

Захарова Алена Александровна

**Алгоритмическое и программное обеспечение
геоинформационной системы
для решения гидрогеологических задач**

05.13.11 — Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск — 2002

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Н.Г. Марков**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **В.П. Бондаренко**
кандидат технических наук **В.Н. Бурлаков**

Ведущая организация:

Институт водных и экологических проблем
Сибирского отделения Российской академии наук
г. Барнаул

Защита состоится «25» декабря 2002 г. в 15 ч. в ауд. 214 на заседании диссертационного совета Д 212.269.06 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84, институт «Кибернетический центр» ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «___» ноября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
к.т.н., доцент

М.А. Сонькин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. На сегодняшний день в мире остро стоят и требуют решения проблемы охраны окружающей среды. В странах ЕС разработаны общие требования, нормативные показатели и критерии оценки качества ресурсов окружающей среды. В России в 2002 г. принят Федеральный закон «Об охране окружающей среды», который стал первым шагом в создании законодательной базы для осуществления экологического контроля и управления природными, в том числе и водными ресурсами. При этом проблемы, связанные с информационным и техническим обеспечением процесса организации экологического контроля за состоянием природных ресурсов становятся все более актуальными. Организация такого контроля осуществляется в рамках систем мониторинга тех или иных ресурсов: воздуха, водных, лесных ресурсов и т.п.

Под *мониторингом* здесь и далее понимается наблюдение объектов и/или явлений в одних и тех же точках пространства во времени и обработка полученных таким образом данных с целью оценки и анализа протекающего процесса для решения прогнозных задач и в случае выявления нарушения установленного режима функционирования объекта исследования, выработка мер по ликвидации последствий и нормализации режима функционирования. Особенно актуальна проблема создания систем мониторинга водных ресурсов, в первую очередь подземных вод как наиболее важных для обеспечения жизнедеятельности человечества.

При мониторинге водных ресурсов собираются и обрабатываются данные разноцелевых исследований ресурсов. К таким исследованиям относятся геофизические, гидрологические, гидрогеохимические и т.п. исследования. Их результаты представляются в виде наборов атрибутивной и пространственной информации, которую следует в рамках той или иной системы мониторинга хранить, обрабатывать, анализировать и отображать в удобном для пользователя виде. Учитывая тенденции развития современных информационных технологий, решать поставленные задачи мониторинга следует с применением геоинформационного подхода, который заключается в применении геоинформационных систем (ГИС) при создании технологий обработки и анализа в точках, имеющих координатную привязку, результатов наблюдений и пространственного анализа полученных данных. В настоящее время сделаны только первые шаги в разработке таких геоинформационных систем и технологий (работы Hans-Joerg G.Diersch, Junfend Luo, Wan Z. и других исследователей).

Важным аспектом проблемы организации мониторинга подземных вод является необходимость решать задачи прогноза состояния гидрогеологической среды, которая подвергается техногенному воздействию. Для этого в рамках детерминированного подхода к моделированию, как важному этапу в решении задач прогноза, применяются методы математического моделирования, набор которых в настоящее время достаточно велик. Л. Лукнером, В.М. Шестаковым, А.Б. Вистелиусом и др. предложен ряд математических моделей и методов для описания гидродинамических процессов, происходящих в геологической среде. Однако аналитические методы моделирования нацелены на решение узкоспециализированных, как правило, двумерных задач, а численные методы, хотя и применяются к трехмерным моделям геологической среды, но не позволяют в

полной мере решать задачи прогноза состояния подземных вод. Более того, существующий уровень современных средств вычислительной техники делает актуальным создание и использование не применявшихся ранее стохастических методов моделирования гидродинамических процессов в рамках трехмерных моделей геологической среды.

Все вышеизложенное позволяет считать, что, несмотря на достигнутые результаты, в области разработки систем гидрогеологического мониторинга, актуальными являются задачи создания новых стохастических методов и алгоритмов моделирования гидродинамических процессов в геологической среде и разработки соответствующего программного обеспечения, позволяющих в рамках геоинформационного подхода оценивать и прогнозировать состояние подземных вод.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является создание алгоритмического и программного обеспечения ГИС для решения гидрогеологических задач с использованием стохастического метода Монте-Карло. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать принципы и структуру ГИС для решения гидрогеологических задач.
2. Разработать способ описания моделей гидрогеологической среды в ГИС и реализующие его алгоритмы.
3. Исследовать применимость метода Монте-Карло для решения задач моделирования процессов влагопереноса в геологической среде и разработать на основе результатов таких исследований алгоритмы, позволяющие эффективно решать указанные задачи.
4. Создать программное обеспечение ГИС для ввода, хранения, обработки и анализа данных мониторинга гидрогеологической среды с целью прогноза ее состояния, а также для визуализации исходных данных и результатов анализа (моделирования) в виде цифровых карт.
5. Апробировать созданную ГИС при решении ряда практически важных гидрогеологических задач.

Методы исследований. В работе использованы методы теории алгоритмов, теории моделирования, включая методы стохастического моделирования, теории баз данных, методы планирования численных экспериментов.

Научную новизну полученных в работе результатов определяют:

1. Принципы организации и структура созданной ГИС для комплексного решения гидрогеологических задач.
2. Трехэтапный способ формирования трехмерных многопараметрических моделей гидрогеологической среды, учитывающий особенности строения геологической среды.
3. Алгоритмы создания моделей гидрогеологической среды на каждом из трех этапов предложенного способа.
4. Алгоритм моделирования процессов влагопереноса в геологической среде, разработанный на основе впервые примененного для решения таких задач метода Монте-Карло.
5. Результаты исследования эффективности и пределов применимости метода

Монте-Карло и реализующего его разработанного алгоритма стохастического моделирования процесса инфильтрации воды в ненасыщенной зоне аэрации и процесса закачки жидкости в глубинные пористые пласты.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Практически значимыми являются созданные модели, алгоритмы и программные средства ГИС для решения гидрогеологических задач. В состав программного обеспечения ГИС входят программные средства подсистем «Мониторинг», «SurfMapper», «Mapper3D» и «Легенда». Часть этих подсистем имеют самостоятельное практическое значение. Программные средства ГИС функционируют на компьютерах типа IBM PC под управлением операционной системы Windows 95/NT. Объем исходного кода системы составляет более 6000 строк кода на языках Object Pascal и MapBasic.

Программные средства подсистемы «SurfMapper» внедрены в Омской геологоразведочной экспедиции, в Северском центре государственного санитарно-эпидемиологического надзора №81 и в Томском отделении Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС).

Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение подсистемы «Mapper3D» внедрено в Томском отделении СНИИГГиМС и применялось при моделировании процесса распространения закачиваемых с целью утилизации подтоварных и сточных вод в глубинные пласты. Результаты моделирования использованы в геолого-технических обоснованиях утилизации этих вод, которые получили положительные экспертные оценки Сибирского центра технической диагностики и экспертиз «Диасиб», ОГУП Территориального центра «Томскгеомониторинг» и были утверждены Управлением Западно-Сибирского округа Федерального горного и промышленного надзора России и Главным управлением природных ресурсов и охраны окружающей среды Министерства природных ресурсов.

