

На правах рукописи



**Бакшевская Вероника Анатольевна**

**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОГНОЗНЫХ  
МОДЕЛЕЙ ГЕОМИГРАЦИИ В НЕОДНОРОДНОЙ  
ВОДОВМЕЩАЮЩЕЙ СРЕДЕ (НА ПРИМЕРЕ ПОЛИГОНА  
ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ ОТХОДОВ СИБИРСКОГО  
ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА)**

Специальность 25.00.07 – Гидрогеология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва — 2013

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова на кафедре гидрогеологии геологического факультета и в Институте водных проблем РАН

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук  
**Поздняков Сергей Павлович**

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук  
**Галицкая Ирина Васильевна**, Институт геозологии Российской академии наук, заведующая лабораторией гидрогеозологии

кандидат геолого-минералогических наук  
**Ершов Григорий Евгеньевич**, Гидрогеологическая и геозологическая компания ГИДЭК, заместитель генерального директора, главный научный сотрудник

Ведущая организация: **ФГУГП "Гидроспецгеология" г. Москва**

Защита диссертации состоится 4 июня 2013 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.30 при Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, геологический факультет, аудитория 415.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Научной библиотеки Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, в Отделе диссертаций Фундаментальной библиотеки по адресу: Ломоносовский проспект, 27.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 119234, г. Москва, Ленинские горы, МГУ им. М. В. Ломоносова, геологический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д 501.001.30 профессору В. Н. Соколову.

Автореферат разослан \_\_\_\_ апреля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор



В. Н. Соколов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из актуальных проблем современной России является защита среды обитания человека от отходов предприятий химической, атомной промышленности и энергетики. Одним из способов длительной изоляции токсичных отходов, включая жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), является их захоронение в глубокозалегающие геологические формации. В 60-х годах в России были созданы полигоны глубинного захоронения (ПГЗ) ЖРО. Самым крупным из них является полигон Сибирского химического комбината (СХК) (г. Северск Томской области), пласты-коллекторы которого сложены неоднородными песчано-глинистыми породами. В соответствии с действующими в настоящее время нормативами допускается захоронение ЖРО на существующих подземных хранилищах при условии локализации отходов в границах установленных горных отводов. Учитывая большие объемы уже захороненных на полигоне СХК к настоящему времени ЖРО (более 43 млн. м<sup>3</sup> общей активностью около 1 млрд. Ки на глубину 270 - 400 м от поверхности земли)<sup>1</sup> и то, что эксплуатация полигона продолжается, актуальной является оценка безопасности последствий подземного захоронения ЖРО. Для такой оценки необходимы численные модели, с помощью которых выполняются долговременные прогнозы миграции компонентов ЖРО в подземной гидросфере. Ключевым аспектом при моделировании миграции загрязнения является учет влияния геофильтрационной неоднородности. При создании прогнозных моделей геомиграции в неоднородной водовмещающей среде, возникают следующие проблемы: (1) высокая изменчивость водовмещающих отложений исключает возможность получения полного знания о геофильтрационных свойствах среды, в которой происходит массоперенос; (2) локальная неоднородность не может быть явно представлена в модели, имеющей размеры ячейки в сотни метров. За последнее десятилетие было разработано несколько прогнозных численных моделей для ПГЗ ЖРО СХК, причем одной из главных проблем является параметрическое обеспечение долгосрочного геомиграционного моделирования. Все вышперечисленное обуславливает необходимость в разработке методик оценки эффективных параметров для долгосрочных прогнозных моделей геомиграции, необходимых для успешного решения задач, связанных с безопасной эксплуатацией ПГЗ.

**Целью работы** является обоснование трехмерных моделей геофильтрационной неоднородности и разработка методики оценки эффективных параметров для прогноза миграции загрязнения в неоднородной песчано-глинистой водовмещающей среде.

### **Основные задачи исследования:**

1. Анализ существующих физико-математических моделей переноса загрязнения в подземных водах.
2. Обзор методов моделирования геологической неоднородности и обоснование оптимального метода построения трехмерной (3D) модели неоднородных песчано-глинистых отложений.

---

<sup>1</sup>Румынин, В. Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука, 2011. 1157 с.

3. Анализ и обработка данных по ПГЗ ЖРО СХК.

4. Разработка и обоснование 3D детальной модели геофильтрационной неоднородности ПГЗ ЖРО СХК и ее калибровка на основе полевых данных.

5. Крупномасштабное численное моделирование миграции нейтрального компонента ЖРО.

6. Разработка методики оценки эффективных параметров прогнозных моделей на основе 3D моделей геофильтрационной неоднородности водовмещающих отложений с высоким разрешением.

7. Оценка возможности применимости упрощенных моделей массопереноса.

**Объектом исследования** является неоднородная водовмещающая среда ПГЗ ЖРО СХК.

**Предметом исследования** является геомиграция нейтрального компонента ЖРО в неоднородной водовмещающей среде.

**Фактический материал и методы исследования.** Работа основана на фактических данных лаборатории геотехнологического мониторинга СХК, полученных в процессе разведки и эксплуатации ПГЗ ЖРО, которые включают данные детального литологического расчленения разрезов 295 скважин, данные по гранулометрическому составу 1117 проб песка из 66 скважин, данные замеров уровней подземных вод в наблюдательных скважинах СХК. Для решения поставленных задач были проанализированы отечественные и зарубежные публикации по вопросам физико-математических моделей массопереноса в неоднородных средах и создания 3D моделей геологической неоднородности. В работе использовались статистические методы обработки данных, методы геостатистического моделирования для построения 3D модели геофильтрационной неоднородности водовмещающих отложений, численное моделирование геофильтрации и геомиграции.

**Достоверность результатов исследования** основана на обобщении данных по теме диссертации, опубликованных в ведущих российских и зарубежных изданиях; использовании научно-обоснованных методов компьютерной обработки данных, современных методов построения моделей геологической неоднородности, широко применяемых программных продуктов при проведении эпигнозных и прогнозных расчетов; подтверждении результатов моделирования данными наблюдений.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработана методика моделирования геофильтрационной неоднородности, на основе которой построена новая 3D модель геофильтрационной неоднородности песчано-глинистых водовмещающих отложений ПГЗ ЖРО СХК пригодная для оценки эффективных параметров и оценки риска быстрой вертикальной миграции загрязнения.

2. Предложена методика оценки эффективных параметров для прогнозных геофильтрационных и геомиграционных моделей.

3. Выявлены основные закономерности миграции загрязнения в неоднородной песчано-глинистой среде на основе созданной детальной 3D модели неоднородности и показана ограниченность применения стандартной

модели конвективно-дисперсионного переноса для условий ПГЗ ЖРО СХК.

**Практическая значимость работы.** Предложенная в работе методика достаточно универсальна и может быть использована для решения практических задач, связанных с миграцией загрязнения в подземных водах, в частности, для прогноза распространения контаминантов в неоднородных песчано-глинистых водовмещающих отложениях, а также для оптимизации системы мониторинга загрязнения. Построенная 3D модель геофильтрационной неоднородности водовмещающих отложений позволяет получить начальное распределение концентраций, необходимое для прогнозных моделей, и оценить риск, связанный с возможной быстрой вертикальной миграцией загрязнения. Эффективные параметры, полученные с помощью 3D модели геофильтрационной неоднородности водовмещающих отложений ПГЗ СХК, использованы для выполнения среднесрочных и долгосрочных прогнозов распространения компонентов ЖРО в районе СХК.

**Защищаемые положения:**

1. Для определения эффективных геофильтрационных и геомиграционных параметров прогнозных моделей неоднородных песчано-глинистых водовмещающих отложений необходимо обоснование и создание 3D модели геофильтрационной неоднородности с высоким разрешением. В качестве основного метода построения такой модели целесообразно использовать метод вероятностей перехода, основанный на цепях Маркова.

2. Геостатистический анализ данных детального литологического расчленения разрезов скважин показал, что водовмещающие отложения района ПГЗ ЖРО СХК существенно анизотропны. Основные литологические разности (песчаная и глинистая) имеют примерно одинаковую долю в разрезе и отношение горизонтального характерного размера неоднородности к вертикальному больше 47, что обуславливает значительную фильтрационную анизотропию водовмещающих отложений: вертикальный эффективный коэффициент фильтрации на 2 – 3 порядка меньше, чем горизонтальный.

