

УДК 556.3

С.П. Поздняков<sup>1</sup>, В.А. Бакшевская<sup>2</sup>, И.В. Крохичева<sup>3</sup>, В.В. Данилов<sup>4</sup>, А.А. Зубков<sup>5</sup>

## ВЛИЯНИЕ СХЕМАТИЗАЦИИ НЕОДНОРОДНОСТИ ОСАДОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОГНОЗ МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ<sup>6</sup>

Рассмотрено построение модели неоднородности слоистой песчано-глинистой толщи и ее влияние на прогноз миграции загрязнения. В качестве исходной информации использованы данные колонок литологического расчленения более 250 скважин, вскрывающих 300-метровый разрез на площади около 40 км<sup>2</sup>. По этим данным построены две модели литологической неоднородности, которые затем трансформированы в модели геофильтрационной неоднородности. Первая модель построена при помощи анализа вероятностей перехода и моделирования трехмерных цепей Маркова для четырех гидрофаций, а вторая — при помощи двумерной плановой кригинг-интерполяции мощности выделенных на основе неформального анализа элементарных прослоев. Результаты прогноза миграции консервативного трассера показывают, что обе модели дают приблизительно одинаковые результаты для миграции вдоль направления слоев. Основные отличия моделей проявляются при вертикальном переносе. Модель, основанная на кригинг-интерполяции мощности геологических слоев, более консервативна за счет большей пространственной протяженности слоев в горизонтальном направлении. Поэтому эффективный расчетный вертикальный коэффициент фильтрации этой модели в 2 раза меньше, чем в модели, основанной на цепях Маркова, а время прихода первых порций загрязнения более чем в 4 раза медленнее.

*Ключевые слова:* неоднородность, цепи Маркова, кригинг, анизотропия, эффективные параметры, миграция загрязнения.

Development of heterogeneity model of layered sandy-clay formation and impact of this model on transport is considered. The lithological data of more than 250 wells that captured 300 meters formation at the investigated area of 40 km<sup>2</sup> are used for model of heterogeneity construction. Two models of heterogeneity were developed with using these well data: TP/MC model based on 3D Markov chain simulation for four hydrofacies and 2D kriging interpolation of thicknesses of elementary lithological layers. Simulation of conservative transport by particle tracking algorithm shows that horizontal transport along layers is similar for both models. The main difference is in vertical transport cross formation bedding. The kriging interpolation model gives more conservative results than TP/MC model due to larger characteristic horizontal length of layers in the kriging model. As the result vertical effective permeability of formation is in two times larger and the first particle arriving time is in four times faster in TP/MC model.

*Key words:* heterogeneity, Markov chain, kriging, anisotropy, effective parameters, contaminant transport.

**Введение.** Базой исследования послужили разрезы разведочных, эксплуатационных и наблюдательных скважин, пробуренных в районе Сибирского химического комбината (СХК) в течение последних 50 лет. С 1963 г. на СХК, расположенном в районе г. Томск, захоранивают жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) в водоносные горизонты, имеющие неоднородное литологическое строение. Геологический разрез района имеет четкое двухъярусное строение: нижний ярус — палеозойский фундамент, верхний — мезозойско-кайнозойский чехол. Мезозойско-кайнозойские отложения чехла представлены слож-

ным чередованием песчаных и глинистых прослоев. Прослой формируют более песчанистые (водоносные горизонты) и более глинистые (водоупоры) ритмы. В разрезе чехла общей мощностью около 400 м в районе СХК выделено 7 водоносных горизонтов, разделенных водоупорными слоями. Захоронение ЖРО проводится на полигонах глубинного захоронения в водоносные горизонты, расположенные на глубине 270–390 м от поверхности земли [Рыбальченко и др., 1994] и представленные разнородными песками с примесью глинистого материала [Черняев и др., 2002]. Отложения, используемые для захоронения отходов,

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, заведующий кафедрой, профессор, *e-mail:* spozd@geol.msu.ru

<sup>2</sup> ИвНИС Института водных проблем РАН, мл. науч. с., *e-mail:* bakshev@mail.ru

<sup>3</sup> ООО «ГеоГрадСтрой», инженер-гидрогеолог, *e-mail:* irina\_kro@mail.ru

<sup>4</sup> Сибирский химический комбинат, лаборатория геотехнического мониторинга, инженер-гидрогеолог, *e-mail:* vvdanilov@list.ru

<sup>5</sup> Сибирский химический комбинат, лаборатория геотехнического мониторинга, заведующий лабораторией, *e-mail:* geomon97@mail.ru

<sup>6</sup> Работа выполнена при поддержке АФГИР (грант № RG2-2395-МО-02) и РФФИ (грант № 11-05-00478-а).

имеют поздне меловой—раннепалеоценовый возраст (сантон—датский ярус) и относятся к сымской свите [Подобина, 2009], их формирование происходило в континентальных и прибрежно-морских условиях (обстановка прибрежной низменной равнины, временами заливавшейся морем) [Подобина, 2009; Гольберт, 1987; Булыникова, Сурков, 1962].

Обоснованность геофильтрационного и геомиграционного прогнозного моделирования в подобных гетерогенных средах зависит от детальной характеристики геофильтрационной неоднородности. По результатам геостатистического анализа закономерностей пространственного распределения литологических разностей пород, проведенного на основе литологического расчленения разрезов скважин в районе промплощадок СХК, ранее была построена трехмерная бинарная модель пространственной неоднородности хорошо и слабопроницаемых разностей [Pozdniakov et al., 2005]. Цель работы — построение модели неоднородности с более детальной характеристикой осадочных отложений мезозойско-кайнозойского чехла, включающей четыре гидрофации и учитывающей существенно негоризонтальное залегание кровли палеозойских пород в исследуемом районе, а также сравнение результатов моделирования миграции на этой модели с результатами, полученными на упрощенной модели, основанной на кригинг-интерполяции отдельных слоев.

