

Паничкин Владимир Юрьевич

**ГЕОИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
КАЗАХСТАНА**

Специальность: 25.00.07 – Гидрогеология

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Алматы 2004

ВВЕДЕНИЕ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Для Казахстана, большая часть территории которого расположена в аридной зоне, рациональное использование и охрана водных ресурсов имеет крайне важное значение. Особенно остро во многих областях стоит проблема снабжения населения качественной питьевой водой. Это, в первую очередь, регион Восточного Приаралья и районы Центрального и Западного Казахстана. Поверхностные водные источники расположены по территории страны крайне неравномерно, часто загрязнены и в ряде случаев уже не могут рассматриваться как надежный источник хозяйственно-питьевого водоснабжения. Одним из путей решения этой проблемы является более широкое использование подземных вод. Но массивированный водоотбор может нанести существенный ущерб окружающей среде и только усугубить не всегда благополучную экологическую ситуацию. Повысить обоснованность решений, принимаемых по использованию водных ресурсов, защите их от истощения и загрязнения возможно на основе применения современных компьютерных технологий и автоматизированных информационных и обрабатывающих систем – математического и геоинформационного моделирования, экспертных систем и баз данных, привлечения информационных ресурсов глобальных мировых и локальных сетей (INTERNET и INTRANET) и т.д. Однако при разработке автоматизированных систем и их использовании часто возникают специфические проблемы, связанные с большой сложностью исследуемой предметной области и ее слабой формализацией. С аналогичными трудностями сталкиваются и при автоматизации исследований в смежных науках о Земле, которые, как и гидрогеология, являются описательными по своей сути. Проблемы заключаются в отсутствии общепринятой методики разработки сложных автоматизированных информационных и обрабатывающих систем, учитывающей характерные особенности предметной области гидрогеологии. С другой стороны, в последние годы стремительно расширяются и совершенствуются возможности инструментальных средств, позволяющих автоматизировать отдельные операции по первичной обработке и подготовке исходных данных для гидрогеологического моделирования, а также визуализацию и анализ его результатов. Это различные геоинформационные системы, ориентированные на работу с картографическими материалами, системы управления базами семантических данных, специальные пакеты, обеспечивающие наглядную визуализацию пространственно распределенной информации, и, наконец, собственно системы математического моделирования гидрогеологических объектов и процессов.

В связи с этим разработка теоретических концепций и методологических подходов к использованию новейших информационных технологий в гидрогеологических исследованиях в Казахстане, учитывающих специфические особенности предметной области, разработка, адаптация инструмен-

тальных средств и апробация их в процессе моделирования природно-техногенных объектов, имеющих важное народно-хозяйственное значение, являются **весьма актуальным**.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ. Целью исследований являлась разработка и развитие теоретико-методологических основ моделирования сложных гидрогеологических систем, а также концепций использования современных информационных технологий в гидрогеологических исследованиях в Казахстане.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи :

- проанализировать и обобщить опыт использования моделирования в гидрогеологических исследованиях;
- выполнить информационное моделирование предметной области;
- сформулировать основные концепции применения геоинформационно-математического моделирования в гидрогеологических исследованиях;
- разработать методику, технологию и инструментальные средства геоинформационно-математического моделирования;
- создать ряд геоинформационных систем, баз данных, математических моделей гидрогеологических объектов Казахстана и интегрировать их в единый автоматизированный комплекс.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ основывалась на системном анализе, теории классификаций, теории геоинформационных систем, теории баз данных, имитационном моделировании и численном решении гидрогеологических задач.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Изучена предметная область гидрогеологических исследований и выполнено ее информационное моделирование. Разработанная методика информационного моделирования предусматривает на первом этапе составление словесного описания области приложения, на втором - уточнение требований к автоматизируемым функциям с использованием языка SA, разработанного Д.Россом. При дальнейшей детализации информационной модели данных, которые должны храниться и обрабатываться в автоматизированных системах, применяется непроецесный подход с использованием объектов в качестве исходных конструкций.

2. Сформулированы концепции применения геоинформационно-математического моделирования в гидрогеологических исследованиях. Основным принципом геоинформационного моделирования является совместное использование различных типов геоизображений, с которыми связывается соответствующим образом структурированная и неструктурированная символьная информация. Наиболее полное и всестороннее ото-

бражение гидрогеологического объекта обеспечивают комплексные геоинформационно-математические модели. Геоинформационное моделирование предполагает формирование и совместное применение моделей разного масштаба и пространственного охвата. Разнотипные геоинформационные модели формируются на единой картографической основе. Основными компонентами программного комплекса, способного реализовать принципы геоинформационно-математического моделирования в гидрогеологических исследованиях, являются геоинформационные системы, интегрированные с базами данных и системами математического моделирования, между которыми организуется обмен данными.