3. Модель для долгосрочного прогноза миграции компонентов ЖРО в районе СХК должна строиться не в виде пластовой системы, согласно которой моделируемая толща состоит из водоносных пластов, разделенных водоупорами, а в виде анизотропно-слоистой среды, состоящей из слоев с примерно одинаковыми горизонтальными коэффициентами фильтрации и низкими значениями вертикального коэффициента фильтрации. Подобная модель менее консервативна, чем пластовая, и именно она должна использоваться для выполнения оценок долговременной миграции отходов.

4. Результаты моделирования миграции показывают, что благодаря анизотропии эффективной проницаемости исследуемая толща обладает защитными свойствами, препятствующими быстрой миграции жидких отходов в вертикальном направлении.

**Апробация работы.** Основные результаты исследования и положения диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: Первой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2002), Международной научной

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2003» (Москва, 2003), конференции «Ломоносовские чтения»-2003 (Москва, 2003), IV межвузовской молодежной конференции «Школа экологической геологии и рационального недропользования-2003» (Санкт - Петербург, 2003), Международной конференции «Underground Injection Science and Technology» (California, 2003), а также на научно-практическом семинаре «Обоснование безопасности пунктов захоронения РАО на базе современных моделей переноса радионуклидов в геологических формациях и инженерных барьерах» (Москва, 2011). Результаты исследований использованы при выполнении договорных работ и грантов CRDF RG2-2395-MO-02, РФФИ 11-05-00478-а.

**Публикации.** Основные положения работы изложены в 12 публикациях, в том числе в трех статьях в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения. Работа изложена на 194 страницах, включая 46 рисунков, 24 таблицы и список использованных источников из 183 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю профессору С. П. Позднякову за всестороннюю помощь и постоянную поддержку во время написания работы. Автор благодарит за ценные рекомендации и замечания чл.-корр. РАН В. Г. Румынина, профессора А. В. Лехова, профессора В. А. Королева. Автор признательна сотрудникам ИВП РАН профессору В. К. Дебольскому и с.н.с. Е. Е. Лапиной, а также сотрудникам ОАО «СХК» к. г.-м. н. А. А. Зубкову и к. г.-м. н. В. В. Данилову за оказанную помощь. Автор признательна своей семье за поддержку, терпение и помощь на протяжении всего времени написания диссертационной работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Анализ физико-математических моделей миграции в неоднородных средах

Классическим инструментом для прогноза миграции загрязнения является конвективно-дисперсионное уравнение (КДУ), однако оно рассматривает относительно гомогенную среду, в то время как реальным водоносным системам свойственна геологическая неоднородность, т.е. пространственная изменчивость литологических и геофильтрационных свойств. Учет геологической неоднородности водовмещающих отложений является важным аспектом моделирования миграции, т.к. она контролирует распространение и рассеивание (макродисперсию) загрязнения в подземных водах. При описании фильтрационной неоднородности водовмещающих отложений будем придерживаться точки зрения, что существует *характерный размер неоднородности*, связанный с процессами формирования отложений<sup>2</sup>. Миграция контаминанта чувствительна к неоднородностям всех масштабов, однако при практическом моделировании мелкомасштабная неоднородность (имеющая характерный размер неоднородности, по крайней мере, на порядок меньше, чем размер рассматриваемой области геофильтрационного потока)<sup>3</sup>,

<sup>2</sup>*Gelhar L.* Stochastic subsurface hydrology. Prentice-Hall, 1993. 390 p.

<sup>3</sup>*Швидлер М. И.* Статистическая гидрогеодинамика пористых сред. М.: Недра, 1985. 288 с.

как правило, остается нераспознанной. Поэтому возникает фундаментальный вопрос – как учитывать геологическую неоднородность водовмещающих пород при количественном описании массопереноса. В целом было предложено много разных подходов для моделирования переноса загрязнения в неоднородной среде, все они рассматривают макродисперсию как результат мелкомасштабной геологической неоднородности водоносного горизонта. Недостаток широко используемой дисперсионной модели макродисперсии, основанной на КДУ с использованием макродисперсивности, заключается в том, что дисперсивность не является параметром, так как демонстрирует чрезвычайную зависимость от размеров области миграции<sup>4</sup>. Для описания массопереноса в неоднородной среде активно используется стохастический подход, при котором гидродинамические процессы описываются количественными детерминированными законами, а параметры, входящие в уравнения, рассматриваются как стохастические случайные поля. Аналитический (макродисперсионный) подход подразумевает, что в классическом КДУ можно использовать эффективные дисперсионные коэффициенты, полученные исходя из предпосылки о стохастическом характере поведения коэффициента фильтрации и других переменных<sup>2,5</sup>. Такой подход подразумевает принятие целого ряда допущений, например, что транспорт нейтрального компонента происходит в квазиоднородном стационарном фильтрационном потоке в слабо неоднородной среде (со значением дисперсии логарифма коэффициента фильтрации меньше 1). Численный стохастический подход заключается в прямом численном решении дифференциальных уравнений с некоторыми реализациями случайных параметров, при этом прямо моделируются водовмещающие структуры и движение ореола загрязнения. Он применим к высоко неоднородным водовмещающим отложениям, но трудоемок, затратен по времени и подходит только для случаев, когда доступно детализировать неоднородность, которая является критичной для массопереноса. Тем не менее, в большинстве случаев стохастический подход – единственная возможность преодолеть масштабные эффекты, свойственные трассерным экспериментам, позволяющим определять только локальные параметры массопереноса<sup>6</sup>. Для моделирования миграции загрязнения в неоднородных водоносных горизонтах также применяются дробного порядка КДУ и модель двойной пористости. Использование этих подходов ограничено из-за трудности определения значений параметров используемых в этих подходах, кроме того, пока еще неясна количественная взаимосвязь между параметрами и неоднородностью водовмещающих отложений. Таким образом, количественное описание рассеивания загрязнения при его миграции в неоднородных средах, особенно для трехмерных конфигураций, все еще проблематично.

---

<sup>4</sup>Шестаков В. М. Учет геологической неоднородности – ключевая проблема гидрогеодинамики // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2003. № 1. С. 25-28.

<sup>5</sup>Dagan G. Solute transport in heterogeneous porous formations // J. Fluid Mech. 1984. V. 145. P. 151–177.

<sup>6</sup>Румынин В. Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука, 2011. 1157 с.

## **2. Проблемы параметрического обеспечения моделей для долгосрочного прогноза миграции компонентов ЖРО**

Работа предприятий химической и атомной промышленности привела к накоплению большого количества ЖРО. Одним из способов их длительной изоляции от сферы активной жизнедеятельности человека является захоронение в глубоко залегающие геологические формации. В 60-х годах в России были созданы ПГЗ ЖРО. В пласты-коллекторы ПГЗ Сибирского химического комбината (г. Северск) и Горно-химического комбината (г. Красноярск), сложенные неоднородными песчано-глинистыми породами, на настоящий момент захоронено более 50 млн. м<sup>3</sup> ЖРО с общей активностью более 1 млрд. Ки. Обеспечение безопасности захоронения ЖРО основывается на возможности прогнозирования миграции компонентов отходов в геологической среде. Поэтому для оценки безопасности захоронения ЖРО на ПГЗ необходимы локальные и региональные численные геофильтрационные и геомиграционные модели, с помощью которых выполняются средне- и долгосрочные (на сотни и тысячи лет) прогнозы миграции загрязнения в подземной гидросфере<sup>7</sup>. Для адекватного описания массопереноса требуется обращение к расчетным моделям макродисперсии, отражающим реальную неоднородность водоносных комплексов. Для краткосрочных прогнозов, рассматривающих миграцию компонентов ЖРО на локальных участках, модельные параметры могут быть найдены с помощью лабораторных и натурных экспериментов, а также по результатам наблюдений на ПГЗ. Для долгосрочных моделей необходим учет фильтрационной и миграционной неоднородности в региональном масштабе, причем миграционные параметры, определяющие рассеивание загрязнения в подземных водах, получаемые вышеперечисленными способами, становятся малопригодными<sup>7</sup>.

