

МНОГОУРОВНЕВАЯ ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ РАЙОНА РАСПОЛОЖЕНИЯ СИБИРСКОГО ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Работа поддержана грантами РФФИ № 06-01-00073-а, № 06-07-96907-р_офи.

Представлена многоуровневая иерархическая цифровая модель района полигона глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов Сибирского химического комбината, которая согласованно описывает различные участки геологической среды с разным уровнем детальности. Представленная модель состоит из пространственно вложенных моделей трех рангов. В работе описаны структуры, принципы построения и схемы согласования моделей различных рангов. Эта модель может использоваться для анализа литолого-стратиграфической структуры района полигона глубинного захоронения, выполнения прогнозных расчетов изменения состояния пласта-коллектора и распространения ореола загрязнения.

Ключевые слова: многоуровневая иерархическая цифровая модель; жидкие радиоактивные отходы; глубинное захоронение.

В процессе работы предприятий атомного энергопромышленного комплекса образуется значительное количество жидких радиоактивных отходов (ЖРО). Одним из способов обращения с ЖРО является глубинное захоронение – закачка их в стратифицированные осадочные геологические формации без намерения последующего извлечения и переработки [1]. Этот метод обращения с ЖРО применяется на Сибирском химическом комбинате (СХК) – одном из крупнейших предприятий атомной отрасли России. Глубинное захоронение осуществляется через сеть нагнетательных скважин на специально оборудованном полигоне. Геологическое строение района размещения полигона глубинного захоронения является основным фактором, обеспечивающим экологически безопасную изоляцию ЖРО от области активной жизнедеятельности человека. В результате смещения ЖРО с пластовыми водами и взаимодействия с вмещающими породами формируется сложная геотехнологическая система – пласт-коллектор. Для обеспечения безопасности эксплуатации полигона глубинного захоронения необходим постоянный контроль состояния пласта-коллектора и прогнозирование процессов, протекающих в геологической среде [1]. Для решения этих задач целесообразно использовать современные геоинформационные технологии и методы математического моделирования. В последние годы был разработан ряд цифровых моделей, которые имели различные пространственные масштабы, и с разным уровнем детальности описывали геологическую среду района полигона глубинного захоронения ЖРО СХК. Например, в работах [2, 3] в ка-

честве объектов моделирования рассматривались непосредственно прифилтровые зоны нагнетательных скважин. Другие модели имели более мелкий масштаб и описывали пласты-коллекторы, а также примыкающие к ним буферные горизонты в границах полигона глубинного захоронения [1, 4, 5]. Мелкомасштабные цифровые модели рассматривали всю толщу осадочного чехла в районе расположения полигона глубинного захоронения ЖРО СХК [1, 6, 7]. Модели разных масштабов [1–7] использовали различные исходные данные, основывались на разных методах описания геологической среды и не согласовывались друг с другом. В связи с необходимостью комплексного обеспечения безопасности эксплуатации полигона глубинного захоронения ЖРО СХК, была разработана представленная в настоящей работе иерархическая многоуровневая модель, которая согласованно описывает различные участки геологической среды с разным уровнем детальности.

Район полигона глубинного захоронения ЖРО СХК расположен в краевой части Западно-Сибирской платформы, вблизи ее сочленения с Саяно-Алтайской складчатой областью [1]. Геологический разрез района представлен терригенными, преимущественно континентальными, слабосцементированными отложениями мезо-кайнозойского платформенного чехла (мелового, палеогенового, неогенового и четвертичного возраста), которые несогласно залегают на метаморфизированных, сцементированных, собранных в складки породах фундамента, представленных глинистыми сланцами (рис. 1). Возраст кровли фундамента датируется верхним палеозоем.