3. Разработана методика, технология и инструментальные средства геоинформационно-математического моделирования. В состав комплекса средств, реализующих основные принципы геоинформационно-математического моделирования, входят программы MapInfo 5, FOXPRO 6.0 и GMS 3.1. Они выполняют функции создания и ведения баз графических и семантических данных, математических моделей гидрогеологических объектов, а также позволяют решать на моделях содержательные гидрогеологические задачи. Кроме этого имеется набор специально разработанных сервисных средств, обеспечивающих обмен данными между основными компонентами системы, а также программы, решающие задачи справочно-информационного обслуживания внешних и внутренних пользователей.

4. На основе разработанных подходов создан ряд баз данных, геоинформационных и математических моделей сложных гидрогеологических объектов Казахстана, выполнена их интеграция в единый автоматизированный комплекс. Основными научными результатами, полученными на них, является оценка методом моделирования эксплуатационных запасов подземных вод и прогнозирование изменения гидрогеологических условий Восточного Приаралья при различных объемах отбора подземных вод; прогноз изменения гидрогеологических условий на Казахстанской части побережья Каспийского моря при различных уровнях воды в нем; многовариантные прогнозы распространения ореола ртутного загрязнения подземных вод в северной части Павлодарского промышленного района.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ.

В результате проведенных исследований доказано, что геоинформационно-математические модели способны не только наглядно отображать строение гидрогеологического объекта, изменение его свойств в пространстве и во времени, но и прогнозировать эти изменения в результате воздействия тех или иных факторов. Применение геоинформационно-математического моделирования по сравнению с традиционным подходом позволяет получить об исследуемом гидрогеологическом объекте более полное, целостное и непротиворечивое представление. Для реализации сформулированных теоретических концепций геоинформационно-математического моделирования разработан комплекс инструментальных

средств, а также методика и технология его использования. Результаты исследований были успешно применены при создании геоинформационно-математической модели гидрогеологических условий Восточного Приаралья, моделировании гидрогеологических условий Казахстанской части побережья Каспийского моря, Павлодарского промышленного района. Для территории Восточного Приаралья методом моделирования выполнена оценка эксплуатационных запасов подземных вод, для Казахстанской части побережья Каспия даны многовариантные прогнозы изменения гидрогеологических условий в прибрежной зоне, соответствующие различным отметкам уровней воды в море. На территории Павлодарского промышленного района спрогнозировано распространение ореола ртутного загрязнения подземных вод с целью оценки опасности для окружающей среды и разработки на основе полученных результатов рекомендаций по снижению риска.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: Республиканском совещании "Экологические проблемы Казахстана"(Алма-Ата, 1991); семинаре "Математическое моделирование гидрогеологических процессов" (Душанбе, 1991); научной и учебно-методической конференции, посвященной 60-летию юбилею кафедры гидрогеологии и инженерной геологии (Алма-Ата, 1992); на Международном симпозиуме "Водные ресурсы Центральной Азии и охрана окружающей среды" (Китай, г. Урумчи / Казахстан, г. Алматы, 1993); на Республиканском семинаре "Опыт устранения подтопления в городах и населенных пунктах Казахстана" (Алматы-Шымкент, 1993); Международной конференции "Актуальные проблемы математики и математического моделирования экологических систем", посвященной 60-летию академика Султангазина У.М. (Алматы, 1996); научно-технической конференции "Гидрогеолого-мелиоративной службе Казахстана 25 лет" (Шымкент, 1996); международной научно-практической конференции "Проблемы вычислительной математики и информационных технологий" (Алматы, 1999); Международном симпозиуме "Академик К.И.Сатпаев и его роль в развитии науки, образования и индустрии в Казахстане" (Алматы, 1999); международной научно-практической конференции "Естественно-гуманитарные науки и их роль в подготовке инженерных кадров" (Алматы, 2002); пятом Международном конгрессе "Вода: Экология и технология" ЭКВАТЭК-2002 (Москва, 2002); второй международной конференции по экологической химии (Молдова, Кишинев, 2002); заседании Академических слушаний Президиума НАН РК 15 апреля 2003 г. (Алматы, 2003); Международной конференции "Математическое моделирование экологических систем" (Алматы, 2003).