## **3. Методы моделирования геологической неоднородности осадочных отложений**

Необходимая 3D детальная информация о геофильтрационных свойствах среды в пределах всей области, на которую распространяется прогноз, реально не достижима, поэтому возникает необходимость в использовании различных методов для создания модели геологической неоднородности на основе имеющихся данных. Часто для этой цели используют геостатистические методы, которые численно воспроизводят пространственные структуры осадочных пород через моделирование полей геофильтрационных свойств или литологического типа горной породы [3]. Большинство геостатистических методов (например, кригинг, последовательное и усеченное гауссовское моделирование, последовательное индикаторное моделирование) используют

<sup>7</sup>Лаверов Н. П., Омеляненко Б. И., Величкин В. И. Геоэкологические аспекты проблемы захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 1994. № 6. С. 3-20;

Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. 256 с.;

Токарев И. В., Зубков А. А., Румынин В. Г. и др. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 1. Палеорекострукция условий формирования подземных вод // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 2. С. 219-227.



вариограмму для характеристики неоднородности с неявным предположением, что все значимые неоднородности могут быть представлены ковариацией. Однако вариограммы не могут охарактеризовать все виды неоднородности в сложной геологической среде. В настоящее время существуют два наиболее перспективных метода, которые учитывают максимальное количество важной априорной информации (включая достоверные и вспомогательные данные) и создают геологически правдоподобные и реалистичные 3D модели геологической неоднородности, легко обуславливаемые данными: подход на основе трехмерных цепей Маркова (ТР/МС метод) и подход многоточечной геостатистики (MPG) [3]. В первом случае вместо вариограмм для описания пространственных структур категориальных переменных используются матрицы вероятностей перехода и цепи Маркова, во втором - обучающие образы. Однако метод MPG появился относительно недавно и мало апробирован в гидрогеологической практике. Преимуществами ТР/МС метода является то, что при построении модели в качестве параметров рассматриваются объемные доли и характерные размеры каждой категории, а также взаимная корреляция, показывающая, как одна категория стремится располагаться в пространстве относительно другой категории. В качестве категорий могут рассматриваться единицы разреза, выделяемые на основе геологических или геофизических характеристик, имеющие сходные геофильтрационные свойства, значимые для целей гидрогеологических исследований и моделирования геофильтрации и геомиграции. Используемые в модели параметры могут быть оценены или эмпирически через прямые измерения (керна, данные каротажа скважин) или с помощью качественной геологической интерпретации (например, анализа условий осадконакопления или выходящих на поверхность пород-аналогов). ТР/МС метод активно применяется для создания разного масштаба моделей геологической неоднородности отложений, сформированных в самых разных обстановках осадконакопления [3].

#### **4. Ремасштабирование коэффициента фильтрации**

Для моделирования процессов фильтрации и массопереноса в неоднородных водоносных горизонтах все чаще используются сложные 3D модели геологической неоднородности, построенные с помощью геостатистических методов. В таких моделях каждой ячейке приписывается значение коэффициента фильтрации, причем число ячеек в современных моделях доходит до нескольких десятков или сотен миллионов. Решение геофильтрационных и геомиграционных задач на сетках с таким высоким разрешением требует вычислительной мощности суперкомпьютеров. Кроме того используемые для решения таких задач программы часто имеют ограничение на максимальное количество ячеек. Поэтому после построения 3D геостатистических моделей геологической неоднородности необходимо ремасштабирование, позволяющее сгруппировать элементарные ячейки с заданными в них значениями коэффициента фильтрации в большие блоки для фильтрационной модели.

Геофильтрационная неоднородность среды может быть описана либо единственным значением - эффективным параметром, либо набором значений - эквивалентными параметрами. Изменение масштаба осложнено тем фактом, что проницаемость является неаддитивной переменной, т.е. невозможно рассчитать эквивалентные значения просто используя среднее арифметическое значений коэффициента фильтрации при первоначальном масштабе. Результаты применения большинства методов ремасштабирования правомерны, если удовлетворены строгие допущения (на функцию распределения или на малую дисперсию значений коэффициента фильтрации, на тип потока и т.п.), которые могут быть некорректны, когда рассматриваются реальные водоносные горизонты.

Мелкомасштабная неоднородность с позиций геофильтрации может быть описана моделью однородной среды с эффективными параметрами<sup>8</sup>. В таком случае для перехода от локальной модели с более детальным описанием фильтрационных свойств, полученным с помощью геостатистических методов, к прогнозным моделям, имеющим большие размеры блоков, можно использовать эффективный коэффициент фильтрации.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что при моделировании массопереноса на региональном масштабе возникает проблема, связанная с тем, как учесть локальную мелкомасштабную неоднородность, которая не может быть явно представлена в модели для долгосрочного прогноза миграции компонентов ЖРО. Кроме того, на практике для описания структуры геофильтрационной неоднородности необходимо нереально большое количество данных о коэффициенте фильтрации водовмещающих пород. В то же время, информация о литологии изучаемого разреза, полученная, например, с помощью геофизических методов исследования скважин (ГИС), может использоваться для построения ТР/МС методом детальной 3D модели геологической (геофильтрационной) неоднородности, с помощью которой затем можно получить эффективные геофильтрационные и геомиграционные параметры, пригодные для использования в прогнозных (долгосрочных) моделях массопереноса.

## **5. Геолого-гидрогеологические условия района СХК**

Сибирский химический комбинат - предприятие ядерно-топливного цикла, на котором происходит переработка уранового сырья и утилизация радиоактивных веществ. С 1963 г. на СХК применяют технологию глубинного захоронения ЖРО, которые представляют собой солевые растворы (в основном нитрат натрия) с активностью  $10^{-8}$  -  $10^{-2}$  Ки/л. Радионуклиды в составе отходов представлены, в основном, изотопами Sr, Ru, Ce и Cs, в неизвлекаемых концентрациях содержатся долгоживущие трансурановые нуклиды, поэтому для полного обоснования безопасности захоронения необходим прогноз миграции ЖРО как минимум на 1000-летний период.

ПГЗ ЖРО СХК расположен на южной окраине Западно-Сибирской низменности, на правом берегу р. Томи, в 10 км севернее г. Северска.

---

<sup>8</sup>Швидлер М. И. Статистическая гидрогеодинамика пористых сред. М.: Недра, 1985. 288 с.

Геологический разрез района СХК имеет двухъярусное строение: нижний структурный этаж представлен метаморфизованными терригенными породами палеозоя, верхний структурный этаж – мезозойско-кайнозойскими терригенными отложениями платформенного чехла общей мощностью до 500 метров. Район относится к юго-восточному флангу Западно-Сибирского артезианского бассейна. Толща мезо-кайнозойских отложений является системой гидродинамически взаимосвязанных водоносных пластов с едиными областями питания и разгрузки. В настоящее время в районе СХК выделяют четыре относительно обособленных водоносных комплекса: верхнеолигоценовых - четвертичных отложений, эоцен - нижнеолигоценовых отложений, меловых - среднеэоценовых отложений и отложений палеозойского фундамента. Среди водоносных комплексов осадочного чехла в соответствии с принятой на СХК стратификацией выделено семь водоносных горизонтов (снизу вверх): I, II, III, IV, IVa, V, VI, разделенных водоупорными существенно глинистыми слоями: A, B, C, D, E, F, G. В качестве пластов-коллекторов были выбраны II и III водоносные горизонты, расположенные на глубине 270 - 386 м и сложенные преимущественно разнозернистыми кварц - полевошпатовыми, каолинизированными, разной степени глинистости песками с прослоями глин<sup>9</sup>. Разгрузка водоносных горизонтов, используемых в качестве пластов-коллекторов, происходит путем перетекания через вышележащие водоносные горизонты (IV, V, VI) в р. Томь. Территория СХК расположена в интенсивно развивающемся районе с широким использованием подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Водозаборы г. Северска и г. Томска, эксплуатирующие V водоносный горизонт, расположены в 9 - 17 км вниз по потоку от ПГЗ, их суммарная производительность составляет около 310 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Поэтому существует потенциальная опасность загрязнения компонентами ЖРО как подземных вод, использующихся для централизованного водоснабжения, так и р. Томь.

Осадочные отложения, слагающие пласты-коллекторы (II, III) и перекрывающие и подстилающие их водоупоры (B, C, D), относятся к сымской свите верхнего мела, в которой выделяется до 6 ритмов осадконакопления, внутри которых прослеживаются более мелкие ритмы. Анализ литературных данных по условиям осадконакопления в изучаемом районе показал, что для сымской свиты в целом характерно частое чередование прибрежно-морских осадков с континентальными, образованными в условиях прибрежной озерно-аллювиальной равнины<sup>10</sup>. Таким образом, для выделенных в геологическом разрезе района СХК горизонтов в целом характерны невыдержанность по литологическому составу и по мощности, поэтому при моделировании массопереноса необходимо учитывать влияние неоднородности водовмещающих отложений на миграцию загрязнения.

