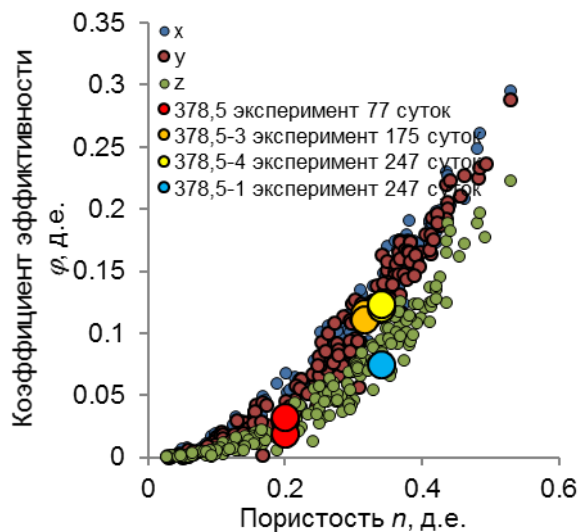


Рис. 2. Зависимость модельного коэффициента эффективности диффузии от пористости и его сравнение с экспериментально определенными значениями

Многомасштабный анализ диффузионного переноса для обоснования прогнозов миграции загрязнения в подземных водах

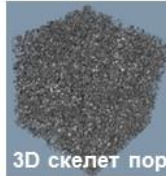
Аспирант кафедры гидрогеологии
Лехов Владимир Алексеевич

Для прогноза распространения загрязнения в подземных водах и оценки безопасности изоляции радиоактивных отходов в геологической среде важнейшее значение имеет оценка диффузионного переноса в слабопроницаемых отложениях

1. Масштаб пор, миллиметры

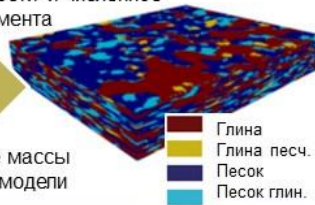


Моделирование диффузионного переноса с учетом извилистости и диаметров пор с применением геостатистических методов



2. Масштаб образца, сантиметры

Влияния неоднородности на основе анизотропии пористости и численное повторение эксперимента



3. Масштаб пласта, метры

Роль диффузии в общем переносе массы на гетерогенной геомиграционной модели

4. Региональная модель, километры



Экспериментальное определение коэффициента диффузии в слабопроницаемых отложениях

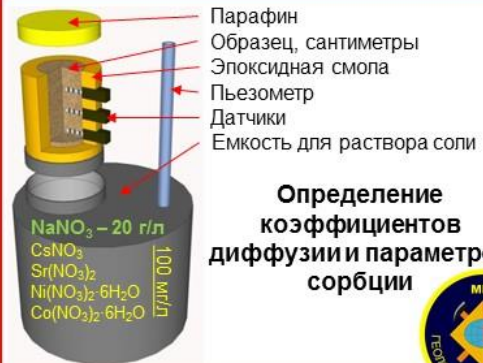


Рис 3. Лабораторные исследования и микромоделирование диффузии

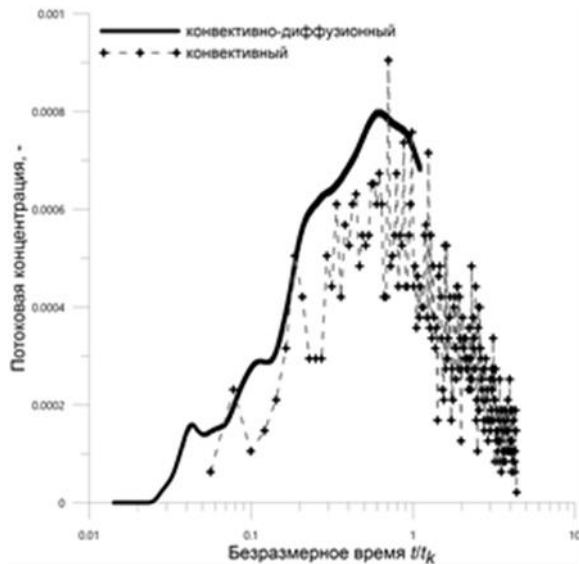


Рис. 4. Сравнение потоковых концентраций для конвективного и конвективно-диффузионного массопереноса построенных от безразмерного времени t/t_k , где t_k – характерное время конвективного переноса через модель