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 42 работы, написанные самостоятельно и в соавторстве.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Список литературы включает 312 наиме-

нований. Объем работы 312 страниц, в том числе 100 рисунков и 17 таблиц.

Работа выполнена по материалам исследований, проведенных лично автором, под его руководством или при активном участии с 1989 г. в лаборатории моделирования и гидродинамики Института гидрогеологии и гидрофизики МОН РК. Исследования осуществлялись в рамках: программы АН РК “Формирование, комплексное использование и охрана водных ресурсов недр Казахстана” по темам “Научные основы создания постоянно действующих моделей гидрогеологических процессов и управления рациональным использованием подземных вод Казахстана” (1994 - 1995 гг.), “Моделирование и прогноз динамики гидрогеологических процессов рационального использования подземных вод в бассейнах Арала и Балхаша” (1996 г.), “Информационное и математическое моделирование гидрогеологических процессов в интенсивно осваиваемых регионах Казахстана” (1997 - 1999 гг.); программы “Оценить водные ресурсы подземных вод недр Казахстана, разработать научные основы их рационального использования в современных экономических и социальных условиях” по теме “Разработка и совершенствование геоинформационных и математических моделей гидрогеологических процессов для решения водохозяйственных и экологических проблем Казахстана” (2000 - 2002 гг.). Часть результатов была получена в процессе исследований в рамках международных проектов: гранта INCO-Copernicus IC15-CT96-0110 “Development of options for damage limitation and environmental restoration of mercury-contaminated areas in north-central Kazakhstan” (1998 - 1999 г.); Казахстанско-Нидерландского проекта “Mountain Region of South and Southeast Kazakhstan and Kazakh Part of the Caspian Sea Coastal Sector”. NETHERLANDS CLIMATE CHANGE STUDIES ASSISTANCE PROGRAMME (1998 – 2000 гг.); гранта UNESCO 00KZ11102 “Simulation of groundwaters resources of Aral sea basin for the provision of the population with quality potable water”(2001 – 2002 гг.); гранта INCO-Copernicus ICA2-CT-2000-10029 “Development of cost-effective methods for minimising risk from heavy metal pollution in industrial cities: A case study of mercury pollution in Pavlodar” (2001 – 2002 гг.).

Специфика работы потребовала привлечения знаний из различных областей научных исследований. При работе над диссертацией мы опирались на результаты фундаментальных и прикладных исследований, полученных в области: математического моделирования гидрогеологических объектов и процессов (работы Ф.Б.Абуталиева, В.В.Веселова, И.К.Гавич, И.Е.Жернова, И.И.Крашина, Л.Лукнера, В.М.Мирласа, В.А.Мироненко, Н.С.Огняника, Д.И.Пересунько, А.А.Плетнева, О.В.Подольного, А.Ф.Рошаля, С.М.Шапиро, В.М.Шестакова и др.); региональных гидрогеологических исследований районов Казахстана и Узбекистана, для которых выполнялось моделирование (работы У.М.Ахмедсафина, В.В.Веселова, А.К.Джакелова, Н.В.Калмыковой, С.Ш.Мирзаева, М.А.Мухамеджанова, С.М.Мухамеджанова, В.И.Порядина, Ж.С.Сыдыкова, Н.Н.Ходжибаева,

С.М.Шапиро и др.); системного анализа, теории классификаций и методологии познания (работы Ю.А.Воронина, Т.Гергейя, Ю.М.Горского, Е.И.Машбица, Д.Поя, Д.Росса, И.П.Шарапова, В.А., Г. Штейнгауза, В.А.Штоффа и др.); разработки пакетов прикладных программ, автоматизированных систем гидрогеологического моделирования, баз данных (работы Н.С.Антоновой, Ш.Атре, В.В.Веселова, К.Дейта, Г.Майерса, А.А.Рошалья, Л.Ф.Спивака, У.У.Умарова, И.Х.Хабибуллаева и др.); геоинформационного моделирования (работы А.М. Берлянта, И.Г.Гомберга, Э.А.Закарина, Н.В. Коноваловой, Е.Г.Капралова, Д.В.Крапухина, И.С. Пашковского, Е.А. Полшкова, Л.Ф.Спивака и др.); вычислительной математики и теории разностных методов решения дифференциальных уравнений (работы Г.И.Марчука, А.А.Самарского и др.); теории оптимального управления системами с распределенными параметрами (работы А.Г.Бутковского, В.В.Веселова, Л.М.Пустыльниковца, С.Я.Серовайского, Т.К.Сиразетдинова, В.П.Степаненко, В.И.Угорца и др.); теории решения некорректных задач (работы О.М Алифанова., В.Я.Арсенина Е.А.Артюхина, И.М.Лаврентьева, В.Г.Романова, С.В.Румянцева А.Н.Тихонова, С.П.Шишатского и др.).