---

<sup>9</sup>Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. 256 с.

<sup>10</sup>Рычкова И. В. Стратиграфия и палеогеография верхнего мела – среднего палеогена юго-востока Западной Сибири: автореф. дисс. канд геол.-минер. наук 25.00.02. Томск, 2006. 22 с.

## 6. Геостатистический анализ данных

В работе использовались данные детального литологического расчленения разрезов 295 скважин, расположенных в районе СХК, полученные с помощью изучения керна и ГИС. Минимальная мощность выделенных при расчленении разрезов прослоев составляет 0,5 м. Для моделирования и геостатистического анализа были выбраны два интервала разреза. В первом (с абсолютными отметками -50 – -350 м), включающем горизонты IV, III, II, I и разделяющие их толщи D, C, B, A, выделяют 17 литологических типов [11]. Во втором (с абсолютными отметками -100 – -230 м), включающем горизонт III и D, - 10 литологических типов. Преобладающими в разрезе являются пески (41- 42 %) и глины (35 – 37 %), далее следуют каолиновая глина, глинистые брекчии, песок глинистый, глина песчаная, конгломерат. Доли остальных встреченных литологических разновидностей составляют меньше 1 %. Средняя мощность прослоев песка составляет 5 м, глины – 5,1-5,4 м. Анализ литологических колонок скважин района ПГЗ СХК показал, что даже при достаточно близком расположении скважин (100 - 250 м), трудно построить детальный разрез горизонтов, в котором выделенные в каждой скважине прослои были бы скоррелированы. Осадочная толща представляет собой сложное чередование песчаных и глинистых прослоев, которые формируют ритмы более песчаные и более глинистые, коррелирующие в вертикальном разрезе с водоносными горизонтами и относительными водоупорами, выделяемыми согласно существующей на СХК схеме стратификации разреза. Так как истинная структура неоднородных водовмещающих пород ПГЗ СХК недоступна непосредственному изучению с необходимой детальностью и существует многовариантность при построении разрезов межскважинного пространства, то возникает необходимость в создании адекватной геостатистической модели пространственной изменчивости геологической неоднородности осадочной толщи района СХК.

На основе статистического анализа данных и учитывая характерные значения коэффициентов фильтрации пород все литологические типы, встреченные в первом интервале, были отнесены либо к «пескам», либо к «глинам», то есть рассмотрена двухкомпонентная модель неоднородности. Во втором интервале вся осадочная толща была представлена четырехкомпонентной моделью, состоящей из четырех категорий (компонентов): «песок», «глина», «глинистый песок», «песчаная глина». Далее для количественной характеристики неоднородности и определения параметров модели цепи Маркова данные по литологическим колонкам скважин были закодированы целыми числовыми значениями (т.е. преобразованы в индикаторные переменные) с шагом по вертикали 0,5 м [11]. Видоизмененные таким образом данные использовались для статистического анализа и для построения гистограмм, вариограмм и вероятностей перехода. Статистический анализ данных показал, что доли и мощности «песка» и «глины» в разрезе примерно одинаковы (0,54 и 0,46 %; 5,1 и 5,7 м для двухкомпонентной модели и 0,42 и 0,40 %; 5 и 5,5 м для четырехкомпонентной модели) (табл. 1).

Таблица 1. Средняя мощность прослоев и параметры, используемые при построении 3D моделей литологической и геофильтрационной неоднородности

Категория	$m_{cp}$ , [м]	Характерный размер неоднородности L, [м]		Доля категории p, [-]	k, [м/сут]
		вертикальный	горизонтальный		
Двухкомпонентная модель водовмещающей среды					
«песок»	5,1	<b>5,1</b>	<b>350</b>	<b>0,54</b>	1
«глина»	5,7	<b>5,5</b>	<b>380</b>	<b>0,46</b>	0,0001
Четырехкомпонентная модель водовмещающей среды, интервал разреза -100 – -230 м (-50 – -350 м)					
«песок»	5,0 (5,0)	<b>4,5 (4,2)</b>	<b>243 (411)</b>	<b>0,42 (0,41)</b>	1
«песок глинистый»	4,3 (4,4)	<b>3,8 (3,4)</b>	<b>109 (144)</b>	<b>0,15 (0,13)</b>	0,03
«глина песчаная»	3,2 (2,8)	<b>2,7 (2,9)</b>	<b>87 (120)</b>	<b>0,03 (0,03)</b>	0,001
«глина»	5,5 (5,6)	<b>6,1 (5,9)</b>	<b>287 (388)</b>	<b>0,40 (0,43)</b>	0,0001

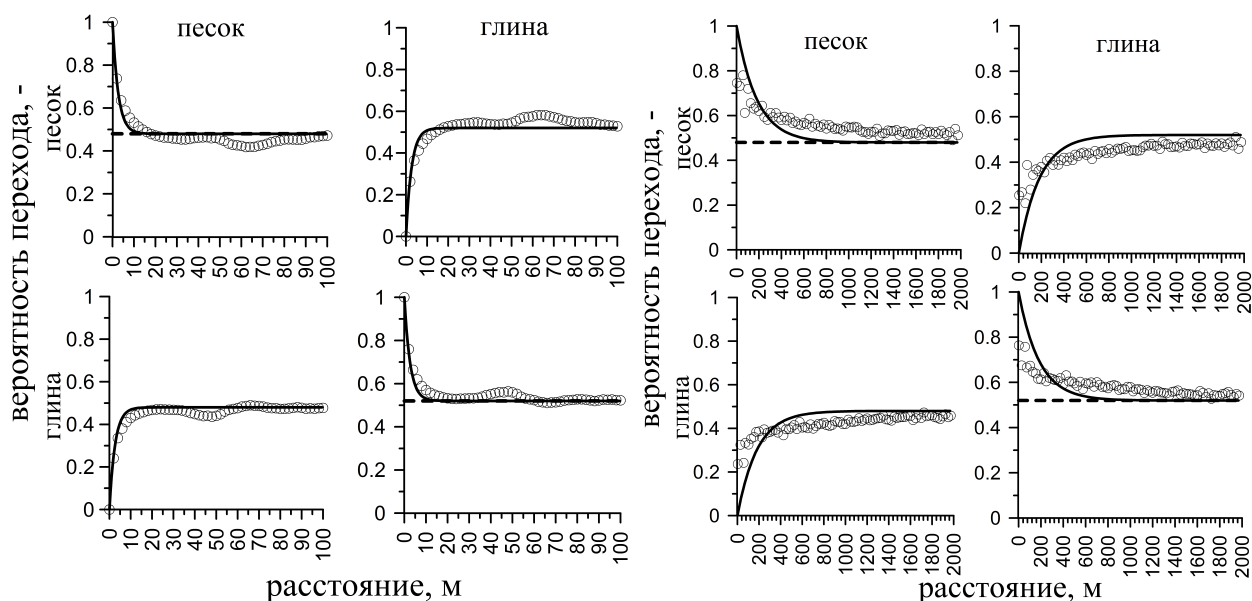
*Примечание:*  $m_{cp}$  - средняя мощность прослоев, рассчитанная по скважинам; k - коэффициент фильтрации. Жирным шрифтом выделены параметры для геостатистических моделей литологической неоднородности.

Распределения значений мощностей прослоев описываются экспоненциальным законом распределения, что свидетельствует о применимости цепи Маркова для описания вероятностей перехода одной категории в другую. Вариограммы индикаторной функции, построенные с помощью программы GSLIB<sup>11</sup>, показали, что отношение горизонтального эффективного масштаба корреляции к вертикальному составляет около 10. Анализ вариограмм индикаторной функции по горизонтали в различных направлениях показал, что масштабы корреляции в плане примерно одинаковы, что указывает на изометричную форму «осадочных тел» и дает возможность использовать изотропную в плане модель вероятностей перехода песчаных и глинистых разностей.