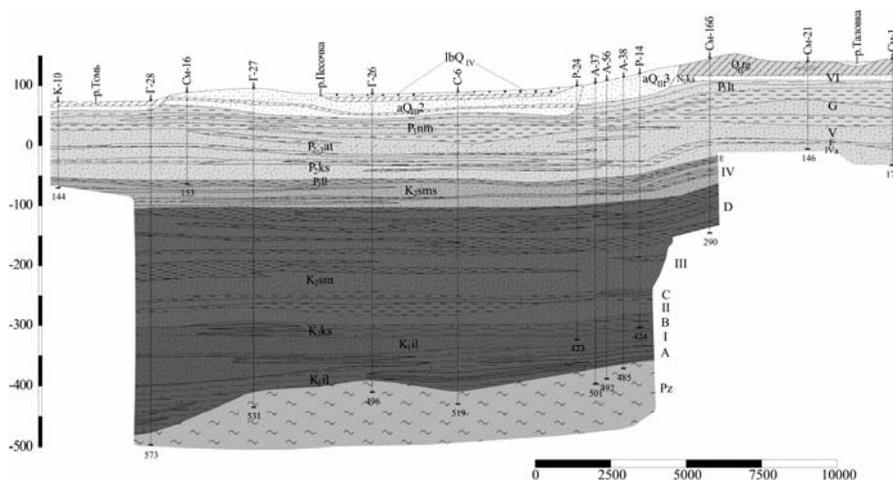


Рис. 1. Геологический разрез района полигона глубинного захоронения ЖРО СХК

В толще осадочного чехла прослеживается неравномерное чередование песчаных и глинистых пород, что предопределяет этажное развитие водоносных и водоупорных горизонтов, характеризующихся фильтрационной неоднородностью в плане и разрезе. Наряду с общепринятой системой стратификации гидрогеологического разреза для района расположения полигона глубинного захоронения ЖРО СХК была разработана условная система, которая используется в целом ряде работ, посвященных вопросам поиска источников водоснабжения и захоронения ЖРО в этом районе [1–7]. В соответствии с данной системой, по совокупности геологических, фильтрационных и емкостных признаков, в разрезе мезо-кайнозойских отложений выделяется семь литологических горизонтов преимущественно песчаного состава и восемь относительно водоупорных глинистых слоев. Песчаные горизонты нумеруются снизу вверх римскими цифрами: I, II, III, IV, IVa, V, VI, а водоупорные слои обозначаются буквами латинского алфавита: A1, A2, B, C, D, E, F, G. Захоронение ЖРО осуществляется в эксплуатационные горизонты II и III осадочного чехла, которые отделены от вышележащих водоносных слоев и палеозойского фундамента пачкой из глинистых водоупоров (A1, A2, B, D, E) и буферных горизонтов (I, IV, IVa) (рис. 1).

Для решения различных задач по обеспечению безопасности и оценки последствий эксплуатации полигона глубинного захоронения ЖРО СХК необходимо иметь согласованные модели геологической среды разных пространственных масштабов от прифилтровых областей отдельных нагнетательных скважин до всего района расположения полигона. В соответствии с этим представляемая в работе многоуровневая модель включает в себя несколько цифровых моделей различных масштабов (рангов). Ранг модели возрастает с укрупнением ее масштаба и повышением уровня детальности описания геологической среды. Анализ результатов применения цифровых моделей в работах [1–7] показал, что для контроля состояния пласта-коллектора и прогнозирования процессов, протекающих в геологической среде, необходимо использование моделей трех рангов:

- района расположения полигона (модель I ранга);
- эксплуатационных и буферных горизонтов и разделяющих их водоупорных пластов в пределах полигона (модель II ранга);
- прискважинной области (модель III ранга).

Каждая из моделей состоит из совокупности субгоризонтальных слоев, что обусловлено стратифициро-

ванной структурой моделируемой геологической толщи. Слой представляет собой тело, сверху и снизу ограниченное поверхностями, которые имеют не более одной точки пересечения с любой вертикальной линией. При этом каждая из поверхностей раздела слоев толщи одновременно является подошвой перекрывающего слоя и кровлей для слоя подстилающего, исключение составляют поверхности, соответствующие кровле и подошве всей области моделирования.