**Геостатистические методы, используемые для построения моделей пространственной неоднородности.** Для создания моделей пространственной неоднородности осадочных отложений широко используются геостатистические методы моделирования. Их можно подразделить на две основные группы — имитирующие процесс и имитирующие структуру [Koltermann, Gorelick, 1996]. Первая группа основана на прямом математическом моделировании физических процессов, управляющих эрозией, транспортировкой и накоплением осадков. Ее главный недостаток при построении геофильтрационных и геомиграционных моделей конкретных объектов заключается в том, что получающиеся модели не обусловлены скважинными данными.

Вторая группа методов основана на статистических характеристиках, вероятностных законах и численно воспроизводит пространственные структуры без прямого учета осадочных процессов. К этой группе методов относятся статистические сеточные методы реконструкции и моделирования гидрофаций (ГРМ), использующие широкий диапазон входной информации и обеспечивающие детальное трехмерное изображение распределения гидрофаций в пространстве [Falivene et al., 2007]. В зависимости от результата все ГРМ можно разделить на две группы: детерминированные и стохастические [Falivene et al., 2007]. Детерминированные методы, например кригинг и метод обратно взвешенных расстояний, дают в результате применения интерполяционных

алгоритмов единственную модель, показывающую сглаженную оценку параметра, особенно по мере удаления от точек опробования. Стохастические методы дают набор равновероятных моделей, обусловленных скважинными данными, причем каждая модель воспроизводит исходные геостатистические характеристики (закон распределения и пространственную корреляцию параметра) [Дюбрал, 2002].

В зависимости от используемого алгоритма все ГРМ можно разделить на две группы — объектно ориентированные и пиксельные [Falivene et al., 2007]. При объектно ориентированном подходе литологические тела моделируются в виде распределенных в пространстве простых форм, характерных для осадочных отложений. При использовании объектного моделирования на практике адекватные результаты можно получить только для случаев пластов с высоким коэффициентом песчаности [Пинус, Пайразян, 2008]. Пиксельные методы заполняют каждую ячейку сетки гидрофациями в соответствии с рассчитанной функцией распределения вероятностей. В зависимости от типа используемых переменных пиксельные методы могут быть непрерывными (пористость, коэффициент фильтрации) и индикаторными (для категориальных переменных, таких, как геологические фации, литологические типы горных пород). В обоих подходах описание геологической структуры осуществляется через индикаторную вариограмму или индикаторную ковариационную функцию, но в первом подходе оценка пространственных структурных моделей, как правило, проблематична из-за малого количества данных о проницаемости и их удаленности в пространстве [Weissmann et al., 1999]. Индикаторные методы используют более доступные литологические данные, позволяют моделировать отдельные литотипы и не зависят от вида распределения. К наиболее часто применяемым пиксельным методам относится метод усеченного гауссовского моделирования (Truncated Gaussian simulation — TGS) и метод последовательного индикаторного моделирования (Sequential indicator simulation — SIS). Метод TGS используется для непрерывных переменных и подходит для отложений, предполагающих высокоупорядоченную модель, в то время как метод SIS используется для категориальных переменных и применяется для самых разнообразных обстановок осадконакопления [Falivene et al., 2007].

Важная разновидность традиционной индикаторной геостатистики — метод вероятностей перехода, основанный на цепях Маркова (TP/MC-метод) [Carle, Fogg, 1996, 1997; Weissmann, Fogg, 1999]. Марковские цепи используются для предсказания предпочтительных литофациальных последовательностей [Koltermann, Gorelick, 1996]. Используемые параметры (число категорий, их доля и характерные размеры в латеральном и вертикальном направлениях, а также закономерности чередования литофаций) можно оценить или эмпирически через прямые измерения, или с

помощью качественной геологической интерпретации [Weissmann et al., 1999; Weissmann, Fogg, 1999].

Основные преимущества метода ТР/МС — объединение всей доступной геологической информации для построения геологически правдоподобной и реалистичной трехмерной модели пространственной изменчивости отложений (что особенно важно в не-вертикальных направлениях); способность включать средние значения мощности и объемную долю категориальных переменных; возможность моделировать асимметричные фациальные последовательности (например, увеличение или уменьшение зернистости вверх по разрезу, причем контакт литотипов может быть как ступенчатым, так и резким); легкость геологической интерпретации вероятностей перехода по сравнению с вариограммами или автоковариационными функциями [Elfeki, Dekking, 2001]. Существует много примеров использования метода ТР/МС для создания моделей литологической неоднородности в аллювиальных [Weissmann, Fogg, 1999; Sivakumar et al., 2005; Dai et al., 2007; Sun et al., 2008; Engdahl et al., 2010] и флювиогляциальных [Ritzi et al., 2000; Proce et al., 2004] водовмещающих отложениях, а также в морских [Yong, Fogg, 2003], озерных и дельтовых [Bishop et al., 2007].

**Анализ исходных данных.** На основе данных детального литологического расчленения разрезов 261 скважины (в общей сложности более 50 км), расположенных в пределах полигонов глубинного захоронения СХК, в изучаемом интервале выделяют 17 литологических типов (табл. 1). Минимальная мощность прослоев, выделенных при расчленении, составляет 0,5 м. Преобладают в разрезе по суммарной мощности песок и глина (41 и 35% соответственно), далее следуют каолиновая глина, глинистые брекчии, песок глинистый, глина песчанистая, конгломерат. Доли остальных встреченных литологических разновидностей составляют меньше 1% (табл. 1). Часть разновидностей нехарактерна для мезозойско-кайнозойского чехла, что, по-видимому, связано с тем, что отдельные скважины вскрыли кору выветривания палеозойского фундамента.