При принятых предпосылках о строении разреза и экспоненциальном распределении мощностей прослоев, вероятности перехода категорий описываются непрерывными цепями Маркова и на основе матрицы вероятностей перехода можно построить 3D модель неоднородности (предсказать категорию на некотором расстоянии от точки, где категория известна). Расчет эмпирических и теоретических вероятностей перехода в вертикальном и горизонтальном направлениях для определения характерных размеров категорий проводился для двух интервалов разреза (-50 – -350 м (рис. 1) и -100 – -230 м) с помощью пакета программ T-PROGS<sup>12</sup>.

<sup>11</sup>Deutsch C., Journal A. GSLIB: Geostatistical Software Library and Usres Guide. Oxford University Press, New York, 1992. 340 p.

<sup>12</sup>Carle S. F. T-PROGS: Transition Probability Geostatistical Software. Version 2.0. Davis, California: University of California, 1998. 76 p.



### Условные обозначения:

- эмпирические вероятности перехода, рассчитанные по скважинам
- аппроксимация эмпирических вероятностей экспоненциальной моделью
- - - - доля категории по эмпирическим данным

Рис. 1. Вероятности перехода в вертикальном (рисунок слева) и горизонтальном (рисунок справа) направлении для двухкомпонентной модели. Графики показывают, как изменяется вероятность перехода категории в саму себя или в другую категорию при удалении от точки, которая точно принадлежит к данной категории.

На основе проведенного геостатистического анализа данных были выбраны параметры для моделирования ТР/МС методом (табл. 1). Из табл. 1 видно, что отношение горизонтального характерного размера неоднородности к вертикальному больше 30 для всех категорий и больше 47 для основных по объему категорий; характерные вертикальные размеры неоднородности, полученные с помощью вероятностей перехода, хорошо совпадают с эмпирическими значениями средних мощностей прослоев, рассчитанных по скважинам.

## 7. Построение трехмерных моделей литологической и геофильтрационной неоднородности водовмещающих отложений

На основе ТР/МС метода были построены локальные 3D модели литологической неоднородности водовмещающих отложений района СХК [2, 11] (табл. 2) с помощью пакета программ T-PROGS.

Таблица 2. Характеристика моделей

Модель	Абсолютная отметка интервала разреза, м	Размер области моделирования, м	Размер блока, м	Число блоков
двухкомпонентная	-50 – -350	4300 x 4300 x 250	33 x 33 x 1	4225000
четырёхкомпонентная	-100 – -230	4300 x 3500 x 130	25 x 25 x 0,5	6260800

Обусловленное скважинными данными геостатистическое моделирование воспроизвело видимую слоистость водовмещающих отложений и отразило их высокую степень неоднородности (рис. 2).

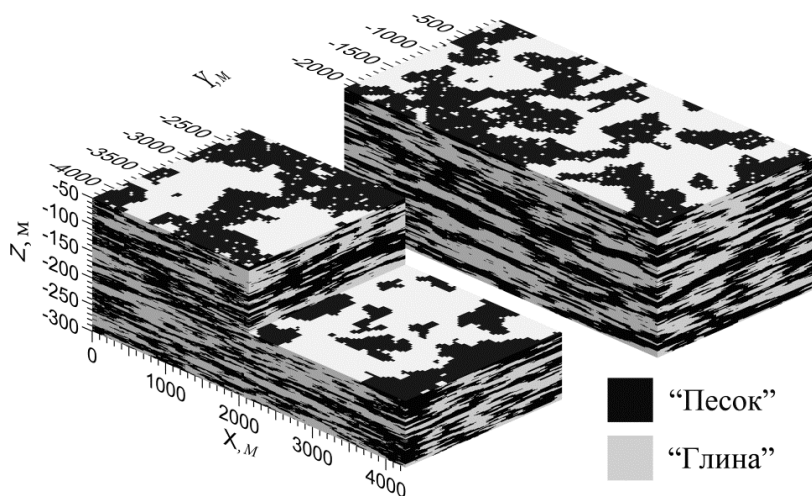


Рис. 2. Трехмерная двухкомпонентная модель литологической неоднородности водовмещающих отложений, построенная ТР/МС методом

Для контроля качества результатов моделирования модельная среда сравнивалась с исходными эмпирическими данными (рис. 3). Преобразование

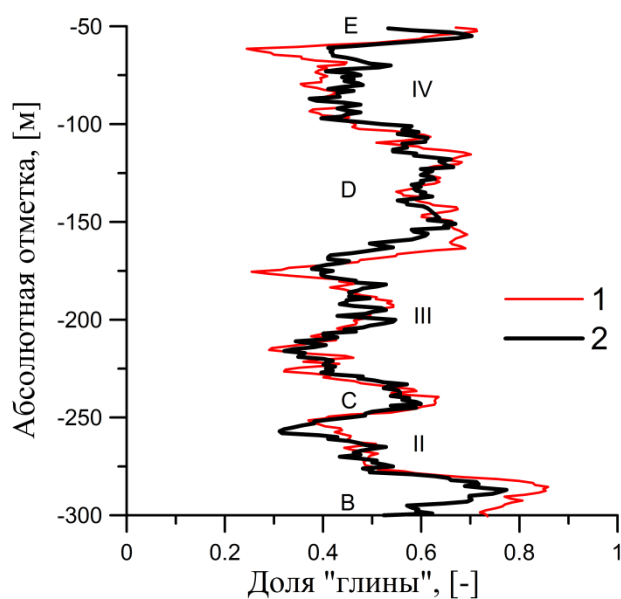


Рис. 3. Сравнение осредненной в плане доли глинистой составляющей в вертикальном разрезе по эмпирическим данным (1) и по данным модели, построенной ТР/МС методом (2).

Буквами и римскими цифрами показаны водоносные горизонты и водоупоры, соответствующие принятой на СХК стратификации разреза

литологической модели в модель геофильтрационной неоднородности осуществлялось с помощью задания значений коэффициентов фильтрации для каждой категории (табл. 1), в соответствии с их характерными значениями, определенными для условий полигона захоронения ЖРО СХК и по результатам обработки данных по гранулометрическому составу проб песка 66 скважин, расположенных в пределах ПГЗ. Пористость среды для всей области моделирования принималась равной 0,2. С целью уточнения фильтрационных и емкостных параметров категорий (табл. 3) была проведена калибровка двухкомпонентной модели фильтрационной неоднородности на основе данных замеров уровней подземных вод во II, III и IV водоносных горизонтах в наблюдательных скважинах промплощадки СХК за 1995 – 1996 г. г.

Верхний и нижний слои модели соответствовали региональным относительным водоупорам (сверху – подошва глинистого пласта Е, снизу – кровля глинистого пласта В), заключенный между ними интервал разреза с абсолютными

отметками от -50 до -300 м (включающий в себя горизонты и относительные водоупоры IV, D, III, C, II) создавался с помощью геостатистического моделирования ТР/МС методом.

Таблица 3. Значения параметров, полученные по результатам калибровки

Название параметра	Значение параметра
горизонтальный коэффициент фильтрации «песка», [м/сут]	0,86
вертикальный коэффициент фильтрации «песка», [м/сут]	0,009
изотропный (горизонтальный и вертикальный) коэффициент фильтрации «глины», [м/сут]	$4 \times 10^{-5}$

Моделировался нестационарный во времени режим фильтрационного потока подземных вод и 3D пространственная структура потока. На границах области моделирования задавалось обобщенное граничное условие III рода, которое было использовано для моделирования входящего и выходящего потока через границы модели. Калибровка проводилась при помощи программы PEST<sup>13</sup>. Из табл. 3 видно, что подобранный в результате калибровки коэффициент фильтрации «песка» анизотропен, что, по-видимому, связано с наблюдаемой в кернах микрослоистостью истинных песков, а также включением в эту модельную категорию других литологических разностей.