Прослой модели большего ранга выделяются из слоев модели меньшего ранга путем их расщепления. Выделение слоев осуществляется в соответствии со стратифицированным строением и технолого-гидрогеологическими особенностями геологической среды. В зависимости от ранга модели, каждому слою соответствуют элементы стратифицированной толщи различного масштаба. В модели I ранга в качестве слоя рассматриваются водоносные или водоупорные горизонты, выделяемые в соответствии с системой технологической стратификации СХК. Слоям модели II ранга соответствуют преимущественно песчаные или глинистые прослои стратифицированной литологической толщи пластов-коллекторов, примыкающих к ним буферных горизонтов и водоупоров, которые их разделяют. В моделях III ранга слои описывают пропластки отдельных литологических разностей в осадочных толщах, вскрываемых фильтрами нагнетательных скважин.

Для обозначения слоев используются комбинированные индексы, которые однозначно определяют соотношения вложенности между слоями моделей различных рангов. Нумерация слоев всех моделей осуществляется сверху вниз. Слоям модели I ранга присваивается индекс s , значение которого изменяется от 1 до 15. Соотношение между системой стратификации, принятой на СХК, и индексацией слоев в модели I ранга представлено в табл. 1. Например, модельному слою $s = 1$ соответствует неоген-четвертичный водоносный комплекс (VI водоносный горизонт), а слою модели $s = 15$ – первичные коры выветривания палеозойского фундамента (водоупорный пласт A1).

Прослой модели II ранга детально описывают структурные особенности эксплуатационных и буферных горизонтов, а также разделяющих их водоупоров (слои модели I ранга $s = 7–13$) в пределах территории полигона. Общее число слоев модели II ранга составляет 159 (табл. 1). Для их идентификации используется комбинированный индекс s, s' , в котором s' соответствует порядковому номеру прослоя модели II ранга в слое s модели I ранга.

Т а б л и ц а 1

Соотношение между различными системами индексации слоев

Система стратификации, принятая на СХК	VI	G	V	F	IVa	E	IV	D	III	C	II	B	I	A2	A1
Индекс s слоя в модели I ранга	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Количество слоев в модели II ранга	–	–	–	–	–	–	33	41	31	19	14	11	10	–	–

Иерархическая модель включает в себя несколько моделей III ранга (прискважинных моделей), для обозначения порядкового номера которых используется индекс q . В каждой из моделей III ранга число состав-

ляющих ее слоев уникально и определяется литолого-структурными особенностями геологической среды и строением фильтра конкретной нагнетательной скважины. Эти слои идентифицируются с помощью комбини-

рованного индекса s, s', s'', q , в котором s, s' наследуются от индексов моделей меньших рангов (s – от слоя модели I ранга, s' – от модели II ранга), а s'' обозначает порядковый номер прослоя в слое s' модели II ранга. Значение индекса q соответствует номеру модели III ранга.

Плановая дискретизация слоев модели каждого ранга осуществляется с помощью равномерной квадратной сетки. Положение узла сетки модели I ранга определяется индексом i, j . Сопряжение сеток моделей различных рангов достигается путем разбиения ячейки сетки модели меньшего ранга на n^2 ячеек сетки моделей большего ранга (n – целое число, равное соотношению длин сторон ячеек моделей меньшего и большего рангов). Индексы, обозначающие узлы сеток моделей II и III рангов, являются комбинированными. Для модели II ранга – i, i', j, j' , а для модели III ранга – i, i', i'', j, j', j'' . В обоих случаях последняя величина в индексе обозначает положение узла в сетке, а предыдущие части индекса наследуются от ячейки модели меньшего ранга.

Геометрическое строение стратифицированной толщи описывается заданием абсолютных отметок для всех поверхностей, соответствующих кровлям модельных слоев, и абсолютных отметок подошвы самого нижнего слоя, которая, одновременно, является подошвой всей моделируемой геологической толщи. Для обозначения кровли каждого из слоев модели применяется индексация, аналогичная индикации, используемой для обозначения этих слоев.