В зависимости от характерных значений относительной проницаемости пород все литологические типы, встреченные в разрезе, отнесены к одной из гидрофаций: песок, песок глинистый, глина песчанистая и глина (табл. 1). Таким образом, всю толщу отложений представили как состоящую из четырех гидрофаций.

**Геостатистическое моделирование.** Анализ мощности показывает, что распределение значений мощности прослоев каждой гидрофации хорошо описывается экспоненциальным законом, который соответствует модели простой цепи Маркова, поэтому построение модели литологической неоднородности проводилось на основе метода ТР/МС. Построение модели неоднородности осуществлялось с использованием пакета программ T-PROGS [Carle, 1998].

Таблица 1

Доля встреченных в разрезе литологических типов

Литологический тип	Суммарная мощность во всех скважинах, м	Доля, %	Наименование гидрофации
Песок	21 492,4	40,63	песок
Песок гравелистый	12,5	0,02	
Глина	18 393	34,77	глина
Каолиновая глина	4059	7,67	
Глинистые брекчии	3367	6,36	песок глинистый
Песок глинистый	3176,5	6,00	
Конгломерат	683,5	1,29	
Глина песчанистая	1375,6	2,60	глина песчанистая
Сланец выветрелый	143,6	0,27	
Аргиллит	64,5	0,12	
Лигнит	46	0,09	
Интрузия выветрелая	30	0,06	
Алеврит	27,9	0,05	
Сланец	10	0,02	
Песчаник	12	0,02	
Алевролит	10	0,02	
Сумма	52 903,5	99,99	

Первый шаг при моделировании неоднородности заключался в построении эмпирических кривых вероятностей перехода каждой гидрофации саму в себя и в другие гидрофации, к которым подбирали модельные (теоретические) кривые вероятностей перехода. Для вертикального направления эмпирические и модельные кривые хорошо совпадают (рис. 1), а полученные характерные размеры прослоев соответствуют рассчитанному среднему значению мощности прослоев (табл. 2). Для горизонтального направления модельные кривые хуже описывают эмпирические данные (рис. 2). Поэтому подбор характерных латеральных размеров прослоев осуществлялся с использованием контрольного неоднократного моделирования трехмерной структуры неоднородности среды. Затем выбирали вариант, для которого лучше совпала кривая доли каждой гидрофации в разрезе, построенная по эмпирическим данным колонок скважин, с кривой, построенной по результатам моделирования (рис. 3). На рис. 3 видно, что модельная осредненная доля каждой гидрофации в разрезе показывает те же тенденции, что и кривая осреднения по скважинам. При этом более сглаженный вид модельных результатов по сравнению с осреднением по скважинам объясняется большим числом точек, использованных для этого осреднения. Характерные модельные размеры гидрофаций в горизонтальном направлении, выбранные в результате такого подбора, приведены в табл. 2.

Второй шаг заключался в моделировании трехмерного распределения гидрофаций SIS-методом на основе подобранных модельных кривых вероятностей перехода в горизонтальном и вертикальном направлениях. При моделировании путем задания реальной