### 8. Моделирование истории закачки ЖРО на ПГЗ СХК

На основе 3D двухкомпонентной модели водовмещающих отложений ПГЗ СХК и используя данные по расходам нагнетательных скважин было проведено крупномасштабное численное моделирование миграции нейтрального компонента с 1967 по 2003 г.г. с помощью программы MT3DMS<sup>14</sup>. Рассматривалась миграция нейтрального компонента (например, нитрат-иона, присутствующего во всех видах ЖРО СХК) как наиболее жесткий вариант с максимально возможным распространением загрязнения в геологической среде, т. к. из результатов полевых экспериментов и литературных данных известно, что существует механизм быстрой миграции (в малых концентрациях) радионуклидов со скоростью нейтральных компонентов раствора. При моделировании учитывались локальная продольная и поперечная микродисперсивность, а также молекулярная диффузия. Двухкомпонентная модель достаточно хорошо воспроизвела изменения уровня подземных вод в процессе закачки, что свидетельствует о соответствии построенной модели геологической среде ПГЗ СХК [11]. Результаты моделирования миграции загрязнения в песчано-глинистых отложениях ПГЗ СХК показали, что ореол загрязнения имеет весьма сложную форму в пространстве в зависимости от распределения (трехмерной топологии) в пласте песчаных и глинистых тел, контролирующей флуктуации поля скоростей и, как следствие, дисперсию нейтрального компонента. Через 36 лет от начала закачки ореол загрязнения (с

<sup>13</sup>Doherty J. MODFLOW-ASP - Using MODFLOW-2000 with PEST-ASP. Watermark Computing. Australia, 2001. 156 p.

<sup>14</sup>Zheng C., Wang P. P. MT3DMS, A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and user's guide. Departments of Geology and Mathematics, University of Alabama. 1998. 224p.



безразмерной концентрацией 0,001 – 1) находится в пределах промплощадки СХК, причем загрязнение фиксируется ниже подошвы относительного водоупора D, не смотря на его прерывистое литологическое строение. Главная масса отходов находится внутри песчаных пропластков, заполнение глин в результате диффузии и адвекции играет малую роль [9, 11].

### 9. Методика определения эффективных параметров

Методика определения эффективных геофильтрационных и геомиграционных (для нейтрального компонента) параметров неоднородных песчано-глинистых водовмещающих отложений включает в себя [1, 6]:

- 1) построение 3D высокоразрешимой модели литологической неоднородности водовмещающих отложений с помощью ТР/МС метода;
- 2) преобразование литологической модели в модель геофильтрационной неоднородности с помощью задания характерного значения коэффициента фильтрации в каждую ячейку в зависимости от того, какая категория была в ней смоделирована геостатистическим методом. Значения коэффициентов фильтрации для категорий могут быть получены из литературных данных, опытно-фильтрационных работ, данных по грансоставу пород, а затем уточнены путем калибровки геофильтрационной модели;
- 3) решение стационарной фильтрационной задачи на полученной модели геофильтрационной неоднородности и расчет значения эффективного коэффициента фильтрации по формуле:

$$k_{eff} = \frac{Q l}{\omega(H_1 - H_2)}, \quad (1)$$

где  $Q$  [м<sup>3</sup>/сут] – расход фильтрационного потока,  $l$  [м] – длина пути фильтрации,  $H_1$  и  $H_2$  [м] – заданные напоры на границах модели,  $\omega$  [м<sup>2</sup>] – площадь поперечного сечения потока;

- 4) моделирование конвективного переноса нейтрального компонента из неточечного источника на полученной модели с помощью метода прослеживания случайного блуждания частиц (random walk particle tracking method);
- 5) пересчет времени прихода для частиц, прибывших на контрольную плоскость, в безразмерную концентрацию;
- 6) получение выходных кривых зависимости концентрации от времени и оценка с их помощью коэффициента макродисперсии для горизонтального и вертикального переноса.

Значения коэффициента макродисперсии  $D$  и действительной скорости фильтрации  $U$  могут быть получены из временных моментов экспериментальных выходных кривых<sup>15</sup>:

$$D = \frac{(M_2 - M_1^2)U^3}{2x} \quad (2)$$

<sup>15</sup> *Jury W. A.* Transfer functions and solute movement through soil: theory and applications. Boston, Berlin, Birkhauser: Birkhauser Verlag Basel, 1990. 346 p.

$$U = \frac{x}{M_1} \quad (3)$$

где  $x$  [м] – расстояние между местом запуска частиц и контрольной плоскостью,  $M_1$  и  $M_2$  – нормализованные временные моменты первого и второго порядка, которые могут быть определены как:

$$M_n = \frac{\int_0^{\infty} t^n C(x, t) dt}{\int_0^{\infty} C(x, t) dt} \quad (4)$$

где  $C(x, t)$  – локальная концентрация на расстоянии  $x$ ,  $t$  – время.

Продольная дисперсивность  $\alpha_L$  и расчетная пористость  $n_{eff}$  рассчитывались по формулам:

$$\alpha_L = \frac{D}{U} \quad (5)$$

$$n_{eff} = \frac{V}{U} \quad (6)$$

где средняя скорость фильтрации, полученная по результатам геофильтрационного моделирования,  $V = k_{eff} \times I = \frac{Q}{\omega}$ , где  $I$  – градиент фильтрационного потока.

#### **10. Определение эффективной проницаемости неоднородных песчано-глинистых водовмещающих отложений ПГЗ ЖРО СХК**

При пластовой схематизации разреза, используемой для регионального моделирования в районе СХК, рассматривается система пластов с высокой проницаемостью, разделенных слабопроницаемыми слоями, поэтому полученная двухкомпонентная модель геофильтрационной неоднородности разбивалась на горизонтальные слои мощностью 50 м, что соответствует средней мощности выделяемых в районе СХК водоносных горизонтов и относительных водоупоров [1]. Затем, для каждого слоя моделировалась стационарная фильтрация с помощью MODFLOW-2000<sup>16</sup> в горизонтальном направлении (перепад напорov задавали между восточной и западной границами области моделирования) и в вертикальном направлении (перепад напорov задавали между нижней и верхней границами), тем самым моделируя ситуацию наблюдаемого движения потока подземных вод от зоны закачки к зоне разгрузки и восходящего движения подземных вод в зоне разгрузки (р. Томь). По результатам моделирования рассчитывались эффективные коэффициенты фильтрации по зависимости (1) (табл. 4). Из табл. 4 видно, что горизонтальные коэффициенты фильтрации не сильно отличаются по разрезу, однако в фильтрационном отношении толща существенно анизотропна, т.к. эффективный горизонтальный коэффициент фильтрации на 2 - 3 порядка больше вертикального.

<sup>16</sup> Harbaugh A. W., Banta E. R., Hill M. C., McDonald M. G. MODFLOW-2000, the US Geological Survey modular ground-water model – User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 00-92, Reston. 2000. 130 p.

Таблица. 4. Рассчитанные эффективные коэффициенты фильтрации по различным интервалам разреза

Абсолютная отметка интервала разреза, [м]	Соответствие интервала принятой на СХК пластовой схематизации	Эффективный коэффициент фильтрации $k_{eff}$ , [м/сут]		Отношение горизонтального коэффициента фильтрации к вертикальному
		горизонтальный	вертикальный	
Двухкомпонентная модель водовмещающей среды				
-50 – -100	IV горизонт	0,39	0,002	195
-101 – -150	D горизонт	0,21	0,0007	300
-151 – -200	III горизонт	0,34	0,002	170
-201 – -250	III+C горизонты	0,39	0,002	195
-251 – -300	II горизонт	0,3	0,0007	429
Четырехкомпонентная модель водовмещающей среды				
-100 – -230	III+ D	0,29	0,0015	193

Полученные данные свидетельствуют о том, что при прогнозном моделировании миграции компонентов ЖРО в районе СХК более правильно применять не пластовую схематизацию, а моделировать анизотропную систему, состоящую из слоев с примерно одинаковыми горизонтальными коэффициентами фильтрации и низкими значениями вертикального коэффициента фильтрации.

По той же методике проводилось определение эффективной проницаемости для интервала разреза с абсолютными отметками -100 – -230 м на четырехкомпонентной модели (табл. 4). По результатам оценки эффективных коэффициентов фильтрации, как для двухкомпонентной модели, так и для четырехкомпонентной модели, можно сделать вывод о значительной фильтрационной (гидравлической) анизотропии эффективной проницаемости (табл. 4). Это может быть объяснено наличием в разрезе анизотропных по форме тел: горизонтальный характерный размер неоднородности в 30 - 98 раз больше вертикального для четырехкомпонентной среды и в 68 раз больше – для двухкомпонентной среды (табл. 1).

### 11. Оценка эффективных геомиграционных параметров для ПГЗ ЖРО СХК

Для моделирования массопереноса и для вычисления траектории и времени движения частиц в конвективном потоке использовалась программа RMPATH<sup>17</sup>. В каждом численном эксперименте 4500 частиц помещались на границу с большим значением напора в ячейки 3D четырехкомпонентной модели, имеющие значение коэффициента фильтрации больше 0,002 м/сут, либо на нижнюю грань области моделирования (для вертикальной миграции), либо на правую (для горизонтальной миграции) [6].