Обоснование расчетной модели миграции радиоактивного загрязнения для выполнения долговременных прогнозов (на примере полигона захоронения СХК)
Обоснованная прогнозная модель откалибрована по результатам наблюдений за напорами подземных вод в п период закачки загрязнения

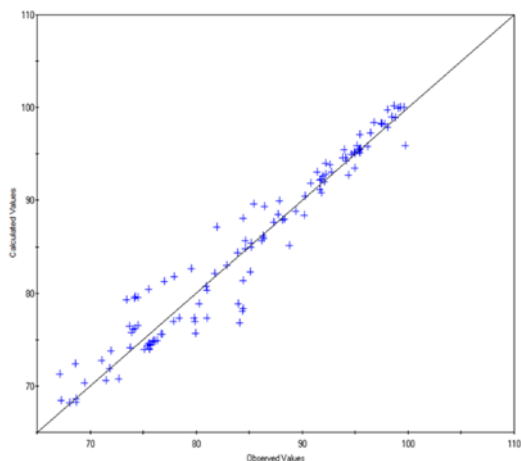


Рис 5. Результаты калибровки региональной модели

Результаты прогнозного моделирования

Для оценки достоверности долгосрочных прогнозов была поставлена серия модельных экспериментов на разработанных геофильтрационных и геомиграционных моделях полигона закачки СХК, учитывающих описанные выше процессы диффузионного обмена между слабо и хорошо проницаемой частью среды и макродисперсию в среде, имеющей анизотропно-слоистое строение. Использована двухуровневая система моделей – более грубая региональная модель и более детальные локальные модели. На региональной модели рассчитаны карты напоров подземных вод с учетом естественных гидродинамических границ для различных сценариев. В результате моделирования оказалось, что нейтральный компонент в следовых концентрациях через 400-500 лет с настоящего момента достигнет реки Томь вне зависимости от модельного сценария (см. рис. 6)

Результаты моделирования для стронция-90 показали, что этот нуклид не успевает покинуть территорию площадок за прогнозный период 1000 лет. Более того, поскольку стронций-90 имеет сравнительно короткий период полураспада, практически вся масса этого мигранта распадается за первые 400-500 лет и его прогнозные концентрации практически не зависят от модельного сценария. На рис. 8 приведено модельное распределение стронция-90 в разрезе на участке площадки 18а. К этому времени остаются только следовые концентрации в подземных водах. Для сравнения на рис. 7 приведено распределение концентраций нейтрального мигранта для этого же разреза.

Результаты проведенного моделирования переданы в институт ВНИПИПРОМТЕХНОЛОГИИ для обоснования безопасности полигонов захоронения в постинжекционный период