Положение каждой поверхности раздела s (для модели II ранга – s, s' , для модели III ранга – s, s', s'') определяется значениями абсолютной отметки $h_{i,j}^s$ в узле i, j (в модели II ранга – $h_{i,i',j,j'}^{s,s'}$, III ранга – $h_{i,i',i'',j,j',j''}^{s,s',s''}$). Мощность слоя однозначно определяется значениями соседних поверхностей раздела:

– для модели I ранга

$$m_{i,j}^s = h_{i,j}^s - h_{i,j}^{s+1}; \quad (1)$$

– для модели II ранга

$$m_{i,i',j,j'}^{s,s'} = h_{i,i',j,j'}^{s,s'} - h_{i,i',j,j'}^{s,s'+1}; \quad (2)$$

– для модели III ранга

$$m_{i,i',i'',j,j',j''}^{s,s',s''} = h_{i,i',i'',j,j',j''}^{s,s',s''} - h_{i,i',i'',j,j',j''}^{s,s',s''+1}. \quad (3)$$

Расчет значений сеточных функций абсолютных отметок поверхностей раздела слоев осуществляется путем выполнения площадной интерполяции данных, полученных на основе анализа геологических колонок скважин, вскрывающих исследуемую литологическую толщу. Интерполяция проводится с помощью геостатистического метода Кригинг [8].

Геофильтрационные и емкостные свойства геологической среды описываются набором двумерных сеточных функций для каждого слоя. Значения этих функций в узлах сетки рассчитываются путем площадной интерполяции аналогично значениям абсолютных отметок. Диапазон изменения параметров геологической среды, задаваемых в модели, приводится в табл. 2.

Таблица 2

Параметры геологической среды

Наименование параметра	Диапазон изменения
Горизонтальный коэффициент фильтрации (k_x, k_y), м/сут	0,02 ÷ 15
Вертикальный коэффициент фильтрации (k_z), м/сут	$1,5 \cdot 10^{-5} \div 1,0 \cdot 10^{-2}$
Полная пористость (N), %	30 ÷ 40
Активная пористость (N^*), %	5 ÷ 15
Упругость (η), 1/м	$1,0 \cdot 10^{-6} \div 1,0 \cdot 10^{-3}$

Пространственная вложенность слоев и ячеек модели обуславливает согласование всех параметров при переходе от модели меньшего ранга к модели большего ранга. Для примера рассмотрим согласование параметров для моделей I и II рангов. Из условия сохранения объема среды, при переходе от модели меньшего ранга к модели большего ранга, следуют соотношения согласования мощности:

$$m_{i,j}^s = \frac{1}{n^2} \sum_{i',j',s'} m_{i,i',j,j'}^{s,s'}, \quad (4)$$

полной пористости:

$$N_{i,j}^s = \frac{\sum_{i',j',s'} m_{i,i',j,j'}^{s,s'} N_{i,i',j,j'}^{s,s'}}{n^2 m_{i,j}^s}, \quad (5)$$

активной пористости:

$$N_{i,j}^{*s} = \frac{\sum_{i',j',s'} m_{i,i',j,j'}^{s,s'} N_{i,i',j,j'}^{*s,s'}}{n^2 m_{i,j}^s}, \quad (6)$$

упругой емкости:

$$\eta_{i,j}^s = \frac{\sum_{i',j',s'} m_{i,i',j,j'}^{s,s'} \eta_{i,i',j,j'}^{s,s'}}{n^2 m_{i,j}^s}. \quad (7)$$

Соотношения согласования латеральных и вертикального коэффициентов фильтрации вытекают из условий равенства гидропроводности ячеек в моделях большего и меньшего рангов. Коэффициенты фильтрации в модели I ранга связаны с коэффициентами фильтрации модели II ранга следующими соотношениями:

$$(K_X)_{i,j}^s = m_{i,j}^s{}^{-1} \sum_{j',s'} \left(\sum_{i'} \frac{1}{m_{i,i',j,j'}^{s,s'} (K_X)_{i,i',j,j'}^{s,s'}} \right)^{-1}, \quad (8)$$

$$(K_Y)_{i,j}^s = m_{i,j}^s{}^{-1} \sum_{i',s'} \left(\sum_{j'} \frac{1}{m_{i,i',j,j'}^{s,s'} (K_Y)_{i,i',j,j'}^{s,s'}} \right)^{-1}, \quad (9)$$

$$(K_Z)_{i,j}^s = \frac{m_{i,j}^s}{n^2} \sum_{i',j'} \left(\sum_{s'} \frac{m_{i,i',j,j'}^{s,s'}}{(K_Z)_{i,i',j,j'}^{s,s'}} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Модель I ранга (модель района расположения полигона) описывает всю геологическую толщу осадочного чехла Западно-Сибирской плиты в районе размещения полигона глубинного захоронения ЖРО СХК (рис. 2).