<sup>17</sup>Chiang W. H., Kinzelbach W. 3D-Groundwater modeling with PMWIN. First Edition. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2001. 346 p.

С помощью временных моментов экспериментальных выходных кривых концентраций (рис. 4), были рассчитаны значения дисперсивности и расчетной (эффективной) пористости по формулам (5), (6) для вертикального и горизонтального направлений переноса (табл. 5).

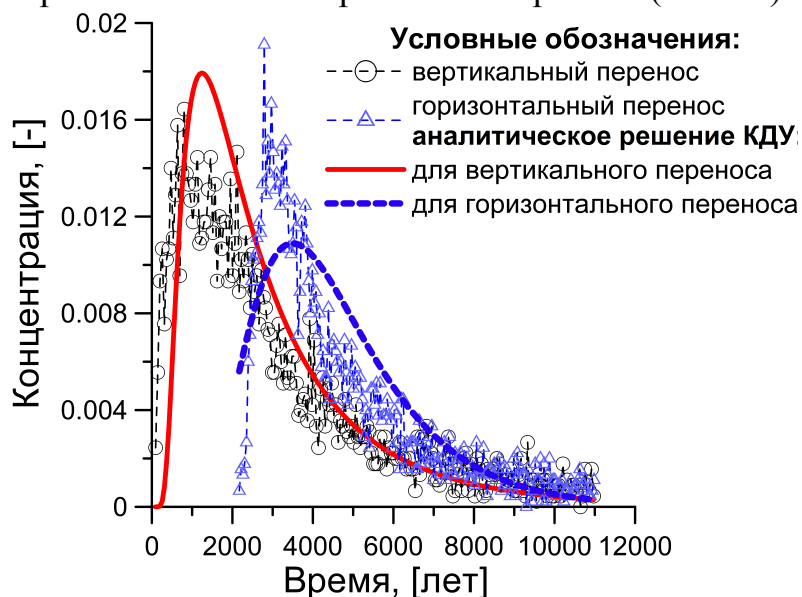


Рис. 4. Сравнение выходных кривых концентраций, вычисленных по времени прихода частиц на контрольную плоскость

Таблица 5. Рассчитанные эффективные параметры, полученные с помощью четырехкомпонентной модели

Направление потока	Коэффициент макродисперсии $D$ , [м <sup>2</sup> /сут]	Дисперсивность $\alpha_L$ , [м]	Расчетная пористость $n_{eff}$ , [-]
Вертикальное	0,005	43	0,48
Горизонтальное	1,02	401	0,14

Из табл. 5 видно, что значения продольной макродисперсивности отличаются на порядок в зависимости от направления потока. При региональном моделировании геомиграции компонентов ЖРО в районе СХК можно предложить использовать значение вертикальной дисперсивности для зоны разгрузки подземных вод, а значение горизонтальной дисперсивности — для зоны транзита. Однако необходимо заметить, что форма выходных кривых не совсем точно описывается (рис. 4) с помощью аналитического решения уравнения макродисперсии (для одномерного линейного переноса нейтрального мигранта из мгновенного источника<sup>15</sup>):

$$C^f(x, t) = f^f(x, t) = \frac{x}{2\sqrt{\pi Dt^3}} \exp\left(-\frac{(x - Ut)^2}{4Dt}\right) \quad (7)$$

где  $C^f$  — текущая концентрация растворенного вещества,  $f^f(x, t)$  — функция плотности вероятности времен прибытия. Значение расчетной пористости для вертикального переноса в 2,4 раза больше заданной в модели пористости равной 0,2 (табл. 5). Это связано с тем, что в формуле расчета эффективной пористости (6) используется значение действительной скорости фильтрации  $U$ , полученной по формуле (3), в которой задается расстояние от места запуска частиц до контрольной плоскости. Однако в действительности при таком неоднородном строении среды частицы проходят гораздо большее расстояние,

т.к. они движутся не вертикально вверх, а извилистым путем по проницаемым элементам разреза, огибая слабопроницаемые (максимальный характерный размер которых ориентирован перпендикулярно направлению фильтрационного потока). С позиций долговременной миграции загрязнения полученное повышенное значение вертикальной эффективной пористости может быть интерпретировано, как влияние заполнения хорошо проницаемых тел (прослоев) загрязнением при миграции перпендикулярно напластованию.

Таким образом, результаты моделирования миграции загрязнения для неоднородных песчано-глинистых водовмещающих отложений ПГЗ СХК показали ограниченность применения стандартной макродисперсионной модели.

## **12. Влияние схематизации неоднородности осадочных отложений на прогноз миграции загрязнения**

Для оценки влияния схематизации неоднородности песчано-глинистой толщи ПГЗ ЖРО на прогноз миграции загрязнения в районе СХК использовались две модели неоднородности, построенные на основе одних и тех же данных колонок литологического расчленения разрезов более 250 скважин [2]. Модель № 1 была построена на основе ТР/МС метода, модель № 2 (разработанная в лаборатории геотехнологического мониторинга СХК) - на основе двумерной плановой кригинг-интерполяции мощностей элементарных геологических слоев, выделенных в разрезе на основе неформального анализа. В модели № 1 учитывалась негоризонтальная поверхность палеозойских отложений, путем задания ее реальной топографии. Моделировался интервал ПГЗ с абсолютными отметками -100 – -200 м. Размеры моделируемой области составили 2500 x 2500 x 100 м (размер блока 25 x 25 x 1 м). На каждой модели фильтрационной неоднородности моделировалась стационарная фильтрация с помощью MODFLOW-2000 и конвективный перенос нейтрального компонента от одной границы моделируемой области до противоположной с помощью программы РМРАТН. Обе модели имели одну и ту же модельную сетку и одинаковые значения напоров на противоположных гранях, значит, расход через моделируемую область и время прибытия частиц будут зависеть только от распределения коэффициента фильтрации внутри моделируемой области.

Результаты моделирования показали, что эффективный горизонтальный коэффициент фильтрации, практически одинаков для обеих моделей; эффективный вертикальный коэффициент фильтрации модели № 1 в 1,6 раза больше, а время прихода первых порций загрязнения в 4 раза быстрее, чем в модели № 2 (табл. 6). В среднем первые частицы приходят в 3 - 4 раза быстрее, чем характерное время конвективного переноса для всех вариантов за исключением вертикальной миграции в модели № 1, когда первые частицы приходят почти в 10 раз быстрее, чем среднее время конвективного переноса (табл. 6). Модель № 2 более консервативна за счет большей горизонтальной протяженности слоев, поэтому для анализа гипотетических аварийных ситуаций и прогноза долговременной миграции компонентов ЖРО

целесообразней использовать модели, построенные на основе ТР/МС метода [2]. В связи с этим, полученные в данной работе значения продольной дисперсивности использованы для выполнения среднесрочных и долгосрочных прогнозов распространения компонентов ЖРО в районе СХК.

Таблица 6. Эффективные коэффициенты фильтрации и характерные времена движения частиц

Параметр	Горизонтальная фильтрация		Вертикальная фильтрация	
	Модель №1	Модель №2	Модель №1	Модель №2
Эффективный коэффициент фильтрации $k_{eff}$ , [м/сут]	0,244	0,221	$7,2 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-4}$
Среднее время конвективного переноса $t$ , [лет]	2750	3040	1490	2380
Время прихода первых частиц, [лет]	700	860	156	650
Время прихода 50% частиц, [лет]	5600	5460	3700	2900

Примечание:  $t = \frac{l}{U}$ , где средняя скорость движения частиц  $U = k_{eff} \frac{H_1 - H_2}{ln}$ , где  $n$  – активная пористость равная 0,2.

### Заключение

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1) Прогнозные расчеты миграции компонентов ЖРО должны производиться с максимально возможным учетом внутренней 3D структуры фильтрационной неоднородности водовмещающей толщи. Трехмерная локальная модель геофильтрационной неоднородности, имеющая высокое разрешение и построенная на основе доступных данных, позволяет обосновать эффективные (расчетные) параметры для долгосрочного моделирования миграции компонентов ЖРО в неоднородной геологической среде, а также получить начальное распределение концентраций нейтрального компонента ЖРО необходимое для прогнозной модели. Тем самым, решается актуальная проблема повышения достоверности и надежности гидрогеологических прогнозов миграции загрязнения в неоднородных водовмещающих отложениях.