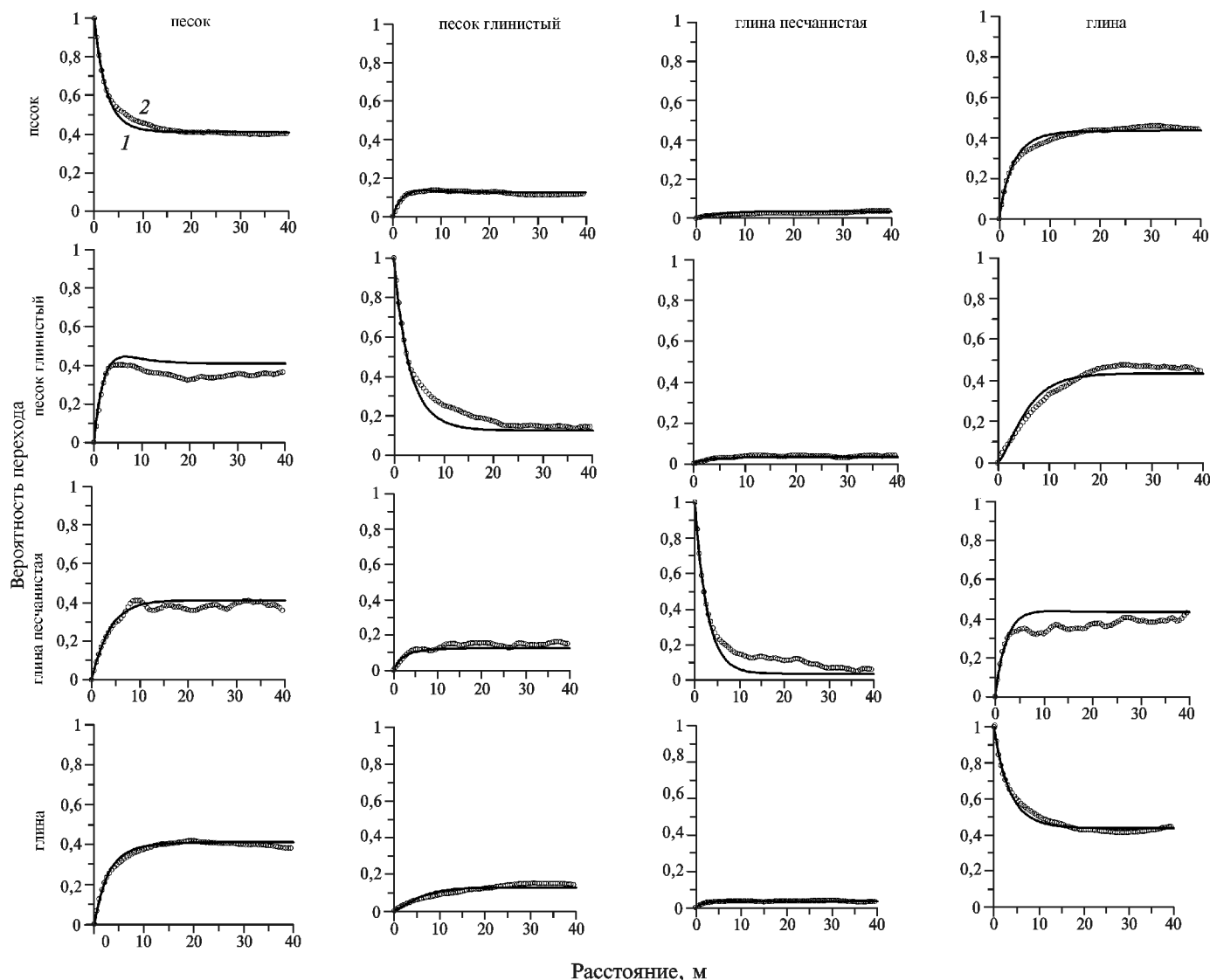


Рис. 1. Модельные (1) и эмпирические (2) вероятности перехода одной гидрофации в другую в вертикальном направлении

Таблица 2

**Характерные размеры и доли выделенных в изучаемом разрезе гидрофаций**

Гидрофация	Средняя мощность прослоев, рассчитанная по скважинам, м	Модель вероятностей перехода		Доля выделенных гидрофаций в разрезе, %
		характерный размер прослоев в вертикальном направлении, м	характерный латеральный размер прослоев, м	
Песок	5,7	4,6	400	45,8
Песок глинистый	4,2	4	203	11,8
Глина песчаная	2,9	2,9	100	3,3
Глина	4,9	4,9	349	39,1

топографии учитывалось, что поверхность палеозойских отложений негоризонтальна. Размеры области моделирования составили в плане 5000×8025 м (шаг сетки по осям 25 м), вертикальный размер 350 м с шагом сетки 1 м.

Таким образом, была получена модель литологической неоднородности исследуемого района на основе ТР/МС-метода (далее в статье — модель № 1).

Альтернативная модель литологической неоднородности изучаемой области разработана в лаборатории геотехнологического мониторинга СХК, модель создавалась на основе геологической интерпретации тех же литологических данных (по 261 скважине) и в тех же границах интерполируемой области в плане, но здесь использован другой подход к интерполяции данных. В модели СХК (далее — модель № 2) на основе

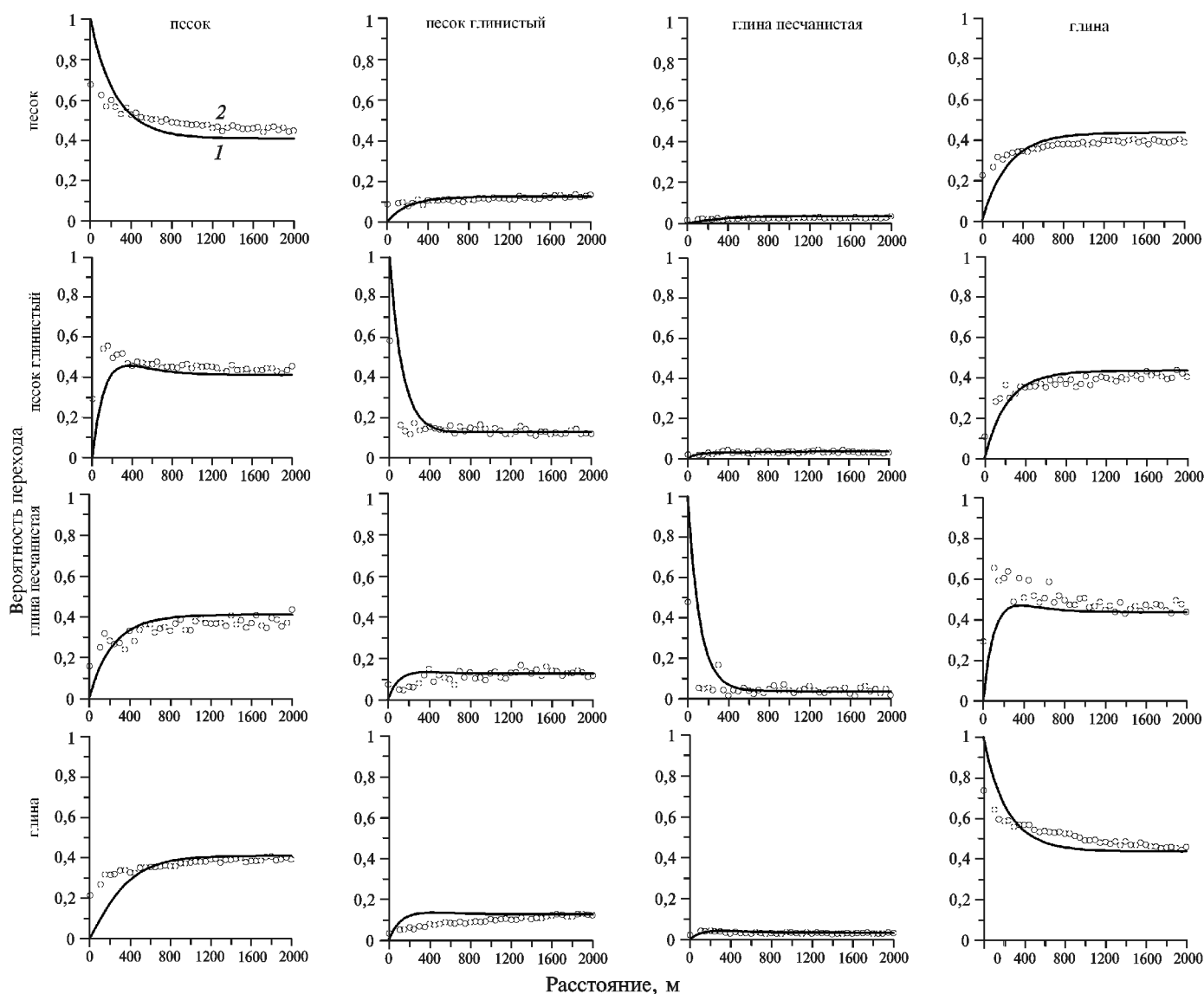


Рис. 2. Модельные (1) и эмпирические (2) вероятности перехода одной гидрофации в другую в горизонтальном направлении