Получено четыре акта о внедрении перечисленных подсистем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный трехэтапный способ формирования трехмерных многопараметрических моделей гидрогеологической среды учитывает особенности геологического строения такой среды.
2. Реализующие трехэтапный способ алгоритмы более эффективны по быстродействию, чем известные алгоритмы создания моделей гидрогеологической среды и позволяют формировать описание ее моделей, требующее для хранения минимальных объемов памяти ЭВМ.
3. Разработанный на основе метода Монте-Карло алгоритм моделирования процессов влагопереноса в геологической среде позволяет решать трехмерные задачи гидродинамического моделирования, в частности, моделировать процессы инфильтрации в зоне аэрации и закачки жидкости в глубинные неоднородные пористые пласты.
4. Программное обеспечение созданной ГИС позволяет решать задачи гидрогеологического мониторинга, включая ввод, хранение и анализ данных, в том числе и пространственный анализ, а также позволяет вести моделирование процессов влагопереноса в геологической среде.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной конференции ИНТЕРКАРТО-4 «ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий» (Барнаул, 1998); на IV Международном симпозиуме по проблемам геотехнологий, связанных с охраной окружающей среды и глобальным развитием (Бостон, США, 1998); на II Российско-корейском симпозиуме по науке и технологиям (Томск, 1998), на Международной конференции ИНТЕРКАРТО-5 «ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий» (Якутск, 1999); на Международной конференции “Anniversary scientific conference 50 years faculty of hydrotechnics ACEG University” (София, Болгария, 1999); на V Международном симпозиуме по проблемам геотехнологий, связанных с охраной окружающей среды и глобальным развитием (Бело Horizonte, Бразилия, 2000); на Международной научно-практической конференции «Геоинформатика-2000» (Томск, 2000); на Международной конференции по проблемам ГИС для развития территорий (Сиракузы, Италия, 1999); на Российско-французском семинаре «Загрязнение окружающей среды и управление природными ресурсами» (Томск, 2000); на IV Конференции ГИС-лабораторий Европы — AGILE-IV (Брно, Чехия, 2001).

По результатам исследований опубликовано 19 работ, в том числе 15 статей.

Работа выполнялась в 1996 – 2002 гг. в рамках следующих научно-технических программ и была поддержана следующими грантами:

1. Межвузовская НТП “Геоинфокад” Минобразования России.
2. Межвузовская НТП “Разработка научных основ создания геоинформационных систем” Минобразования России.
3. Грант РФФИ № 00-07-90124.
4. Грант для поддержки ведущих научных школ Минпромнауки РФ № 00-15-98478.

Личный вклад:

1. Постановка задач исследования и разработка концепции ГИС для решения гидрогеологических задач выполнены автором совместно с Н.Г. Марковым.
2. Трехэтапный способ и реализующие его алгоритмы создания трехмерных многопараметрических моделей гидрогеологической среды предложены и разработаны автором.
3. Алгоритм стохастического моделирования гидрогеологических процессов разработан автором. Постановки задач исследования эффективности метода Монте-Карло и предложенного на его основе алгоритма сделаны совместно с Н.Г. Марковым и В.Г. Спицыным. Результаты этого исследования получены автором.
4. Алгоритмическое и программное обеспечение подсистемы «SurfMapper» разработано автором совместно с Н.Г. Марковым, Р.В. Ковиным и Р.И. Гаяревым.
5. Разработка алгоритмического и программного обеспечения подсистемы «Mapper3D» и подсистемы «Легенда» выполнены автором.
6. Результаты применения разработанного алгоритмического и программного

обеспечения ГИС при решении практических гидрогеологических задач получены совместно с Н.А. Ермашовой, А.А. Напрюшкиным и Н.Г. Марковым.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 102 наименований и 3 приложений. Объем основного текста диссертации составляет 132 страницы машинописного текста, иллюстрированного 109 рисунками и 9 таблицами.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы в данном научном направлении, формулируются цель и задачи исследования, приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе проанализированы цели и задачи гидрогеологического мониторинга. Показано место задач моделирования гидрогеологических процессов в системе мониторинга гидрогеологической среды. Описаны модели геологической среды как основы для построения гидрогеологических моделей, проведена их классификация. Указано, что модель гидрогеологической среды представляет собой модель геологической среды с дополнительными гидрогеологическими и гидрогеохимическими параметрами. В результате анализа выделены четыре типа гидрогеологических параметров:

1. Постоянные для всего участка гидрогеологической среды.
2. Постоянные в пласте, т.е. каждому пласту среды сопоставлено постоянное значение того или иного параметра.
3. Постоянные в плане или разрезе — соответственно параметры, постоянные в плоскости $хоу$ (в плане), в плоскости $хоз$ (в разрезе по оси $у$), в плоскости $уоз$ (в разрезе по оси $х$); причем разрез — это сечение модели геологической среды по вертикали, а исследования в плане характеризуют сечение модели по горизонтали.
4. Изменяются от точки к точке в трехмерном пространстве.

Рассмотрены модели и методы моделирования переноса мигрантов (воды и растворенных в ней микро- и макроэлементов) в слоистых средах, используемые в мировой практике в исследовательских проектах и прикладных задачах. В качестве основных механизмов переноса мигрантов рассмотрены конвективный, дисперсионный (на микро- и макроуровне) и конвективно-дисперсионный типы переноса. Проанализированы аналитические и численные методы, применяемые при описании процессов гидрогеологического моделирования. Для решения задачи моделирования переноса мигранта в гидрогеологической среде предложено использовать метод стохастического моделирования Монте-Карло. При создании информационной системы ведения мониторинга гидрогеологической среды предложено использовать геоинформационный подход.

На основании проведенного анализа проблем гидрогеологического мониторинга сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе определены требования к ГИС для решения задач гидрогеологического мониторинга, которые сформулированы с учетом специфики гидрогеологической информации при ее хранении, анализе и визуализации.

Сформулированы основополагающие принципы построения ГИС для решения гидрогеологических задач. Принцип 1: следует реализовать ГИС для

решения гидрогеологических задач на основе современной универсальной ГИС, создавая ГИС-приложения в ее среде для реализации недостающих функций. Принцип 2: для оперирования атрибутивной информацией необходимо использование современной СУБД для работы с внешними БД, содержащими эту информацию.

Рассмотрены этапы создания ГИС для решения задач гидрогеологического мониторинга. Предложена обобщенная функциональная схема разрабатываемой ГИС.

Как правило, данные мониторинга собираются на нерегулярной сети наблюдений и преобразуются при помощи различных методов и способов в двух- или трехмерные регулярные представления (GRID) для описания модели участка гидрогеологической среды. Под последней понимается совокупность модели участка геологической среды и описывающих ее параметров.

Проанализированы возможные способы описания модели геологической среды и полученной на ее основе модели гидрогеологической среды. В качестве основных отмечены квазидвумерные (рис.1а) и трехмерные (рис.1б) модели геологической среды. Первый способ не позволяет представлять сложные модели среды, когда внутри пластов наблюдаются неоднородности (пропластки, линзы и т.п.), и используются параметры модели всех четырех типов. Трехмерные модели обладают избыточностью данных, т.к., например, для описания параметра, характеризующего пласт (группа ячеек) в целом, каждой ячейке куба, описывающего геологическую среду, сопоставляется значение этого параметра.