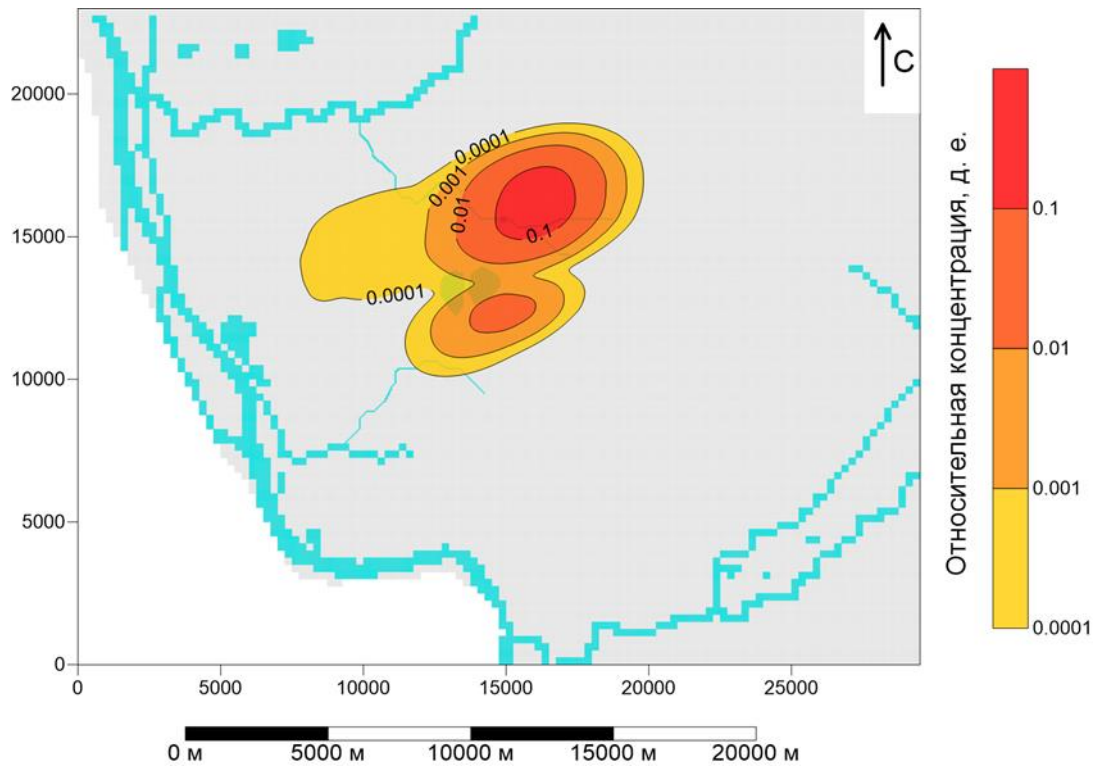


Рис. 6. Модельное распределение нейтрального компонента отходов в III водоносном пласте, 400 лет.