2) В качестве наиболее подходящего метода для создания 3D модели литологической неоднородности песчано-глинистых пластов-коллекторов и относительных водоупоров предлагается использовать ТР/МС метод. Этот метод обладает рядом преимуществ по сравнению с другими геостатистическими методами: способен включать характерные размеры (в том числе средние мощности) и объемные доли категорий, а также учитывать предпочтения в расположении категорий относительно друг друга в

пространстве; является методом, хорошо зарекомендовавшим себя для создания литологических моделей водовмещающих отложений различного генезиса. Для перехода от модели литологической неоднородности к модели геофильтрационной неоднородности можно использовать характерные значения проницаемости основных литологических разностей, а затем уточнять их путем калибровки геофильтрационной модели.

3) Геостатистический анализ данных детального литологического расчленения разрезов 295 скважин, расположенных в районе СХК, показал, что водовмещающие отложения ПГЗ СХК имеют неоднородное литологическое строение. Осадочная толща представляет собой сложное чередование песчаных и глинистых прослоев, которые формируют ритмы более песчанистые и более глинистые. Комплексный анализ данных показывает, что изучаемый разрез, включающий пласты - коллекторы, буферный горизонт и разделяющие их относительные водоупоры, может быть представлен в виде двухкомпонентной модели (состоящей из хорошо и слабопроницаемых литологических разностей) или в виде более детальной четырехкомпонентной модели. Основные литологические разности имеют примерно равные доли в изучаемом интервале разреза (например, для двухкомпонентной среды: 0,46 – для глинистой разности и 0,54 – для песчаной), отношение горизонтального размера неоднородности к вертикальному размеру больше 47.

4) Анизотропия эффективного масштаба корреляции (отношение горизонтального эффективного масштаба корреляции к вертикальному составляет около 10) обуславливает фильтрационную анизотропию водовмещающих отложений: эффективный вертикальный коэффициент фильтрации на 2 - 3 порядка меньше горизонтального.

5) Моделирование миграции нейтрального компонента на 3D двухкомпонентной модели водовмещающих отложений ПГЗ СХК показало, что через 36 лет от начала закачки ореол загрязнения с безразмерной концентрацией 0,001 – 1 находится в пределах промплощадки СХК, причем загрязнение фиксируется ниже подошвы относительного водоупора D, не смотря на его прерывистое литологическое строение. Таким образом, благодаря анизотропии эффективной проницаемости пласты-коллекторы и относительные водоупоры обладают защитными свойствами, препятствующими быстрой миграции компонентов жидких отходов в вертикальном направлении.

6) Значения эффективной проницаемости, полученные по предложенной методике, позволяют уточнить геофильтрационную схематизацию вертикального разреза в случае неоднородного песчано-глинистого строения водовмещающих отложений, а также могут быть использованы при создании прогнозных моделей геомиграции компонентов отходов в неоднородной водовмещающей среде. Так, например, по результатам оценки эффективной проницаемости в районе ПГЗ СХК можно сделать вывод, что при прогнозном моделировании миграции компонентов ЖРО в районе СХК более правильно применять не пластовую схематизацию, а моделировать анизотропную систему, состоящую из слоев с примерно одинаковыми горизонтальными

коэффициентами фильтрации и низкими значениями вертикального коэффициента фильтрации.

7) Оценка влияния схематизации неоднородности песчано-глинистой толщи ПГЗ ЖРО СХК на прогноз миграции загрязнения с помощью двух моделей (первой - построенной с помощью ТР/МС метода и второй - построенной при помощи двумерной плановой кригинг-интерполяции мощностей элементарных слоев), показала, что основные отличия моделей проявляются при вертикальной фильтрации и конвективном вертикальном переносе частиц. Учитывая большую консервативность модели, основанной на кригинг-интерполяции значений мощности слоев, для анализа гипотетических аварийных ситуаций целесообразней использовать модели, построенные на основе ТР/МС метода.

8) Результаты моделирования миграции показали ограниченность применения стандартной макродисперсионной модели для неоднородных песчано-глинистых водовмещающих отложений ПГЗ СХК. Полученные значения продольной макродисперсивности отличаются на порядок в зависимости от направления потока. Для получения эффективных геомиграционных параметров долгосрочных моделей для случая исследуемых неоднородных песчано-глинистых водовмещающих отложений района СХК необходимо разрабатывать более сложные модели массопереноса, не основанные на стандартном макродисперсионном подходе.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

##### **в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. **Бакшевская В.А.** Оценка эффективной проницаемости песчано-глинистых толщ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология. – 2005. – № 1. – С. 45-47.

2. Поздняков С.П., **Бакшевская В.А.**, Крохичева И.В., Данилов В.В., Зубков А.А. Влияние схематизации неоднородности осадочных отложений на прогноз миграции загрязнения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология. – 2012. – № 1. – С. 40-48.

3. **Бакшевская В.А.**, Поздняков С.П. Методы моделирования геофильтрационной неоднородности осадочных отложений // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2012. – № 6. – С. 560-570.

##### **в других изданиях:**

4. **Бакшевская В.А.** Моделирование литологической неоднородности водовмещающих отложений в районе промплощадки СХК для оценки миграции закачиваемых в них отходов / Тезисы докладов Первой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 2002. – С. 16-17.

5. **Бакшевская В.А.** Оценка эффективной проницаемости песчано-глинистых толщ / Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». Выпуск 9. – М.: Издательство МГУ, 2003. – С. 96.



6. **Бакшевская В.А.** Оценка эффективных геофильтрационных и геомиграционных параметров в неоднородных водоносных толщах / Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование, практика. Материалы международной научной конференции. Москва, 22-24 мая 2013. – М.: МАКС Пресс, 2013. – С. 276-282.

7. Поздняков С.П., **Бакшевская В.А.**, Крохичева И.В. Использование трехмерных цепей Маркова для построения моделей пространственной неоднородности водовмещающих отложений / Научная конференция «Ломоносовские чтения» - 2003: Тезисы докладов. Под ред. Б.А. Соколова и Д.Ю. Пушаровского. – М.: Издательство МГУ, 2003.

8. **Бакшевская В.А.**, Крохичева И.В. Сравнение двух моделей фильтрационной неоднородности песчано-глинистой толщи на основе моделирования эффективной проницаемости разреза / Материалы четвертой межвузовской молодежной научной конференции «Школа экологической геологии и рационального недропользования». Под ред. В.В. Куриленко. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. – С. 137-138.

9. Pozdniakov S.P., **Bakshevskaya V.A.**, Zubkov A.A. et al. 3D Modeling of Injected Waste Transport in Sandy-Clay Formation / Second International Symposium «Underground Injection Science and Technology». – Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, California, October 22-25, 2003. – P. 51-52.

10. Zubkov A.A., Sukhorukov V.A., Zykov A.I., Redkin E.A., Pozdniakov S. P., Shestakov V.M., **Bakshevskaya V.A.** and Kurockin V.M. Experimental Study of Injection Interval Hydraulic Isolation from Overlie Formation at the Siberian Chemical Complex Disposal Site Using High-Accuracy Hydraulic Head Measurements / Second International Symposium «Underground Injection Science and Technology». – Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, California, October 22-25, 2003. – P. 59-60.

11. Pozdniakov S.P., **Bakshevskaya V.A.**, Zubkov A.A., Danilov V.V., Rybalchenko A.I., Tsang C.-F. Modeling of waste injection in heterogeneous Sandy-Clay formations // In. "Underground Injection science and technology, Berkeley California". Edited by C.F. Tsang and J.Apps. – Berkeley: Elsevier, 2005. – P. 203-209.

12. Zubkov A.A., Sukhorukov V.A., Zykov A.I., Redkin E.A., Pozdniakov S. P., Shestakov V.M., **Bakshevskaya V.A.** and Kurockin V.M. Experimental Study of Injection Interval Hydraulic Isolation from Overlying Formation at the Disposal Site of the Siberian Chemical Complex Using High-Accuracy Hydraulic Head Measurements // In. "Underground Injection science and technology". Edited by C.F. Tsang and J.Apps. – Berkeley: Elsevier, 2005. – P. 151-155.