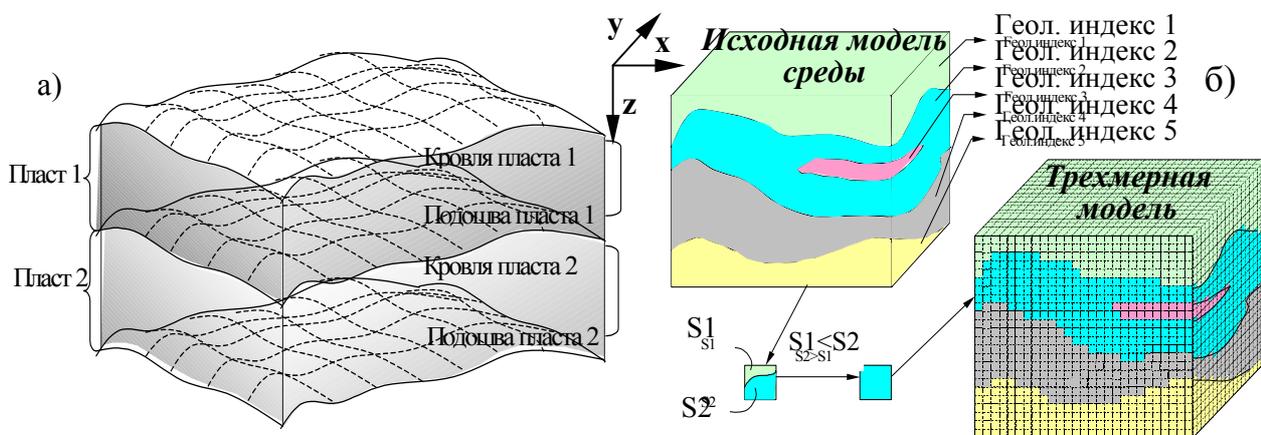


Рис. 1. Способы описания моделей геологической среды

Поэтому предложен способ формирования трехмерных моделей гидрогеологической среды в виде трехмерных многопараметрических моделей, учитывающий положительные аспекты указанных выше способов: модель гидрогеологической среды представляется в виде трехмерной матрицы, являющейся основой и описывающей геологическую среду (элементы матрицы характеризуют ячейки куба, представляющего участок геологической среды и описываются при помощи геологических индексов пород), и совокупности геологических, гидрогеологических и гидрогеохимических параметров, каждый из которых может быть отнесен к любому из четырех типов параметров. При этом для описания параметров типа 1 – 3 не требуется сопоставление значения параметра каждой ячейке куба. Поэтому очевидно, что предложенный способ позволяет получать более точные модели среды, чем способ создания квазидвумерных

моделей, и дает менее избыточные по объему данных модели, полученные вторым способом.

Формирование трехмерных многопараметрических моделей среды предложено проводить в три этапа. На первом этапе формируется характеристическая матрица $A (m \times n)$, где m – количество пластов, n – количество скважин (точек наблюдения). Каждый пласт соответствует строке матрицы $\{A_{i,1}, A_{i,2}, \dots, A_{i,n}\}$, где i – номер пласта, а номер скважины соответствует столбцу матрицы $\{A_{1,j}, A_{2,j}, \dots, A_{m,j}\}$.

На втором этапе на основе характеристической матрицы A восстанавливается 2D-multy-GRID описание модели геологической среды, которое является упорядоченным набором регулярных сеток размерностью $(S_x \times S_y \times m + 1)$, где S_x – количество узлов сетки по оси x , S_y – по оси y , m – количество пластов модели. Плотность сети наблюдения определяет точность модели и объем описывающих ее данных. Набор регулярных сеток характеризуется геометрией $(min_x, min_y, max_x, max_y, S_x, S_y)$ и массивами, описывающими список названий пластов ($Mass_layer(m)$) и список соответствующих им геологических индексов ($Mass_Geol_Ind(m)$).

На третьем этапе на основе 2D-multi-GRID описания формируется 3D-GRID матрица $M(S_x \times S_y \times S_z)$, где S_x – количество узлов матрицы по оси x , S_y – количество узлов матрицы по оси y , S_z – количество узлов матрицы по оси z , $M(i,j,k) = Mass_Geol_Ind(l)$.

Предложены алгоритмы расчета матриц для каждого из перечисленных этапов.

Множество параметров, описывающих трехмерную многопараметрическую модель гидрогеологической среды, предложено представлять и хранить в виде следующих подмножеств параметров:

- $P1$ — массива константных значений.
- $P2$ — совокупности массивов данных размерностью, равной количеству пластов модели среды.
- $P3$ — совокупности регулярных сеток, характеризующих распределение параметра в плоскостях $хоу$, $хоз$ и $уоз$.
- $P4$ — совокупности трехмерных матриц. Такие данные могут быть получены в результате применения методов трехмерной интерполяции.

Множество всех параметров среды в таком представлении можно описать как $Par(\sum_{i=1}^4 n_i)$, где n_i — количество параметров типа i . Таким образом, множество параметров представляется как:

$$Par(\sum_{i=1}^4 n_i) = \left. \begin{array}{l} P1(n1) = \{P1_1, P1_2, \dots, P1_{n1}\}, \\ P2(n2) = \{P2_1(m), P2_2(m), \dots, P2_{n2}(m)\}, \\ P3(n3) = \left\{ \begin{array}{l} P3(n3x) \\ P3(n3y) \\ P3(n3z) \end{array} \right\}, \\ P4(n4) = \{P4_1(n_x \times n_y \times n_z), P4_2(n_x \times n_y \times n_z), \dots, P4_{n4}(n_x \times n_y \times n_z)\} \end{array} \right\},$$

где $P1, P2, P3, P4$ — подмножества параметров 1, 2, 3 и 4 типа соответственно; $n1, n2, n3, n4$ — количество параметров типа 1, 2, 3, 4;

$$P3(n3) = \left\{ \begin{array}{l} P3(n3x), \\ P3(n3y), \\ P3(n3z) \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \{P3_1(n_x \times n_y), P3_2(n_x \times n_y), \dots, P3_{n3x}(n_x \times n_y)\}, \\ \{P3_{n3x+1}(n_y \times n_z), P3_{n3x+2}(n_y \times n_z), \dots, P3_{n3x+n3y}(n_y \times n_z)\}, \\ \{P3_{n3x+n3y+1}(n_x \times n_z), P3_{n3x+n3y+2}(n_x \times n_z), \dots, P3_{n3x+n3y+n3z}(n_x \times n_z)\} \end{array} \right\};$$

$n3 = n3x + n3y + n3z$, где $n3x$ — количество параметров типа 3, характеризующих модель в сечении по оси x , $n3y$ — по оси y , $n3z$ — по оси z .

Исследована эффективность предложенного способа формирования трехмерной многопараметрической модели гидрогеологической среды, и реализующих его алгоритмов. На рис.2 в качестве примера показаны графики, отображающие объемы данных для описания трех рассматриваемых моделей среды размерностью $1000 \times 1000 \times 1000$ ячеек. На рис. 2а приведены зависимости объема данных W от количества параметров (N параметров каждого из типов) для модели, состоящей из 100 пластов; на рис. 2б — зависимости W от количества пластов m для разных моделей среды.