Автор выражает искреннюю благодарность: научному консультанту, академику НАН РК В.В.Веселову за помощь в процессе написания диссертации, сотрудникам Опытной-методической экспедиции, осуществившим сбор и подготовку исходных данных для моделирования - Калмыковой Н.В., Нестеркиной Н.В., Бурову Б.В. и др., сотрудникам лаборатории моделирования и гидродинамики Винниковой Т.Н., Захаровой Н.М., Мирошниченко О.Л., Трушель Л.Ю., оказавшим помощь при формировании содержательного наполнения баз исходных данных для моделей Восточного Приаралья, побережья Каспия и Павлодарского промрайона, а также за помощь в оформлении настоящей работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В первой главе отмечается, что с момента возникновения моделирования не исчезает стремление гидрогеологов к осмыслению принципов формирования моделей, применимости их для решения тех или иных задач, выбора оптимальной схемы моделирования, эффективных методов ее реализации. Несмотря на это гидрогеологическое моделирование до сих пор рассматривается в какой-то мере как искусство. Делается вывод, что это обусловлено большой сложностью исследуемой области и слабой ее формализацией. Анализируются *цели, задачи* и *методы* гидрогеологического моделирования как взаимосвязанные компоненты некоторой системы. Отмечается, что впервые такой подход был применен В.В.Веселовым (Веселов В.В., 1989). Даются определения основным понятиям, которые

используются в диссертации. Рассматриваются гидрогеологические задачи, используемые для их решения методы моделирования, а также возникающие в связи с этим задачи моделирования. Исследуется система “гидрогеологические задачи - задачи моделирования”. Анализируются проблемы автоматизации процесса гидрогеологического моделирования. Прослеживается история развития методов и средств гидрогеологического моделирования. Выделяется три крупных периода, связанных с применением моделирующих устройств различного типа: физических и аналоговых устройств; цифрового моделирования на больших ЭВМ; моделирования на персональных компьютерах. Это объясняется тем, что со сменой моделирующих устройств происходит качественный скачок в совершенствовании методов моделирования, коренным образом изменяется его технология, резко расширяется перечень решаемых задач. Основное внимание акцентируется на современном состоянии гидрогеологического моделирования. Оно характеризуется бурным развитием и использованием различных инструментальных средств – как специализированных, предназначенных только для моделирования, так и средств общего назначения, применяемых в смежных областях. Это автоматизированные системы моделирования, геоинформационные системы, базы данных, разнообразные средства визуализации данных, статистические пакеты, системы автоматизированного проектирования, графические редакторы, текстовые редакторы и т.п. В работе рассматриваются наиболее важные из них. Вместе с тем отмечается, что методология моделирования, концепции построения автоматизированных систем моделирования и методика их применения отображены в публикациях явно недостаточно. Делается попытка спрогнозировать дальнейшее развитие математического моделирования в гидрогеологии. Анализируются направления, связанные с разработкой новых методов и средств постановки задач моделирования, совершенствованием средств получения, подготовки, отображения и оценки исходных данных, а также визуализации и анализа результатов моделирования. Особо подчеркивается важность перехода от содержательной постановки задачи к формальной. Утверждается, что он должен осуществляться в рамках экспертного подхода. Это значит, что принятие того или иного решения о схематизации моделируемого объекта, выработка требований к точности решения, установление различных критериев и ограничений, оценка результатов должна выполняться экспертом-моделировщиком. В связи с этим в ближайшее время имеет смысл говорить об автоматизации представления исходных данных в форме, удобной для восприятия и анализа, об автоматизации реализации принятого экспертом того или иного решения. Автоматизация самой процедуры принятия решения – более отдаленная перспектива. Для этого потребуется провести детальное исследование деятельности эксперта-моделировщика на множестве реальных примеров и попытаться ее формализовать. Большие перспективы имеются в разработке теоретических основ, методов и средств комплексного моделирования гидрогеоло-

гических объектов. В результате этого может быть получен весьма эффективный инструмент исследований. Концепция комплексного моделирования гидрогеологических объектов подробно рассматривается в последующих разделах диссертации. Реализация этого подхода требует детального исследования предметной области, анализа возможностей современных инструментальных средств и разработки концепций их применения в процессе гидрогеологического моделирования.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Во второй главе приводится характеристика предметной области с позиций системного подхода, рассматриваются виды моделей, используемых в гидрогеологических исследованиях и их классификации. Анализируются способы реализации моделей. Формулируются принципы геоинформационно-математического моделирования. Исследуются цели создания и назначение геоинформационно-математических моделей, а также реализуемые ими основные функции. Обосновывается методика разработки инструментальных средств. Формулируются требования к функциональной структуре и структуре информационной базы геоинформационно-математических моделей.