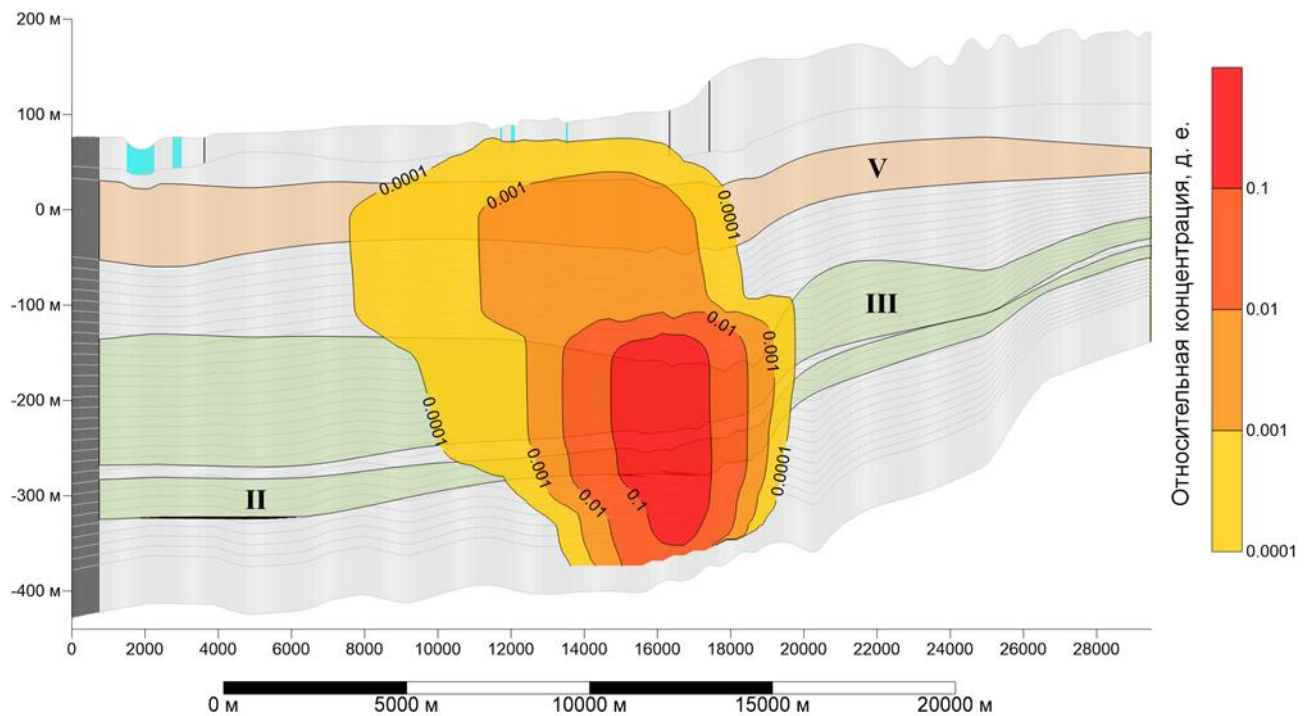


Рис. 7. Модельное распределение нейтрального компонента отходов в разрезе в районе полигона заправки, 400 лет

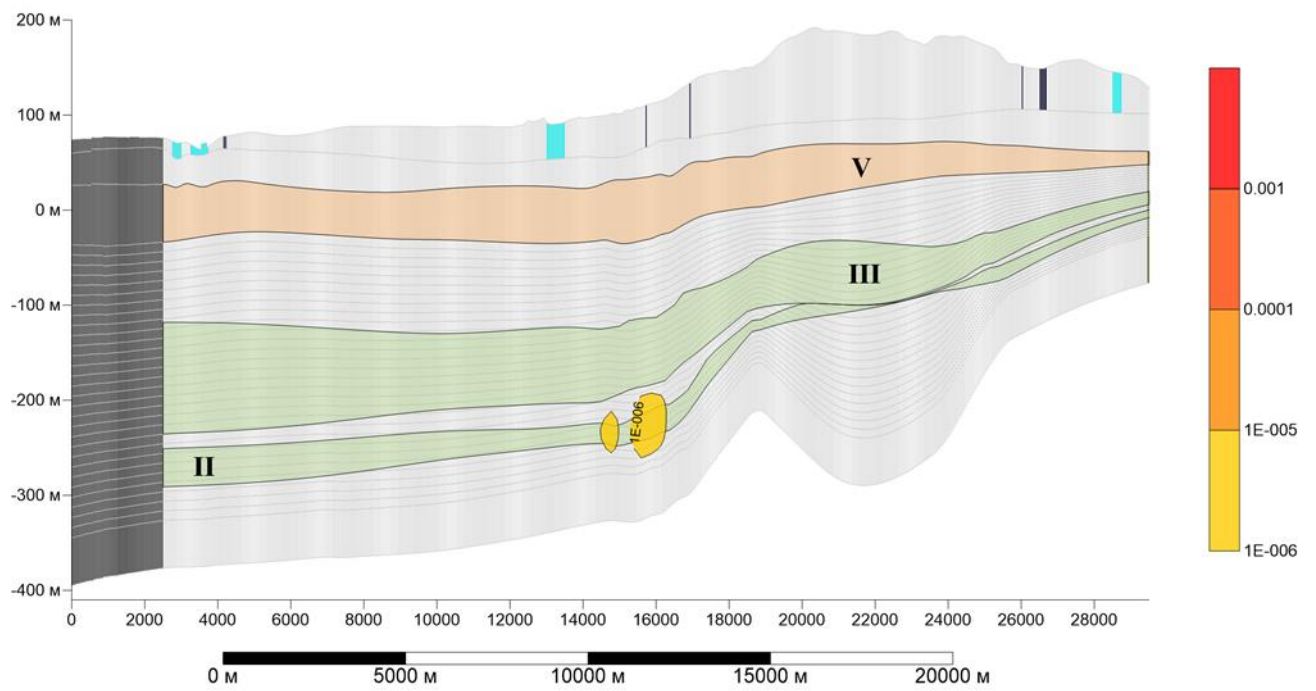


Рис. 8. Модельное распределение стронция-90 в разрезе, проходящем через площадку 18а, 400 лет