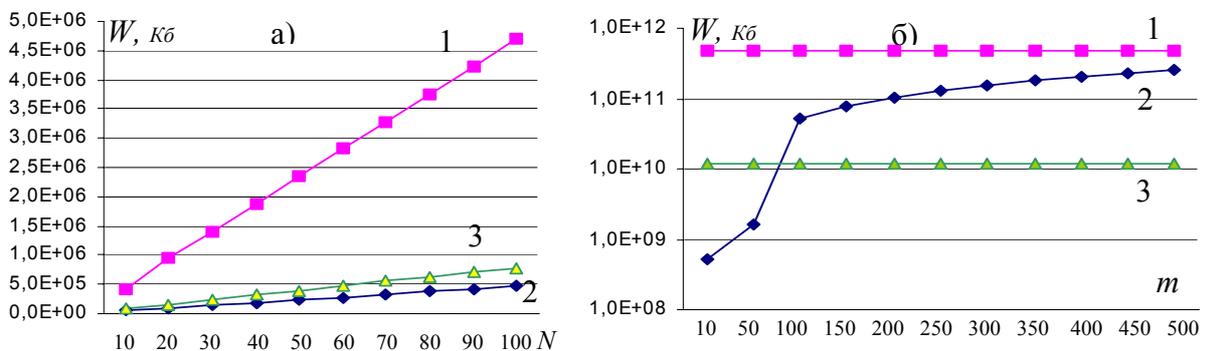


Рис. 2. Зависимость объемов моделей от количества параметров (а), от количества пластов (б)

1 — график для трехмерной модели среды, 2 — для квазидвумерной модели среды, 3 — для трехмерной многопараметрической модели среды

Исследования показали, что предложенный трехэтапный способ, учитывающий особенности геологического строения (наличие протяженных пластов, однородность среды в плане или разрезе и т.п.) гидрогеологической среды, и реализующие его алгоритмы при формировании трехмерных многопараметрических моделей такой среды эффективны по критерию производительности и для хранения полученных моделей требуют минимальных объемов памяти ЭВМ. Предложенный способ далее применяется для формирования моделей гидрогеологической среды при решении задач гидродинамического моделирования.

В третьей главе описан и исследован предложенный алгоритм для моделирования процессов переноса мигрантов в гидрогеологической среде. Алгоритм разработан на основе методе Монте-Карло, в рамках которого рассматривается перенос частиц в неоднородных различной физической природы средах, и который не использовался ранее для решения гидрогеологических задач. Описаны параметры моделирования и гидродинамические параметры, которые участвуют в решении гидродинамических задач.

Постановка задачи моделирования переноса мезочастиц (частиц, характеризующих некоторый объем мигранта), распространяющихся в гидрогеологической среде следующая. Пусть G_0 — ограниченная в пространстве область и $p_s(r', \Omega'; \Omega)$ — индикатриса рассеяния (условная плотность распределения на-

правлений рассеяния Ω мезочастиц). В точке $r_0 \in G_0$ расположен источник распространения мезочастиц мощностью E_0 и с равновероятными направлениями Ω_0 начальной скорости. Параметры dl_{xy}^r и dl_z^r — скорости распространения мезочастиц в точке r соответственно в направлениях x, y и z . Масса мезочастицы $\omega_i = V/k$, где V — объем жидкости, который источник сообщает породе, а k — пересчетный коэффициент увязки (для унификации пространственных данных в соответствии с единицами измерения параметров модели и предъявляемыми критериями точности моделирования). C_0^r — содержание жидкости в точке r геологической среды до начала моделирования; C_N^r — активная влагоемкость пород в точке r ; $p_B(dl_{xy}^r)$ — вероятность того, что часть объема мезочастицы продолжает движение вдоль оси z ; $ht = f(p_B, dl_{xy}^r, C_0^r, C_N^r)$ — величина поглощенного породой в точке r объема мезочастицы. Опишем предложенный алгоритм решения этой задачи.

Шаг 1. Если мощность источника $P = \sum E_0 > 0$, то выполнять шаги 2—8, иначе конец алгоритма.

Шаг 2. $r_i = r_0$, $\omega_i = f(V/k)$.

Шаг 3. Вычисление Ω_i . Если $(r_i \in G_0) \& (\omega_i > 0)$, то выполнять шаги 4—8, иначе на шаг 9.

Шаг 4. $r_i'(r_x, r_y, r_z) = f(\Omega_i, dl_{xy}, dl_z)$.

Шаг 5. Вычислить $p_B(dl_{xy}^r)$, если $p_B > 0$, то на шаг 6, иначе на шаг 8.

Шаг 6. Вычислить $ht = f(p_B, dl_{xy}^r, C_0^r, C_N^r)$.

Шаг 7. $C_N^r(r_i') = C_N^r(r_i) + ht$; $\omega_i = \omega_i - ht$.

Шаг 8. $r_i = r_i'$; на шаг 3.

Шаг 9. $P = P - f(V/k)$, на шаг 1.

Описаны подходы для получения гидродинамических характеристик пород, необходимых для проведения моделирования гидродинамических процессов с применением разработанного алгоритма. Указанные характеристики могут быть представлены параметрами типа $P1-P4$.

При помощи предложенного алгоритма решались два класса задач. Первый из них — моделирование процесса инфильтрации мигрантов в ненасыщенной зоне аэрации (процесса проникновения с поверхности земли и распространения мигрантов в верхних пластах гидрогеологической среды), и второй — закачка жидкости в глубинные пласты. Описаны основные положения гидродинамики, характеризующие эти процессы. В зависимости от задачи и условий моделирования, алгоритм учитывает следующее:

1. В соответствии с характером источника мезочастиц, на шаге 2 задается постоянное значение r_0 в случае точечного источника инфильтрации, плавающее значение по z в случае моделирования процесса закачки жидкости вдоль ствола скважины. В случае площадного источника инфильтрации, последний представляется как совокупность точечных источников и шаги описанного выше алгоритма выполняются для каждого i -го источника.
2. Движение мезочастиц осуществляется в трехмерном пространстве, если движение жидкости в процессе инфильтрации происходит только под действием гравитационного напора, и в плоскости xy , если распространение мезочастиц происходит в глубинных пластах при закачке жидкости в

скважину, где присутствует внутрипластовое давление, значительно превышающее величину гравитационного напора.

3. $dl_{xy}=dl_z$, если пласт однороден в плане и разрезе.
4. Изотропная индикатриса заменяется в случае ввода дополнительных условий моделирования, относящихся к внешним воздействиям на геологическую модель (определение зон питания и разгрузки, движение грунтовых вод в потоке и т.п.).

Моделирование процесса *инфильтрации* проводилось для однородных, слоистых и произвольных моделей среды со всеми перечисленными ранее типами параметров моделирования. Рассмотрены результаты моделирования процесса инфильтрации из точечных и площадных источников.

Были выполнены серии численных экспериментов, построены графики, выявлены зависимости между параметрами моделирования и фильтрационно-емкостными характеристиками пород. Приведена оценка погрешности результатов моделирования, которая не превышает 6%.

На рис. 3а, в качестве примера, изображен график зависимости глубины H , на которой поровое пространство породы полностью заполнено мигрантом, от dl . На рис.3б приведен график зависимости диаметра контура распространения мигранта Dh , внутри которого все поровое пространство породы заполнено мигрантом, от dl . Среда принята изотропной в плане и разрезе, т.е. $dl=dl_{xy}=dl_z$.