Описание предметной области базируется на системном подходе, наиболее полно изложенном применительно к гидрогеологии в работах И.К.Гавич (Гавич И.К., 1980, 1985, 1988). В соответствии с ним гидрогеологическим объектом называется исследуемый участок гидролитосферы. Составными частями гидролитосферы являются гидрогеологические тела, некоторая совокупность которых образуют гидрогеологическую систему. Выделение гидрогеологических объектов определяется целевым назначением исследований. Различают материальные гидрогеологические системы и идеальные, т.е. отображающие реальные гидрогеологические объекты в представлениях субъекта-исследователя. При любых гидрогеологических исследованиях имеет место отображение изучаемого объекта теми или иными способами, т.е. можно утверждать, что всегда используются те или иные модели. Под термином “модель” в данном случае понимается любое отображение (воспроизведение) каким-либо способом реально существующей действительности для изучения свойственных ей объективных закономерностей (Гавич И.К., 1980).

Анализируются известные классификации гидрогеологических моделей. Отмечается, что при построении таких классификаций важное значение имеет принцип отделения моделей областей геофильтрации от моделей процессов геофильтрации (Веселов В.В., Мирлас В.М., Степаненко В.П., 1992). Модели области геофильтрации отображают изменение в пространстве и времени свойств фильтрационной среды и фильтрующегося флюида, а модели процессов отображают законы, которыми они описыва-

ются. Эти принципы были применены нами при составлении классификации моделей гидрогеологических систем, приведенной на рис. 1. Мы использовали также понятие “геоизображение”, предложенное А.М.Берлянтом (Берлянт А.М., 1996). Модели процессов геофильтрации делятся на детерминированные и статистические. В работе приводится их краткая характеристика. Констатируется, что эти виды моделей отображаются уравнениями или системами уравнений, характеризующими отношения между параметрами соответствующей модели области геофильтрации. Используется и словесная форма описания. Зависимость между параметрами возможно отображать также с помощью различных графиков, диаграмм и их сочетаний. Модели области геофильтрации разделяются на графические и символные. Синонимом понятия “графические модели” в данном случае является термин “геоизображение”. Рассматриваются различные классификации геоизображений, их особенности и свойства. Отмечается, что геоизображения являются одним из основных видов моделей, используемых в гидрогеологических исследованиях. Символьными моделями области геофильтрации предлагается называть их текстовые описания. Описания могут быть структурированными и неструктурированными. Пример неструктурированного описания – характеристика водоносного горизонта или комплекса, представленная в виде текста. Структурированные описания состоят из списка свойств, характеризующих область геофильтрации или ее элементы, с которыми связано одно или несколько значений. Структурированное описание имеет форму таблицы (набора таблиц).

Все перечисленные выше модели обладают своими преимуществами и недостатками. Поэтому в процессе гидрогеологических исследований, как правило, используется сочетание различных типов моделей. Это позволяет компенсировать недостатки одних за счет достоинств других, повышает информативность моделирования. Традиционно в гидрогеологии при составлении отчетов и заключений по результатам выполненных исследований используются разнообразные графические и символные модели. Это различные простые геоизображения - картографические документы (карты, схемы, разрезы), блок-диаграммы, аэро- и космоснимки, сложные комбинированные геоизображения (фотокарты), простые и совмещенные графики и диаграммы, таблицы и текстовые описания, различные математические формулы и уравнения, отображающие процессы, протекающие внутри исследуемого объекта, а также процессы взаимодействия его с окружающей средой. Эти же формы отображения гидрогеологических объектов применяются и при их компьютерном моделировании. Коренное отличие заключается в методах создания, фиксирования, анализа, обработки и визуализации геоизображений, а также методах реализации имитируемых процессов геофильтрации. Использование современных компьютерных технологий позволяет автоматизировать эти процедуры. Комплексные автоматизированные модели, включающие систему различ-

ных разномасштабных геоизображений и связанных с ними структурированных и неструктурированных описаний гидрогеологических систем и их свойств, отображающие состояние гидрогеологических объектов, протекающие в них процессы, а также процессы взаимодействия с окружающей средой, предлагается называть *геоинформационными моделями*.