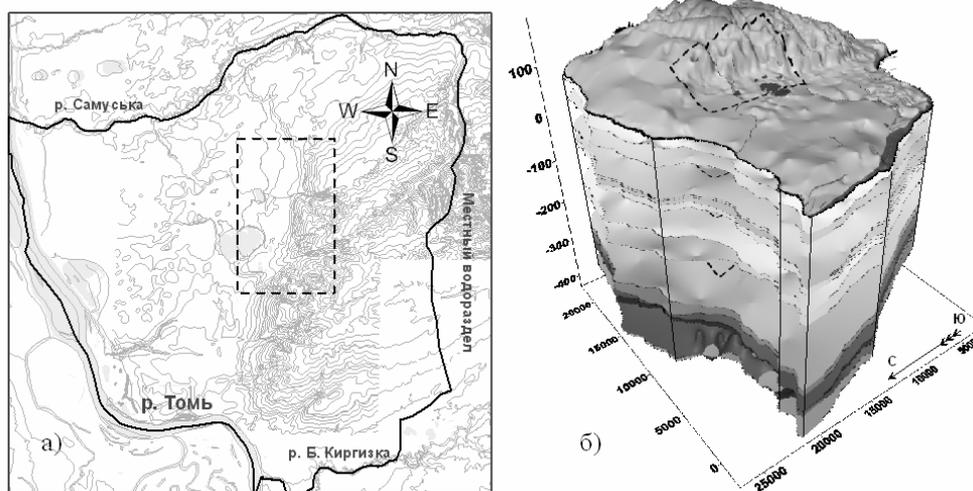


Рис. 2. Область (а) и слои (б) модели I ранга. Сплошной линией показаны границы моделируемой области модели I ранга, пунктирной – границы модели II ранга

В гидрогеологическом плане этот район является краевой, относительно обособленной частью Западно-Сибирского артезианского бассейна. Структура фильтрационного потока является главным фактором, обуславливающим выбор боковых границ модели I ранга. Направление потока фильтрации во всех водоносных горизонтах района западно-юго-западное. Областью питания всех водоносных горизонтов служит локальная водораздельная возвышенность, а областью разгрузки – долина р. Томь [9]. Поэтому в качестве восточной границы модели была выбрана линия местного водораздела, а западно-юго-западная граница проводилась по руслу р. Томь. С юга и севера модель ограничивалась, соответственно, руслами рр. Самуська и Б. Киргизка (рис. 2, а), которые являются наиболее крупными правобережными притоками р. Томь в данном районе.

Описываемая моделью I ранга территория вписана в прямоугольную область размером 25×25 км, которая покрыта сеткой с квадратными ячейками со стороной 100 м. Площадь территории, рассматриваемой в модели I ранга, составляет около 400 км². Ячейки, которые

оказываются за границами моделируемой области, считаются неактивными и не рассматриваются в дальнейшем. Общее количество активных ячеек в каждом слое модели составляет 39569.

Модель II ранга описывает стратифицированную толщу осадочных пород на территории полигона глубинного захоронения ЖРО (рис. 3). Боковые границы модели II ранга заданы таким образом, чтобы обеспечить нахождение фильтра отхода в пределах моделируемой области в течение всего проектного времени эксплуатации полигона. Общая площадь территории модели II ранга на порядок меньше площади модели I ранга и составляет 40 км². В плане моделируемый массив имеет форму прямоугольника, длинная сторона которого ориентирована в субмеридиональном направлении (рис. 3, а). Сетки поверхностей раздела слоев модели II ранга формируются путем вычленения из области модели I ранга прямоугольного блока, состоящего из 50 × 80 ячеек (рис. 2). После этого каждая ячейка делится на 16 частей ($n = 4$). Таким образом, общее количество ячеек в одном слое модели II ранга составляет 200 × 320.