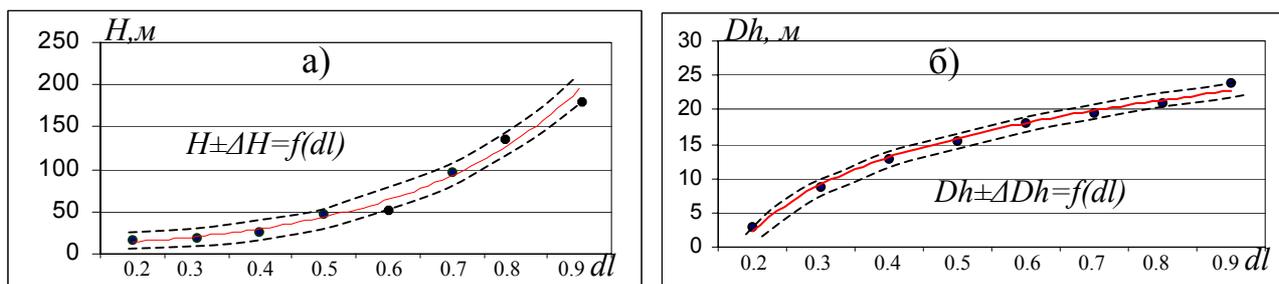


Рис.3. Зависимости H (а) и Dh (б) от длины свободного пробега dl
Из работ И.Л. Каменского, С.Л. Шварцева и др. известно, что

$$k_e = k\bar{\theta}^n = k_n g \bar{\theta}^n \quad \Rightarrow \quad \frac{k_e}{k_n} = g \bar{\theta}^n,$$

где k_e — коэффициент влагопереноса, характеризующий пропускную способность пород зоны аэрации (для воды) и зависящий от начальной их влажности; k — коэффициент фильтрации; k_n — коэффициент проницаемости; $\bar{\theta}$ — относительное объемное влагосодержание пород зоны аэрации; g — ускорение свободного падения; n — эмпирический коэффициент неоднородности, равный 3.5.

Результаты моделирования позволили, например, получить аналитическую зависимость глубины распространения инфильтрата от dl :

$$H = ge^{0.37dl},$$

в результате анализа которой и было получено соответствие

$$H = g(e^{k_n})^{3.5} = g\bar{\theta}^{3.5}.$$

В литературе приведены эпюры распределения влажности для пород зоны аэрации, которые также подтверждают полученные результаты. По результатам численного моделирования был подтвержден эмпирический коэффициент

$n=3.5$, значение которого ранее было определено лишь по результатам физических экспериментов в лабораторных условиях.

Анализ полученных зависимостей для H и dh и проведенные дополнительно численные эксперименты также позволяют сделать вывод, что равенство скоростей горизонтальной и вертикальной фильтрации и, следовательно, диаметров контура инфильтрации H и dh достигается при задании $dl_{xy}=dl_z/g$, что также подтверждает используемые в гидродинамике зависимости между фильтрационными характеристиками пластов в плане и разрезе.

Доказано, что dl_{xy} характеризует коэффициент влагопереноса k_g , а dl_z — коэффициент проницаемости k_n . Результаты исследований подтверждены большим числом экспериментов. Полученные результаты моделирования согласуются с основными положениями гидродинамики о движении жидкости в ненасыщенных пластах зоны аэрации, что позволяет сделать вывод о применимости разработанного алгоритма на основе метода Монте-Карло для решения гидрогеологических задач в указанных условиях.

Моделирование процесса *закачки мигранта* в глубинные пласты через скважину проводилось для различных моделей гидрогеологической среды. Параметры моделирования: V — объем закачки, dl — длина свободного пробега мезочастицы вдоль осей x и y (по оси z движение жидкости отсутствует), h — величина столба закачки, k — коэффициент, характеризующий массу мезочастицы (доля от объема ячейки модели среды), n — коэффициент пористости породы. На рис. 4 показаны примеры полученных в результате моделирования контуров распространения закачиваемой жидкости в однородный пласт с зафиксированными параметрами V, h, k, n и изменяемым dl , где $r1$ и $r2$ — минимальный и предельный контуры распространения мигранта.

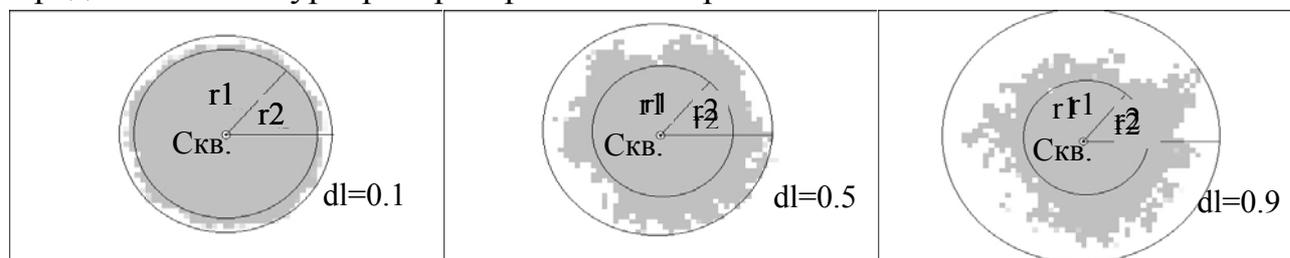


Рис. 4. Контуров распространения закачиваемой жидкости
Получен общий вид уравнений для $r1$ и $r2$:

$$r1 = \sqrt{\frac{V}{\pi h k_n}} e^{-0.4dl}; r2 = \sqrt{\frac{V}{\pi h k_n}} e^{0.4dl}.$$

Полученные зависимости хорошо согласуются с принятыми в гидродинамике.

На рис. 5 и рис. 6 показаны графики, характеризующие зависимость $r1$ и $r2$ от dl и k . Таким образом, чем меньше разницы между вязкостью и плотностью закачиваемой жидкости и пластовой, тем больше наблюдается диффузия. Следовательно, чем меньше значение k , тем более однородны жидкости по своим физическим характеристикам. Численные эксперименты проводились на моделях с различной геометрией и фильтрационно-емкостными свойствами пластов. По результатам исследований был сделан вывод, что разработанный алгоритм применим для моделирования процесса закачки жидкостей в глубинные пласты, результаты не противоречат положениям подземной гидродинамики. При

этом коэффициент k характеризует относительную степень неоднородности закачиваемого вещества и природной пластовой жидкости, а dl — фазовую скорость распространения закачиваемой жидкости в пласте, которая определяется проницаемостью породы и разницей пластового и сообщаемого закачиваемой жидкости давлений.

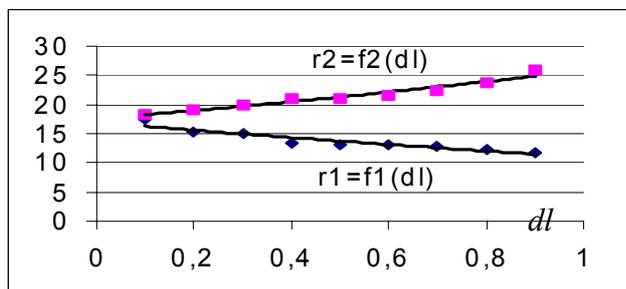


Рис. 5. Зависимости $r1$ и $r2$ от dl

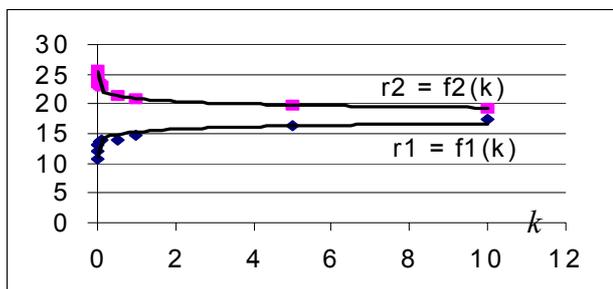


Рис. 6. Зависимости $r1$ и $r2$ от k

В четвертой главе рассмотрено созданное программное обеспечение (ПО) ГИС и применение этой ГИС для решения практических задач, связанных с обработкой и анализом данных гидрогеологических исследований. В качестве базовых программных средств создаваемой ГИС были выбраны ПО ГИС MapInfo Professional и СУБД MS ACCESS для работы с внешней базой данных атрибутивной информации. В состав ПО ГИС входят разработанные подсистемы «Мониторинг», «SurfMapper», «Mapper3D» и «Легенда». Структура ПО созданной ГИС представлена на рис. 7.