Реальные гидрогеологические объекты изменяют свое состояние под воздействием естественных и искусственных факторов, т.е. являются динамическими системами. Для прогнозирования изменения их состояния, управления протекающими в них процессами используются *математические модели*. Последние включают в себя модели имитируемого процесса и модели области геофильтрации. При использовании компьютерных технологий модели области геофильтрации формируются в результате некоторого упрощения (схематизации) и последующего преобразования картографического изображения объекта в его цифровой аналог. Для сеточных моделей таким цифровым аналогом является набор матриц различных гидрогеологических параметров, т.е. одна из форм структурированного описания свойств гидрогеологического объекта. При компьютерном моделировании модели процессов геофильтрации реализуются с помощью специальных прикладных программ. Комплексные модели, включающие геоинформационные и математические, предлагается называть *геоинформационно-математическими*. Такие модели способны не только наглядно отображать строение гидрогеологического объекта, изменение его свойств в пространстве и во времени, но и прогнозировать эти изменения в результате воздействия тех или иных факторов. Совместное использование геоинформационных и математических моделей является весьма эффективным инструментом исследования.

Успешная реализация принципов комплексного моделирования гидрогеологических объектов возможна только на основе применения современных компьютерных технологий. Используемые инструментальные средства должны позволять работать с моделями, представленными как в графической, так и в символьной формах. Различные геоизображения отображаются в разных системах координат – локальной, географической и разных проекциях. Важное требование к инструментальным средствам - возможность переходить от одной системы координат к другой, выбирать различные картографические проекции. Программы формирования трехмерных геоизображений должны позволять легко изменять точку зрения на гидрогеологический объект, отображать его в различных проекциях (изометрии, аксонометрии и т.п.). Необходимо обеспечить связь геоизображений и их элементов с соответствующими символьными данными (структурированными и неструктурированными), характеризующими свойства гидрогеологического объекта. Специальные программные средства должны реализовывать зависимость между различными параметрами, характеризующими свойства гидрогеологических объектов, имитируя, таким образом, те или иные процессы геофильтрации.

В краткой форме разработанные концепции геоинформационно-математического моделирования в гидрогеологических исследованиях можно сформулировать следующим образом. Основным принципом геоинформационного моделирования является совместное использование различных типов геоизображений, с которыми связывается соответствующим образом структурированная и неструктурированная символическая информация. Наиболее полное и всестороннее отображение гидрогеологического объекта обеспечивают комплексные геоинформационно-математические модели. Геоинформационное моделирование предполагает формирование и совместное применение моделей разного масштаба и пространственного охвата. Разнотипные геоинформационные модели формируются на единой картографической основе. Основными компонентами программного комплекса, способного реализовать принципы геоинформационного моделирования в гидрогеологических исследованиях, должны быть геоинформационные системы, интегрированные с базами данных и системами математического моделирования, между которыми организуется обмен данными.

Геоинформационно-математическое моделирование является логическим продолжением и развитием классического подхода к моделированию гидрогеологических объектов. Поэтому глобальная цель геоинформационно-математического моделирования гидрогеологических систем может быть определена как повышение обоснованности решений по рациональному использованию и охране гидrolитосферы, а также защиты инженерных сооружений от ее вредного воздействия.

Учитывая, что для моделирования гидрогеологических условий необходимы значительные объемы исходных данных, которые в процессе эксплуатации модели могут часто пополняться и уточняться, предполагается, что используемый комплекс инструментальных средств должен обеспечивать автоматизацию основных, наиболее трудоемких операций, связанных в первую очередь с накоплением гидрогеологических данных и их первичной обработкой, изучением, анализом и схематизацией природных гидрогеологических условий, созданием математической модели и ее идентификацией, оформлением и анализом результатов.

В разработке таких сложных автоматизированных информационных и обрабатывающих систем принимают участие специалисты различных областей: гидрогеологи, математики, системные и прикладные программисты. Это затрудняет управление проектированием, повышает вероятность получения непредсказуемых результатов. Поэтому большое значение приобретает четкость и однозначность выработки требований к системе. Описание таких требований называется *спецификацией*. Важнейшим этапом разработки систем, включающих базы данных, является проектирование *информационной (концептуальной) модели* предметной области.

Учитывая большую сложность рассматриваемой предметной области и ее слабую формализацию, информационное моделирование представля-

ется целесообразным выполнять в два этапа. На первом этапе составляется словесное описание области приложения. На втором уточняются требования к системе. Для их отображения используется язык SA, разработанный Д.Россом (Д.Росс, 1984). При дальнейшей детализации информационной модели данных, которые должны храниться и обрабатываться в системе, применяется непроецессный подход с использованием объектов в качестве исходных конструкций (Спивак Л.Ф., Стихарный А.П. и др., 1982).