неформального анализа в изучаемом разрезе выделено 159 элементарных геологических слоев. Затем при помощи двумерной кригинг-интерполяции интерполировались отметки кровли и подошвы каждого слоя на всю моделируемую область. Полученный результат корректировался проверкой отсутствия пересечения слоев и отрицательных значений мощности каждого слоя. При этом допускалось выклинивание слоя.

Таким образом, на первом этапе получены две модели литологической неоднородности исследуемого района — модель № 1 на основе ТР/МС-подхода и модель № 2, использующая кригинг-интерполяцию мощности выделенных в разрезе элементарных геологических слоев. На рис. 4 приведен разрез по западной границе смоделированной области для обеих моделей. На каждой модели литологической неоднородности выделялась представительная подобласть в районе полигона глубинного захоронения СХК (с интервалом абсолютных отметок от  $-100$  до  $-200$  м) размером  $2500 \times 2500 \times 100$  м, включающая миллион расчетных

блоков ( $100 \times 100 \times 100$ ) и использовавшаяся для дальнейшего геофильтрационного и геомиграционного моделирования. Выделенный участок покрыт густой сетью скважин, поэтому использовали только одну реализацию моделирования литологической неоднородности методом ТР/МС.

**Геофильтрационное и геомиграционное моделирование.** На втором этапе полученные литологические модели были преобразованы в модели геофильтрационной неоднородности. Трансформацию литологической модели № 1 осуществляли с помощью задания значения коэффициента фильтрации (м/сут) для каждой гидрофации (песок — 1, песок глинистый — 0,01, глина песчаная — 0,001, глина — 0,0001). Следует отметить, что эти значения коэффициента фильтрации вполне характерны для изучаемой толщи [Рыбальченко и др., 1994; Pozdniakov et al., 2005].

Для модели № 2 использовали значения коэффициента фильтрации, рассчитанные по формуле степенного взвешивания:

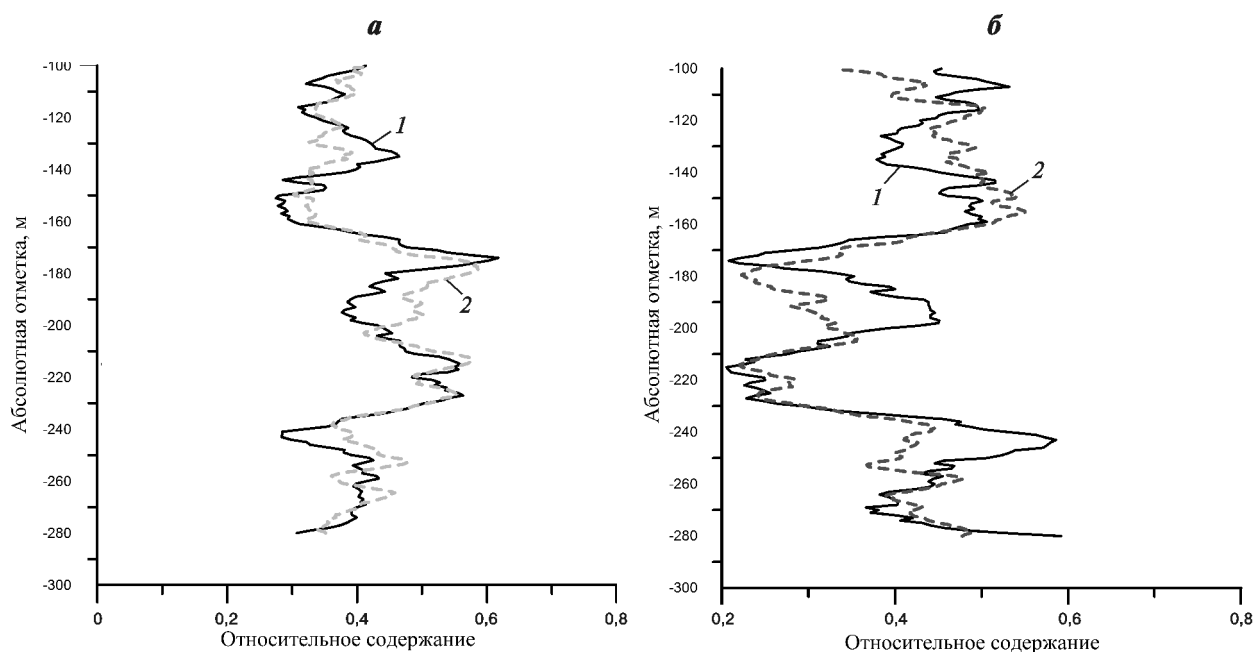


Рис. 3. Осредненное по площади модели распределение по вертикали доли песчаной (а) и глинистой (б) гидрофаций в разрезе

$$k_{ef} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^4 N_i k_i^n}{\sum_{i=1}^4 N_i} \right]^{1/n},$$

где  $k_{ef}$  — эффективный коэффициент фильтрации слоя;  $k_i$  — характерные значения коэффициента фильтрации гидрофаций (те же, что использованы в модели № 1);  $N_i$  — число скважин, вскрывших  $i$ -ю гидрофацию в данном слое;  $n$  — параметр степенного взвешивания, равный  $1/3$  [Pozdniakov, Tsang, 1996]. Значение пористости для всей области моделирования задавалось равным 0,2.