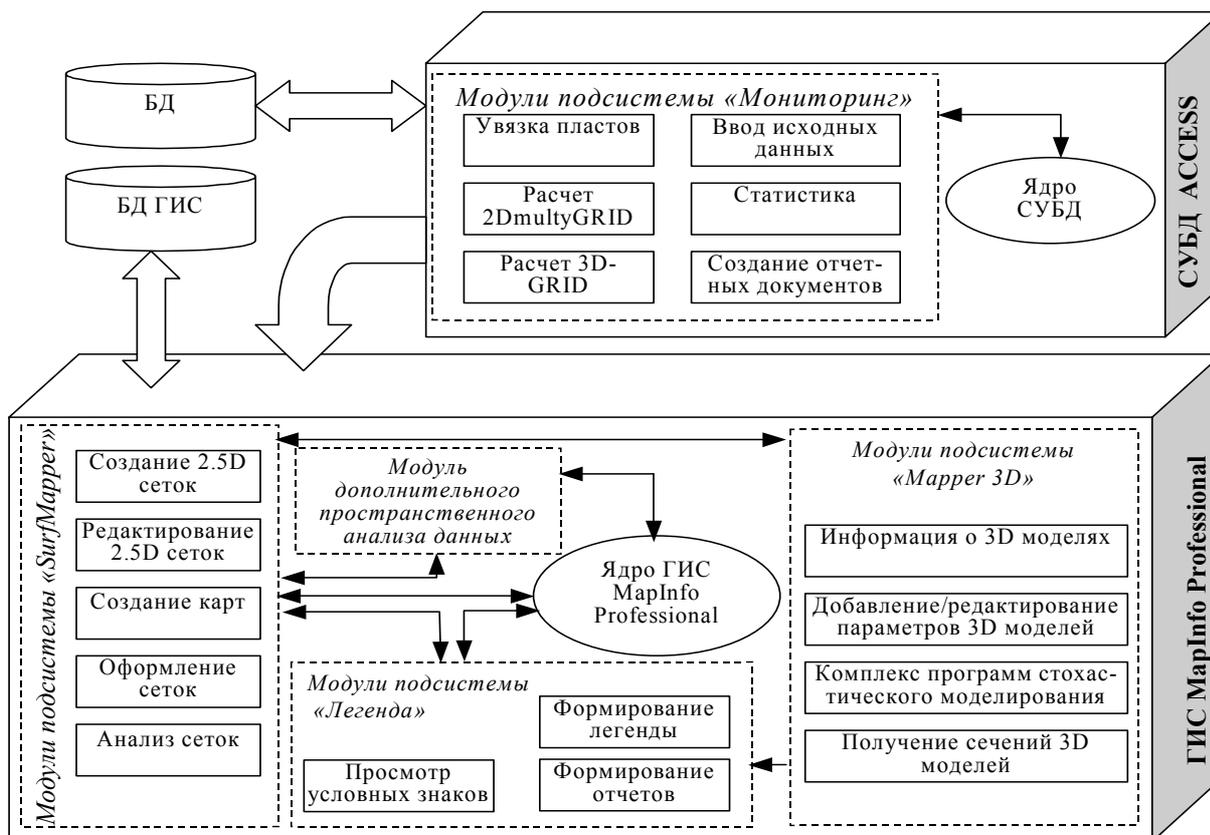


Рис.7. Структура ПО разработанной ГИС

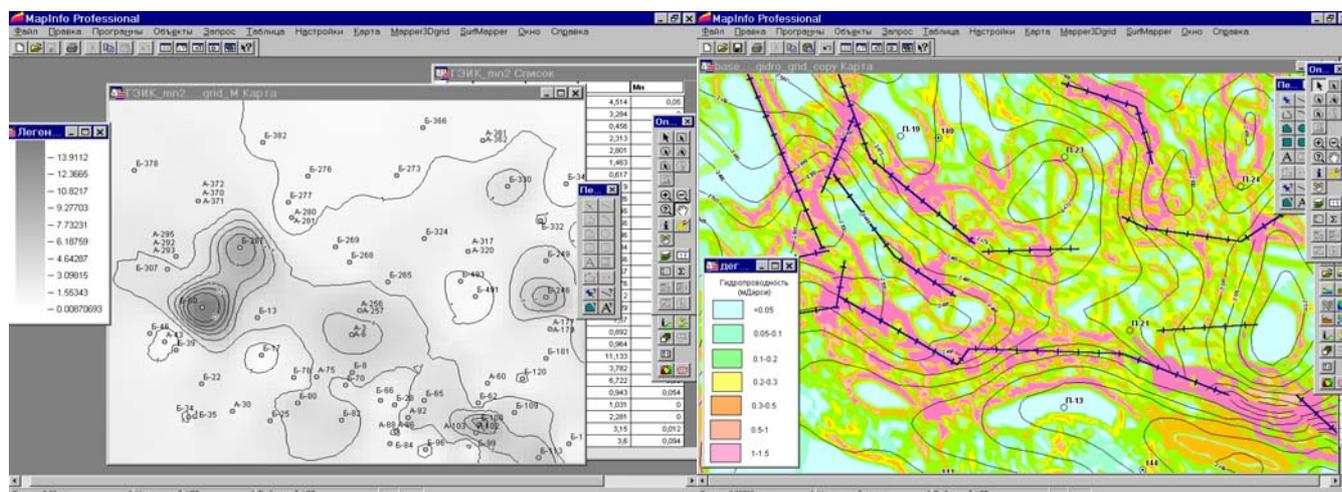
С использованием разработанной ГИС решались задачи ввода, хранения, обработки и анализа данных геологических, гидрологических и гидрогеохимических исследований на территориях Томской и Омской областей и Краснояр-

ского края. Проводилось моделирование геомиграционных процессов с использованием реальных данных на нефтяных месторождениях Томской области. На рис. 8 в качестве примера показан фрагмент карты изолиний, характеризующий общий уровень минерализации подземных вод на территории Омской области.

Расчет гидродинамических показателей геологических пластов, составляющих геологический участок, проводился на основе данных о геометрии пластов. Структурные карты отдельных параметров рассчитывались на основе нерегулярной сети наблюдений. На основе данных сейсморазведки и геофизических исследований в скважинах строились карты параметров (коэффициенты проницаемости, пористости, нефтенасыщенности и т.п.), характеризующие емкостные и фильтрационные свойства пластов. Такие серии карт были получены для Онтонигайского, Западно-Катыльгинского, Кулгинского, Соболиного и Урманского месторождений Томской области.

Далее на основе указанных карт рассчитывались значения гидродинамических параметров, например, гидропроводности (рис.9) в каждой точке регулярной сетки в районе исследований.

Указанные гидродинамические параметры использовались для решения гидродинамических задач на основе разработанного алгоритма стохастического моделирования. При этом *процесс инфильтрации* был изучен на примере участка гидрогеологической среды на территории водозабора г. Кедровый Томской области. На рис. 10 показан пример разреза исследуемого геологического участка.