В общем случае геоинформационно-математическая модель должна включать в себя три основных компонента: базу первичных семантических данных; базу графических данных; базу математических моделей. Между компонентами с помощью специальных программных средств необходима организация обмена данными (см. рис. 2). Требования к функциональной структуре системы, способной реализовать основные принципы геоинформационно-математического моделирования гидрогеологических объектов, приведены на рис. 3. Эти требования формулировались с учетом возможностей современных инструментальных средств и нашего опыта моделирования.

3 МЕТОДИКА, ТЕХНОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ГЕОИНФОРМАЦИОННО - МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В третьей главе описываются разработанные *методика, технология и инструментальные средства* геоинформационно-математического моделирования. *Методика* включает в себя этапы: подготовки и ввода исходной информации в базы графических и семантических данных; анализа и схематизации гидрогеологических условий; создания математической модели и ее калибровки; решения содержательных задач (прогнозирование, управления, оценки и т.п.). Завершающим этапом моделирования является оформление и анализ полученных результатов.

В состав комплекса средств, реализующих основные принципы геоинформационно-математического моделирования, входят программы MapInfo 5, FOXPRO 6.0 и GMS 3.1. Они выполняют функции создания и ведения баз графических и семантических данных, математических моделей гидрогеологических объектов, а также позволяют решать на моделях содержательные гидрогеологические задачи. Также имеется набор специально разработанных сервисных средств, обеспечивающих обмен данными между основными компонентами системы, и программы, решающие задачи справочно-информационного обслуживания внешних и внутренних пользователей системы. В работе приводится их краткое описание.

В соответствии с разработанной *технологией* исходные данные для моделирования представляются в графическом виде (карты, схемы, разрезы и т.п.) и в символьной форме (неструктурированный текст и таблицы). Они могут собираться на бумажных или машинных носителях. Наиболее

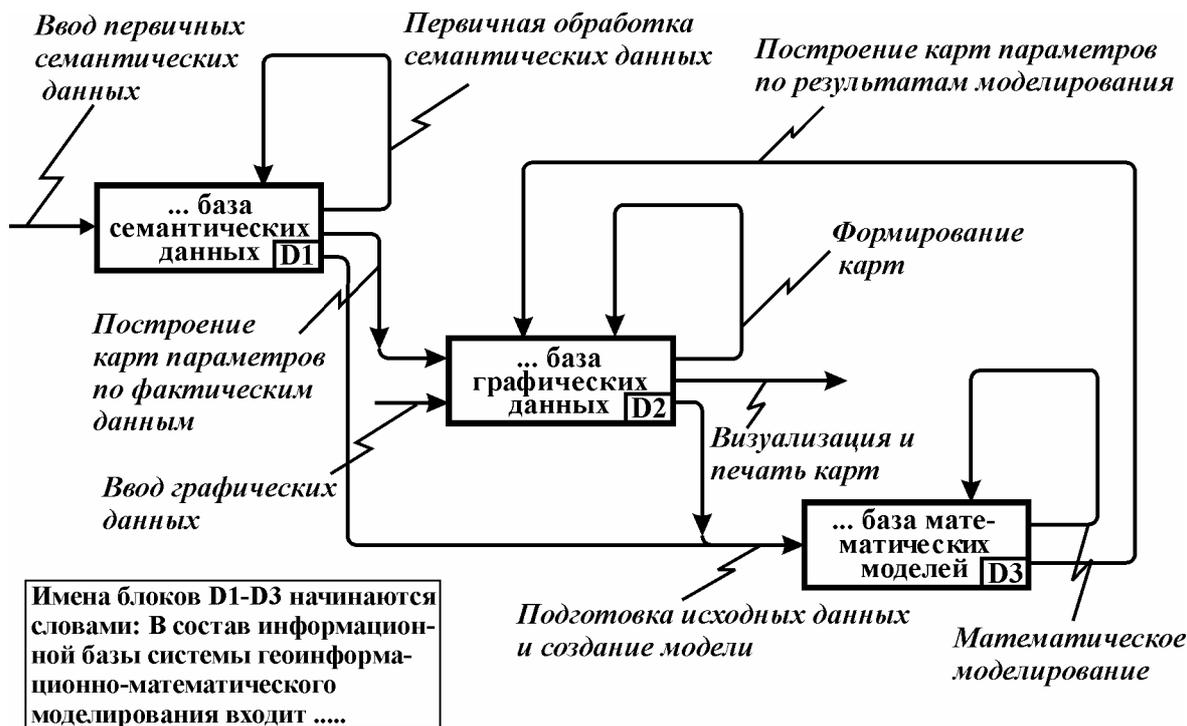


Рисунок 2 - Структура информационной базы системы геоинформационно-математического моделирования