На третьем этапе для каждой модели фильтрационной неоднородности моделировалась стационарная фильтрация с помощью MODFLOW-2000 в пределах выделенной подобласти. Для сравнения результатов моделирования стационарной геофильтрации для двух моделей неоднородности использовали значение эффективного расчетного коэффициента фильтрации для выбранной подобласти, которое определяли по формуле

$$k_{ef} = \frac{QL}{\omega(H_1 - H_2)},$$

где  $Q$  — расход потока,  $L$  — длина пути фильтрации,  $H_1$  и  $H_2$  — за-

данные напоры на границах модели,  $\omega$  — площадь поперечного сечения потока.

Таким образом, для обеих анализируемых фильтрационных моделей определяли эффективную проницаемость в горизонтальном направлении (перепад напоров задавали между восточной и западной границами моделируемой области) и в вертикальном направлении (перепад напоров задавали между ниж-

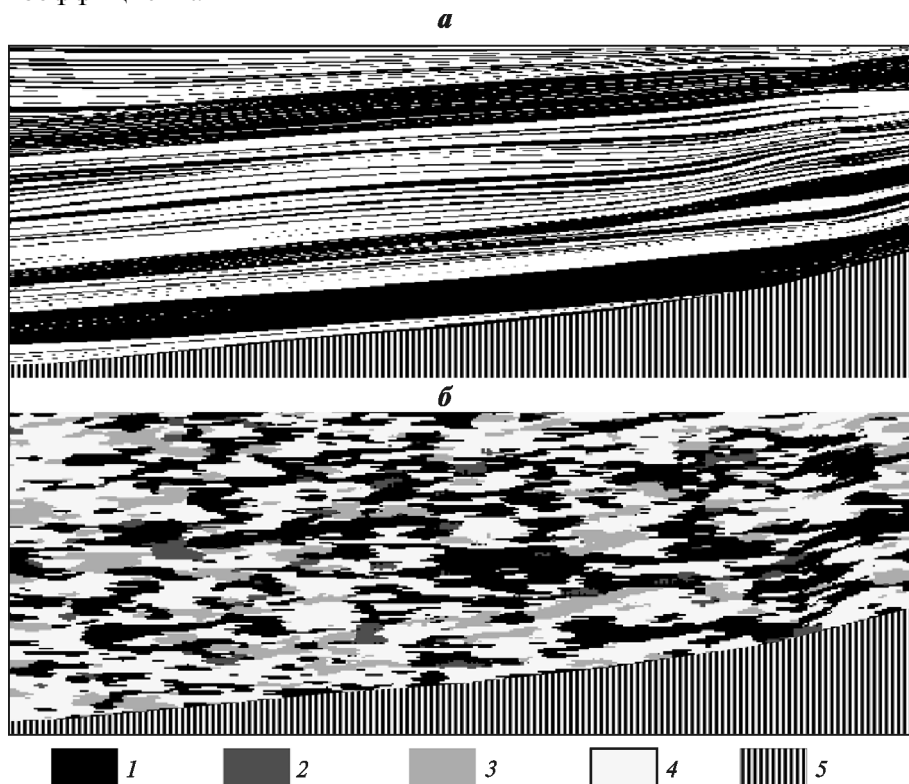


Рис. 4. Разрез север—юг по западной границе литологических моделей (вверху модель № 2, внизу модель № 1). Размеры: по вертикали — 350 м, по горизонтали — 8025 м: 1 — глина; 2 — глина песчаная; 3 — глинистый песок; 4 — песок; 5 — подстилающие породы

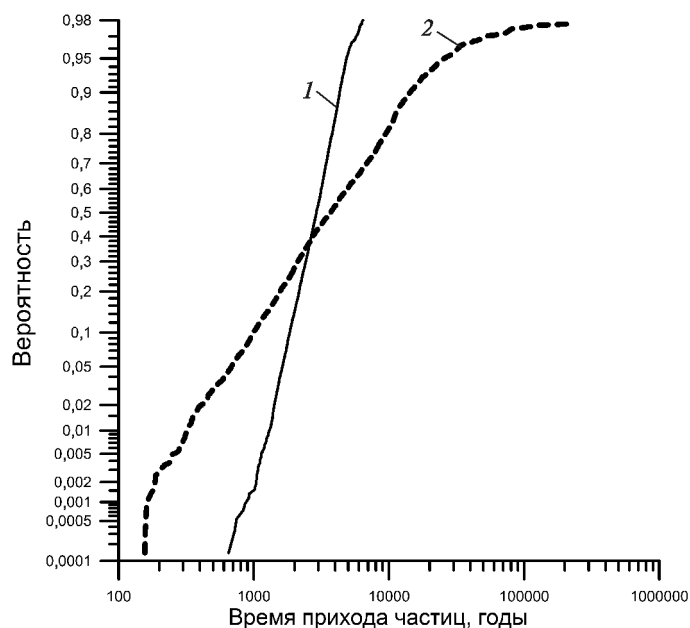


Рис. 5. Распределение времени прихода частиц при вертикальной фильтрации: 1 — модель № 2; 2 — модель № 1

ней и верхней границами). Во всех вариантах перепад напоров составлял 5 м, что при принятых размерах подобласти примерно соответствует горизонтальному и вертикальному градиентам потока в районе СХК [Рыбальченко и др., 1994].