а

Результаты моделирования представлены в виде сечений параметра трехмерной модели, характеризующих уровень накопления мигранта в исследуемой гидрогеологической структуре (рис. 11). В верхней части рис. 11 представлены карты изолиний, характеризующие мощность площадного источника инфильтрации. Получены результаты моделирования при увеличении мощности (слева направо) источника инфильтрации. В нижней части рис. 11 показаны сечения, характеризующие распространение мигранта в зависимости от мощности источника.

По результатам исследования был проведен пространственный анализ с целью оценки площади контакта мигранта с уровнем грунтовых вод, а также

подсчитан объем мигранта, покинувшего зону аэрации, что характеризует количество мигранта, попавшего в зону активного водообмена.

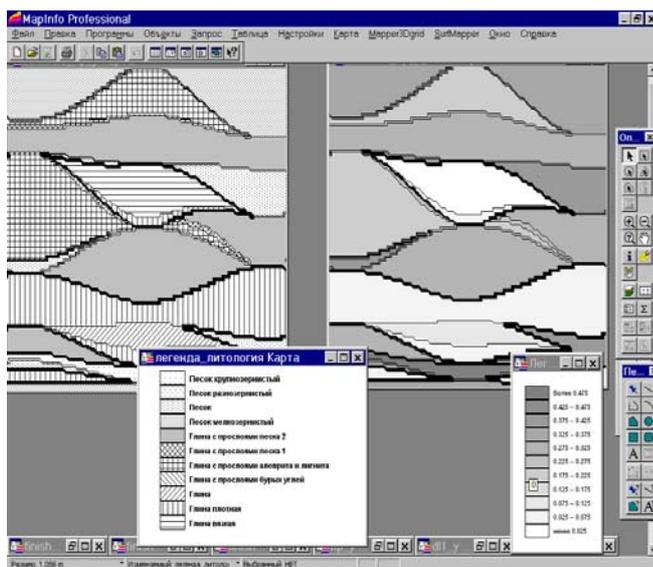


Рис. 10. Геологический разрез участка среды водозабора г. Кедровый

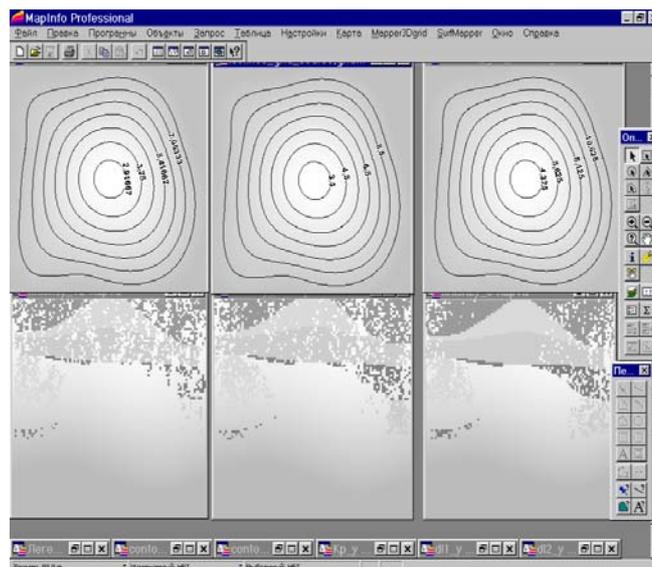


Рис. 11. Результаты моделирования процесса инфильтрации

Моделирование закачки жидкости (мигранта) в глубинные пласты проводилось на нефтяных месторождениях Томской области Соболиное и Урманское. При моделировании закачки воды в скважины оценивалась динамика распространения контура закачиваемой воды в период 2002 – 2007 гг. Для оценки было выбрано две линии профилей в меридиональном и широтном направлениях (рис.12, верхняя часть), ниже показаны контуры распространения закачиваемой жидкости (вертикальные срезы по профилям I-I и II-II).

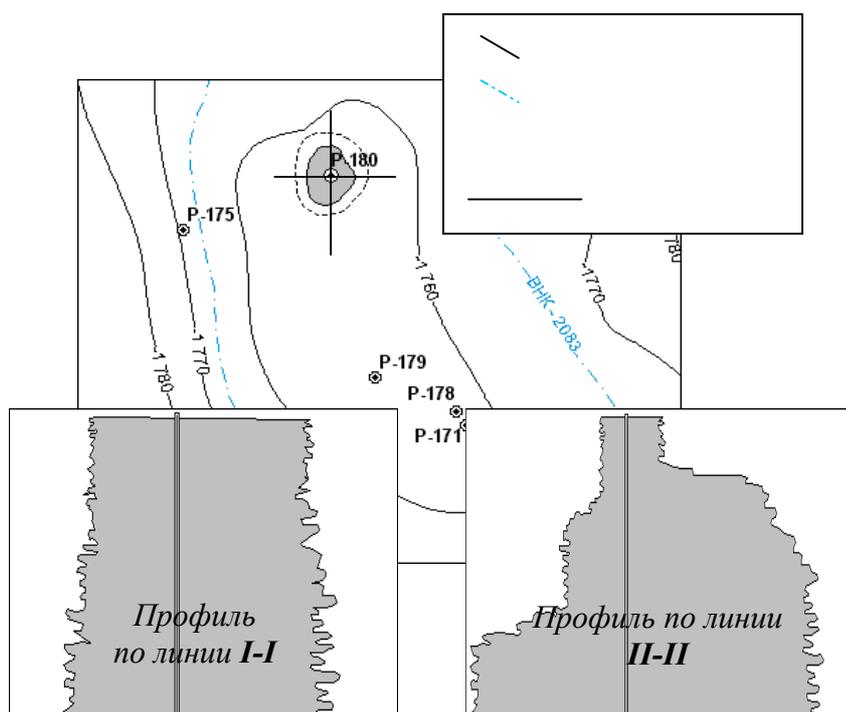


Рис. 12. Контуры распространения закачиваемой воды и профили

При решении всех перечисленных выше задач для визуализации и оформления карт использовалась подсистема «Легенда».

Основные результаты и выводы

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие основные научные и практические результаты.

1. Проанализированы проблемы, связанные со сбором, обработкой и анализом данных при проведении гидрогеологического мониторинга. Определена роль гидродинамического моделирования при решении задач комплексной оценки и прогноза состояния подземных вод. Проведен обзор и анализ мо-

делей и методов, применяемых в мировой практике для решения задач гидродинамического моделирования. Показана перспективность геоинформационного подхода при создании систем для ведения гидрогеологического мониторинга.