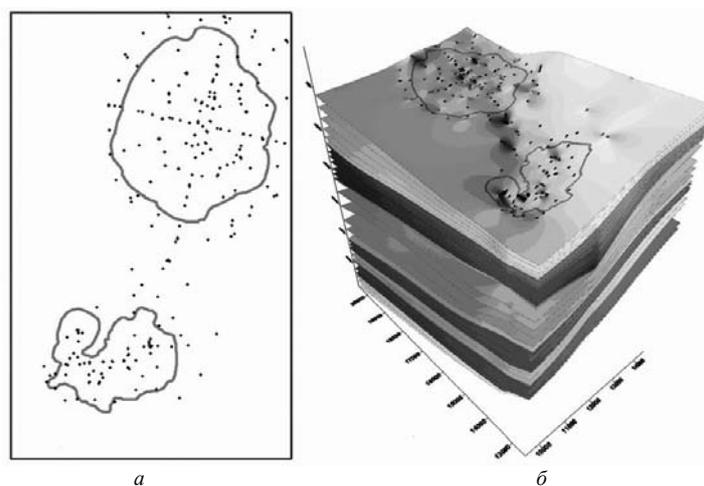


Рис. 3. Область (а) и слои (б) модели II ранга. Сплошной линией показана граница прогнозируемой области распространения фильтра отходов в пластах-коллекторах на момент окончания эксплуатации полигона. Темным выделены водоупорные слои, светлым – водоносные горизонты. Для удобства восприятия на рисунке приводится только каждая пятая из 160 поверхностей раздела слоев

Модели III ранга описывают непосредственно прифилтровые зоны отдельных нагнетательных скважин, используемых для захоронения нетехнологических отходов, и области прифилтровых зон групп скважин для захоронения технологических отходов. Таким образом, для каждой нагнетательной скважины нетехнологических отходов создается отдельная модель III ранга. Для участка захоронения технологических отходов формируются десять прискважинных моделей, опи-

сывающих прифилтровые зоны всех нагнетательных скважин, когда-либо эксплуатировавшихся на этом участке (рис. 4). При переходе к моделям III ранга каждая ячейка модели II ранга разбивается на 625 ячеек модели III ранга ($n = 25$). В результате площадь каждой из ячеек модели III ранга составляет 1 м^2 . Столь высокий уровень детализации обусловлен необходимостью описания отдельных элементов литологической толщи в непосредственной близости от фильтра скважины.

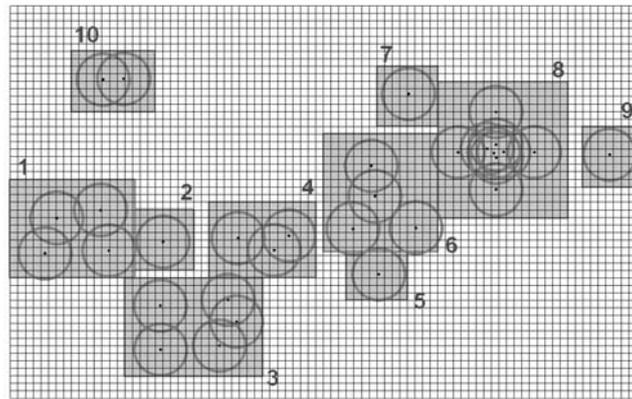


Рис. 4. Области прискважинных моделей на участке для захоронения технологических отходов. На сетке модели II ранга темными прямоугольниками показаны области каждой из моделей III ранга. Точки соответствуют отдельным нагнетательным скважинам, кругами показаны области их прифилтровых зон

Иерархическая модель реализована в виде структурированной совокупности текстовых файлов. Для моделей всех рангов созданы отдельные директории с соответствующими названиями. В этих директориях располагаются папки, содержащие файлы, построчно описывающие распределение одного из параметров геологической среды. Имя папки соответствует названию этого параметра. Имена файлов содержат индексы описываемых слоев в соответствии с иерархической структурой данных. Кроме того, в каждой папке находится текстовый файл, описывающий ее внутреннюю структуру и внешние связи с другими файлами и папками модели.