На четвертом этапе моделировали конвективный перенос нейтрального компонента от одной границы моделируемой подобласти до противоположной. Для оценки влияния неоднородности на перенос нейтрального компонента загрязнения в моделируемый поток на границу с большим значением напора в блоки, коэффициент фильтрации которых составлял 0,01 м/сут и более, помещали меченые частицы. Затем, зная распределение скорости фильтрации во всех узлах модели, рассчитывали время прибытия каждой частицы на противоположную границу. Этот расчет проводили при помощи программы PMPATH [Chiang, Kinzelbach, 2001], отслеживающей траектории и время движения меченых частиц в конвективном потоке. В такой постановке распределение времен прибытия частиц зависит только от распределения значений коэффициента фильтрации внутри моделируемой области.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты геофильтрационного моделирования показали, что эффективный горизонтальный коэффициент фильтрации практически одинаков для обеих моделей, в то время как вертикальный коэффициент фильтрации вдвое ниже для модели № 2 (табл. 3), для которой существенно выше протяженность слоев, что препятствует вертикальной фильтрации. По результатам моделирования движения частиц получены графики распределения времени прихода частиц, которые для случая горизонтальной фильтрации оказались практически идентичны для обеих моделей. Это свидетельствует

Таблица 3

**Эффективные значения коэффициента фильтрации и характерные времена движения частиц**

Параметр	Горизонтальная фильтрация		Вертикальная фильтрация	
	Модель № 1	Модель № 2	Модель № 1	Модель № 2
Эффективный коэффициент фильтрации, $k_{ef}$ , м/сут	0,244	0,221	$7,2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
Средняя скорость движения частиц, $U = k_{ef} \frac{H_1 - H_0}{Ln}$ , м/год	0,9	0,815	0,066	0,0415
Среднее время конвективного переноса, $t = \frac{L}{U}$ , годы	2750	3040	1490	2380
Время прихода первых частиц, годы	700	860	156	650
Время прихода 50% частиц, годы	5600	5460	3700	2900

о том, что горизонтальный конвективный перенос происходит по проницаемым слоям и слабо зависит от модели неоднородности. Несмотря на то что все частицы помещали только в проницаемые блоки, за обозримое время в обеих моделях до противоположной границы дошло только около 65% частиц, т.е. около 35% частиц попало в тупиковые зоны, в которых проницаемые отложения экранируются слабопроницаемыми отложениями.

Иная картина получается при моделировании вертикальной фильтрации, при которой кривые распределения времени прихода существенно различаются (рис. 5). В модели № 1 первые частицы приходят существенно раньше, чем в модели № 2. Это связано с уже отмеченным выше явлением: большая протяженность слоев в модели № 2 приводит к существенному экранированию потока при вертикальной фильтрации. В модели № 1 за счет меньшей протяженности слоев существуют зоны, по которым происходит более быстрое движение частиц. Характерные значения времени движения частиц приведены в табл. 3, из которой следует, что 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. На рис. 6 показаны кривые распределения безразмерного времени прихода частиц (отношение времени прихода частицы к среднему времени конвективного переноса) для вертикальной и горизонтальной фильтрации для моделей № 1 и 2. Так как использование безразмерного времени снимает зависимость результатов от используемого перепада напоров и длины пути фильтрации, то рис. 6 от-

ражает общие закономерности конвективного переноса в исследуемых условиях при горизонтальной и вертикальной фильтрации, т.е. большие различия наблюдаются при вертикальной фильтрации, причем модель № 1 показывает возможность более быстрого вертикального переноса первых порций загрязнения, чем модель № 2.

**Заключение.** С использованием метода геостатистического моделирования, основанного на цепях Маркова (ТР/МС-метод), разработана модель литологической неоднородности в районе полигонов глубинного захоронения СХК. Модель базируется на анализе литологических разрезов 261 скважины и представляет собой пространственное чередование четырех основных литологических разностей разреза.

Эту модель сравнивали с моделью, разработанной в лаборатории геотехнологического мониторинга СХК и построенной на основе тех же данных, но базирующейся на неформальном выделении в разрезе элементарных геологических слоев с их последующей кригинг-интерполяцией. Для сравнения обе модели трансформированы в модели геофильтрационной неоднородности, и для участка в районе полигона глубинного захоронения выполнены моделирование стационарной фильтрации и расчет конвективного движения частиц условного несорбируемого загрязнителя.

Результаты сравнения показывают, что основные отличия моделей проявляются при вертикальной фильтрации и конвективном вертикальном переносе частиц. Модель, основанная на кригинг-интерполяции значений мощности геологических слоев, более консервативна за счет большей пространственной протяженности слоев в горизонтальном направлении. Поэтому эффективный расчетный вертикальный

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Булъникова А.А., Сурков В.С. Геологическое строение и перспективы нефтегазосности юго-восточной части Западно-Сибирской низменности. М.: Гостоптехиздат, 1962.

Гольберт А.В. Основы региональной палеоклиматологии. М.: Недра, 1987.

Дюбрал О. Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных // Zeist: EAGE, 2002.

Пинус О.В., Пайразян К.В. Особенности геологического моделирования продуктивных пластов флювиального происхождения // Геология нефти и газа. 2008. № 1. С. 25–30.

Подобина В.М. Фораминиферы, биостратиграфия верхнего мела и палеогена Западной Сибири. Томск: Томский государственный университет, 2009.

Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких и радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994.

Черняев Е.В., Кошкарев В.Л., Колмакова О.В. и др. Геолого-геофизическая модель Северной площади // Известия Томского политехнического университета. 2002. Т. 305, вып. 6. С. 414–433.