2. Представлены основные требования и подходы к созданию ГИС для решения гидрогеологических задач. Разработана обобщенная схема функционирования ГИС. Предложена методология создания информационного обеспечения ГИС.
3. Рассмотрены существующие способы описания моделей геологической среды. Дана классификация параметров гидрогеологической среды по критерию пространственной локализации. Предложен оригинальный трехэтапный способ формирования трехмерных многопараметрических моделей гидрогеологической среды, позволяющий учитывать особенности строения геологической среды и организовать эффективное хранение описания этих моделей. В рамках такого способа разработаны алгоритмы расчета моделей гидрогеологической среды на основе литолого-стратиграфических данных, полученных на нерегулярной сети наблюдений.
4. Предложен стохастический алгоритм, разработанный на основе метода Монте-Карло, не применявшегося ранее для гидрогеологического моделирования при решении, в частности, задач влагопереноса в геологической среде. Алгоритм реализован с учетом разработанного способа формирования трехмерных многопараметрических моделей гидрогеологической среды. Проведено исследование эффективности разработанного алгоритма для моделирования процессов инфильтрации и распространения мигрантов в глубинных пористых пластах. Исследования проводились для различных моделей среды (однородной и слоистой, как с плоскопараллельными границами пластов, так и неоднородными границами). При моделировании использовались различные типы параметров среды (константные, однородные в отдельном пласте, изотропные в плане, изотропные в разрезе, непрерывно распределенные в трехмерном пространстве). Проведено сравнение результатов моделирования с данными, полученными при использовании традиционных методик расчета характеристик влагопереноса в геологической среде с учетом существующих аналитических зависимостей между физическими параметрами моделирования. По результатам исследований сделан вывод об эффективности разработанного алгоритма и возможности применения метода Монте-Карло для обеспечения ГИС для решения гидрогеологических задач.
5. Создано ПО ГИС, позволяющее осуществлять: ввод, хранение и анализ атрибутивных и пространственных данных гидрогеологического мониторинга. Программные средства также позволяют формировать трехмерные многопараметрические модели гидрогеологической среды и на их основе моделировать процессы влагопереноса в геологической среде, визуализировать исходные данные, результаты анализа и моделирования в виде цифровых карт и оформлять последние в соответствии с отраслевыми требованиями.

6. Приведены примеры использования разработанного алгоритмического и программного обеспечения ГИС для решения ряда практических задач гидрогеологии, позволяющие считать созданные ГИС-средства эффективными.
7. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение ГИС внедрено в ряде организаций, что подтверждено соответствующими актами.

Публикации по теме диссертации

1. Марков Н.Г., Захарова А.А., Ковин Р.В., Гаряев Р.И., Черноусов М.В. Приложения в среде ГИС MapInfo для геологических и экологических исследований // Вестник MapInfo, 1997, вып.2, с. 34-38.
2. Марков Н.Г., Захарова А.А., Ковин Р.В., Ананьина В.П., Гаряев Р.И., Савицкий Р.В. Геоинформационная система для решения задач гидрогеологии // Информационные технологии, 1997, №4, с. 29-33.
3. Markov N.G., Zakharova A.A., Kovin R.V., Garjaev R.I., Chernousov M.V. GIS-technologies for geoecology and hydrogeology // Abstracts of The second Russian—Korean international symposium on science and technology (August, 30 — September 5, 1998), - Tomsk: TPU, 1998, p. 251.
4. Markov N.G., Zakharova A.A., Kovin R.V., Garjaev R.I., Chernousov M.V. GIS-technologies for geoecology and hydrogeology // The Proceedings of the second Russian—Korean international symposium on science and technology, Tomsk: TPU, 1998, pp. 347-350.
5. Markov N., Zakharova A., Kovin R., Garjaev R., Chernousov M. GIS-tools for geoecology and hydrogeology // Abstracts of the 4th International symposium on environmental geotechnology and global sustainable development (August 9-13, 1998), - Boston (Danvers), CEEST, Massachusetts, USA, 1998, p. 14.
6. Markov N., Zakharova A., Kovin R., Garjaev R., Chernousov M. GIS-tools for geoecology and hydrogeology // Proceedings of the 4th International symposium on environmental geotechnology and global sustainable development, - Boston (Danvers), CEEST, Massachusetts, USA, the Lowell volume II, 1998, p. 1601-1603.
7. Марков Н.Г., Захарова А.А., Ковин Р.В., Гаряев Р.И., Черноусов М.В. Система построения тематических карт в среде ГИС MapInfo // В кн: Материалы Международной конференция ИНТЕРКАРТО4 «ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий», Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 1998, с.147-152.
8. Ananina V., Zakharova A., Kovin R., Markov N. GIS for decision of water resources monitoring tasks and industrial regions ecological situation analysis // Materials of International conference “Anniversary scientific conference 50 years faculty of hydrotechnics”, ACEGU, Sofia, Bulgaria, v. I, 1999, p.19-26.
9. Марков Н.Г., Напрюшкин А.А., Ковин Р.В., Захарова А.А. ГИС-технология для ландшафтно-экологических исследований // Материалы международной конференции "ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий (Интеркарто-5)", Якутск: ЯГУ, 1999, с.36-45.
10. Ананьина В.П., Захарова А.А., Ковин Р.В., Марков Н.Г. Мониторинг водных ресурсов: программные средства для оценки качества воды // Материалы международной научно-практической конференции «Экологические, гу-

- манитарные и спортивные аспекты подводной деятельности», Томск: Изд-во ТГУ, 1999, с. 180-183.
11. Марков Н.Г., Захарова А.А., Гаряев Р.И., Ковин Р.В., Черноусов М.В. Математический аппарат для построения тематических карт при изучении и использовании недр // В кн.: Трансферные технологии в информатике, вып.1, Томск: Изд-во ТПУ, 1999, с.87-94.
 12. Марков Н.Г., Захарова А.А., Гаряев Р.И., Ковин Р.В. Геоинформационный подход к автоматизации процессов контроля недропользования // В кн.: Трансферные технологии в информатике, вып.1, Томск: Изд-во ТПУ, 1999, с.61-63.
 13. Markov N.G, Zakharova A.A., Kovin R.V., Ermashova N.A. Underground water quality control with use of geoinformation technologies // Abstract Book of the 5th International symposium on environmental geotechnology and global sustainable development: (August, 2000), – Belo Horizonte – Minas Gerais/Brazil, 2000, p.29.
 14. Markov N.G, Zakharova A.A., Kovin R.V., Ermashova N.A. Underground water quality control with use of geoinformation technologies // Proceedings of the 5th International symposium on environmental geotechnology and global sustainable development, – Belo Horizonte – Minas Gerais/Brazil, 2000, p.143-146.
 15. Markov N.G., Napryushkin A.A., Kovin R.V., Zaharova A.A. Vector-raster GIS for detection and assessment of urban pollution zones with use of aerospace monitoring data // Proceedings of 4-th EC conference - Historical Cities Sustainable Development: "The GIS as Design and Management Support" – HISTOCITY 2000, Italy, European Committee, 2000, pp.156-162.
 16. Марков Н.Г., Захарова А.А., Ермашова Н.А. ГИС-технологии для хранения, обработки и визуализации данных гидрогеологических исследований // Труды Международной научно-практической конференции «Геоинформатика-2000», Томск: Изд-во ТГУ, 2000, с. 180-185.
 17. Марков Н.Г., Захарова А.А., Ковин Р.В. Геоинформационные системы и технологии в геологии: тенденции развития, опыт разработки и перспективы // В сбор. научных статей «Инновационные методы и технологии нефтегазопроисковых работ и возможные пути их реализации в юго-восточных районах Западной Сибири», Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2000, с. 75-87.
 18. Zakharova A., Kovin R., Markov N., Spitsyn V. Geoinformation system for modeling processes of surface waters infiltration into geological medium // Proceedings of the 4th International conference Geographic Information Science, Brno, Czech Republic, 2001, pp.23-28.
 19. Марков Н.Г., Захарова А.А. Применение метода Монте-Карло к решению практических гидрогеологических задач // В. сбор. научных трудов СНИИГГиМС, Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2002, вып.2, с. 94-100.