Для визуализации структурного и статистического анализа моделей любого ранга могут использоваться широко распространенные пакеты программ, такие как картографическая система Surfer (версия 6.0 и выше) [10] или пакет программ для трехмерного конструирования AutoCAD (версия 2000i и выше). Также могут применяться специализированные программные средства для отображения геологических структур: 3D Groundwater Explorer, Stanford Geophysical Modeling Software [11]. Результаты визуализации могут быть экспортированы в другие пакеты программ для обработки графических данных растрового и векторного форматов. Выполнение геофильтрационных и геомиграционных расчетов на основе построенных моделей возможно с использованием специализированных программных средств: Feflow [12], Processing Modflow

[13], Groundwater Modeling System [14]. Прогнозные расчеты состояния геологической среды с применением моделей всех рангов в составе единой иерархической модели возможны с использованием оригинального программного комплекса, разрабатываемого авторами в настоящий момент.

Разработанная иерархическая модель геологической среды полигона глубинного захоронения ЖРО СХК может быть использована для анализа литологостратиграфической структуры объектов различного пространственного масштаба с различным уровнем детальности. На основе данной модели возможно проведение расчетов физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии ЖРО с пластовыми водами и вмещающими породами в прифилтровых зонах нагнетательных скважин. Кроме того, эта модель может использоваться для прогнозирования изменения состояния пласта-коллектора и распространения ореола загрязнения как в пределах территории полигона глубинного захоронения ЖРО, так и в целом для всего района. Предложенный метод построения иерархической модели может применяться для создания цифровых многоуровневых моделей геологической среды природно-антропогенных систем, возникающих при захоронении радиоактивных и токсичных отходов в осадочные геологические формации, эксплуатации артезианских водозаборов площадного и линейного типов, разработке осадочных месторождений полезных ископаемых геотехнологическими методами и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. 256 с.
2. Зубков А.А., Макарова О.В., Данилов В.В. и др. Техногенные геохимические процессы в песчаных пластах-коллекторах при захоронении жидких радиоактивных отходов // Геоэкология. 2002. № 2. С. 133–144.

3. *Истомин А.Д., Носков М.Д., Кеслер А.Г. и др.* Моделирование распределения радионуклидов в пласте-коллекторе при глубинном захоронении кислых жидких радиоактивных отходов // *Радиохимия*. 2007. Т. 49, № 2. С. 182–187.
4. *Pozdniakov S.P., Bakshevskaya V.A., Zubkov A.A. et al.* Modeling of Waste Injection in Heterogeneous Sandy Clay Formations // *Underground Injection Science and Technology* / Ed. by C.F. Tsang and J. Apps. Elsevier, 2005. P. 203–218.
5. *Зубков А.А., Данилов В.В., Носков М.Д., Истомин А.Д.* Прогнозное моделирование распространения фильтрата ЖРО в пластах-коллекторах полигона глубинного захоронения ЖРО СХК // *Геоинформатика*. 2007. № 4. С. 36–43.
6. *Alexandrova L.N., Glinsky M.L., Danilov V.V. et al.* Prediction of Radioactive Liquid Waste Migration at the Siberian Chemical Combine Underground injection Site Based on Mathematical Modeling // *Abs. of Sec. International symposium «Underground injection science and technology»*. Berkeley, 2003. 77 p.
7. *Слинко А.М., Тер-Саакян Н.Ф., Зильберштейн Б.М. и др.* Оценка эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Северска Томской области методом математического моделирования. Отчет ФГУП «Гидроспецгеология». М., 2004. 187 с.
8. *Матерон Ж.* Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968. 408 с.
9. *Всеволожский В.А.* Ресурсы подземных вод южной части Западно-Сибирской низменности. М.: Наука, 1973. 88 с.
10. *Surfer*. URL: <http://www.goldensoftware.com>
11. *Stanford Geophysical Modeling Software (S-GeMS)*. URL: <http://sgems.sourceforge.net/>
12. *Finite Element subsurface FLOW system (Feflow)*. URL: <http://www.scintificsoftwaregroup.com>
13. *Processing Modflow Pro*. URL: <http://www.webtech360.com>
14. *Groundwater Modeling System (GMS) for the PC*. URL: <http://www.ems-i.com/gms/downloads.html>

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 10 сентября 2009 г.