Bishop C.E., Wallace J., Lowe M. Recommended septic tank soil-absorption-system densities for Cache Valley, Cache County, Utah // Report of investigation. Utah geological sur-

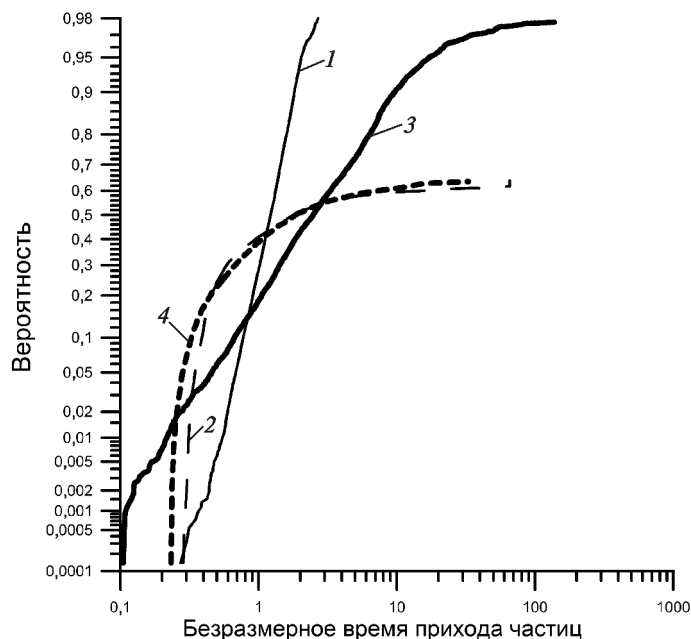


Рис. 6. Распределение безразмерного времени прихода частиц: 1 — модель № 2 вертикальная; 2 — модель № 2 горизонтальная; 3 — модель № 1 вертикальная; 4 — модель № 1 горизонтальная

коэффициент фильтрации данной модели в 2 раза ниже, чем в модели, основанной на ТР/МС-методе, а время прихода первых порций загрязнения более чем в 4 раза дольше, чем в модели, построенной на основе ТР/МС-метода.

Учитывая большую консервативность модели, основанной на кригинг-интерполяции значений мощности слоев, для анализа гипотетических аварийных ситуаций целесообразнее использовать модели, построенные на основе ТР/МС-метода.

vey. Division of Utah Department of Natural Resources. 2007. Vol. 257.

Carle S.F. T-PROGS: Transition probability geostatistical software. University of California, 1998.

Carle S.F., Fogg G.E. Transition probability-based indicator geostatistics // Math. Geol. 1996. Vol. 28, N 4. P. 453–477.

Carle S.F., Fogg G.E. Modeling spatial variability with one- and multi-dimensional Markov chains // Math. Geol. 1997. Vol. 29, N 7. P. 891–918.

Chiang W.H., Kinzelbach W. 3D-Groundwater modeling with PMWIN. 1st ed. Berlin; Heidelberg; N.Y.: Springer, 2001.

Dai Z., Wolfsberg A., Lu Z., Ritzi R.J. Representing aquifer architecture in macrodispersivity models with an analytical solution of the transition probability matrix // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34, N 6. P. L20406.

Elfeki A., Dekking M. A markov chain model for subsurface characterization: theory and applications // Math. Geol. 2001. Vol. 33, N 5. P. 569–589.

Engdahl N.B., Vogler E.T., Weissmann G.S. Evaluation of aquifer heterogeneity effects on river flow loss using a transition probability framework // Water Res. Res. 2010. Vol. 46. W01506. 13 p.

Falivene O., Cabrera L., Munoz J.A. et al. Statistical grid-based facies reconstruction and modelling for sedimentary bodies.



Alluvial-palustrine and turbiditic examples // *Geologica Acta*. 2007. Vol. 5, N 3. P. 199–230.

*Koltermann C.E., Gorelick S.M.* Heterogeneity in sedimentary deposits. A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches // *Water Res. Res.* 1996. Vol. 32, N 9. P. 2617–2658.

*Pozdniakov S.P., Bakshevskaya V.A., Zubkov A.A., Danilov V.V.* Modeling of waste injected in heterogeneous Sandy-Clay formation // *Underground Injection Science and Technology*. Elsevier, 2005. P. 203–218.

*Pozdniakov S.P., Tsang C.F.* A semianalytical approach to spatial averaging of hydraulic conductivity in heterogeneous aquifers // *J. of Hydrology*. 1996. Vol. 216, N 1–2. P. 78–98.

*Proce C.J., Ritzi R.W., Dominic D.F., Dai Z.* Modeling multiscale heterogeneity and aquifer interconnectivity // *Ground Water*. 2004. Vol. 42, N 5. P. 658–670.

*Ritzi R.W., Dominic D.F., Slesers A.J.* et al. Comparing statistical models of physical heterogeneity in buried-valley aquifers // *Water Res. Res.* 2000. Vol. 36, N 11. P. 3179–3192.

*Sivakumar B., Harter T., Zhang H.* A fractal investigation of solute travel time in a heterogeneous aquifer: transition probability: Markov chain representation // *Ecol. modeling*. 2005. Vol. 182. Iss. 3–4. P. 355–370.

*Sun A.Y., Ritzi R.W., Sims D.W.* Characterization and modeling of spatial variability in a complex alluvial aquifer: Implications on solute transport // *Water Res. Res.* 2008. Vol. 44. W04402. 16 p.

*Weissmann G.S., Carle S.F., Fogg G.E.* Three-dimensional hydrofacies modeling based on soil surveys and transition probability geostatistics // *Water Res. Res.* 1999. Vol. 35, N 6. P. 1761–1770.

*Weissmann G.S., Fogg G.E.* Multi-scale alluvial fan heterogeneity modeled with transition probability geostatistics in a sequence stratigraphic framework // *J. of Hydrology*. 1999. Vol. 226. P. 48–65.

*Yong Z., Fogg G.E.* Simulation of multi-scale heterogeneity of porous media and parameter sensitivity analysis // *Science in China*. 2003. Series E. Vol. 46, N 5. P. 459–474.

Поступила в редакцию  
24.05.2011