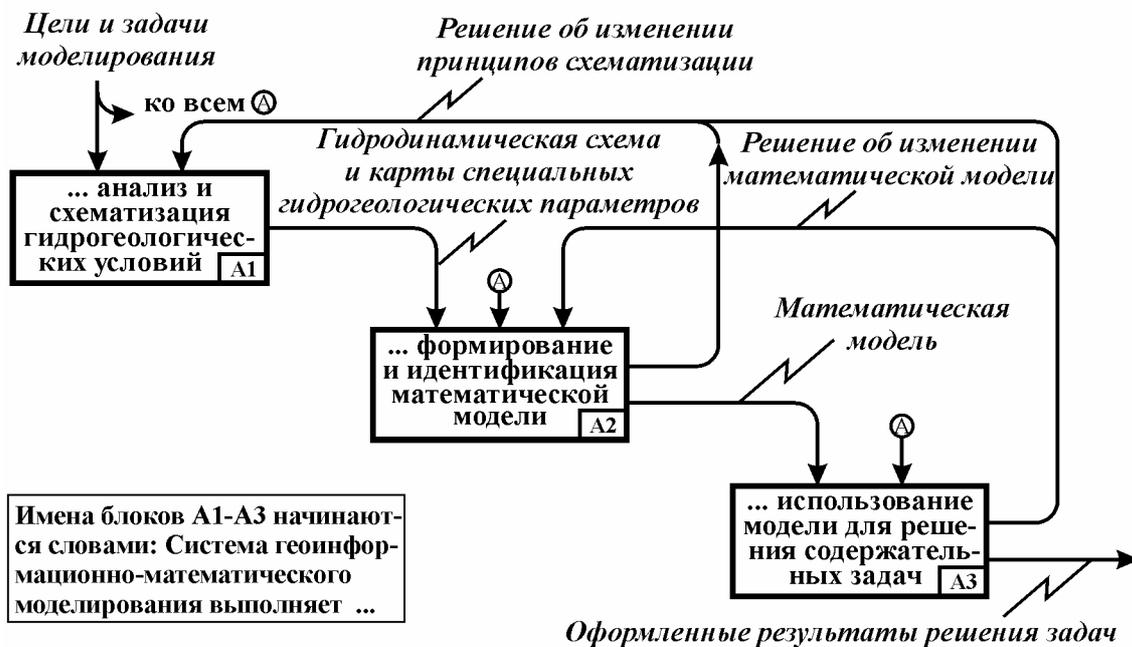


Рисунок 3 - Требования к функциональной структуре системы геоинформационно-математического моделирования

трудоемким является подготовка и ввод данных, представленных на бумажных носителях. Ввод картографических материалов в базу графических данных осуществляется с помощью дигитайзера или сканера. В процессе подготовки крупноформатный документ разбивается на более мелкие фрагменты с учетом технических характеристик используемого устройства. Выбирается система координат, с которой предполагается работать. Определяются координаты углов каждого выделенного фрагмента. При работе с дигитайзером фрагмент документа регистрируется (вводятся координаты углов), после чего нужные графические элементы (линии, контура, точки) обводятся специальным визирующим устройством. При этом кривые линии аппроксимируются ломанными. Полученное векторное представление изображения записывается в графическую базу с помощью средств MapInfo. В дальнейшем с каждым введенным графическим элементом может быть связана содержательная (символьная) информация, например, название объекта и набор характеризующих его свойств. Для водозабора это может быть описание его конструкции, сведения о производительности, данные по качеству отбираемой воды и т.п.

При использовании для ввода графических документов сканера подготовленные фрагменты помещают на его рабочую поверхность, сканируют, полученные в растровом виде изображения фрагментов регистрируют. После чего средствами MapInfo каждый графический элемент изображения обводится (преобразуется в векторную форму). Затем с полученными графическими объектами связывается содержательная информация.

Возможно использование уже готовых оцифрованных графических документов на машинных носителях. Источниками данных могут быть, например, другие автоматизированные информационные системы. В этом случае потребуется преобразование сведений в форматы, используемые системой MapInfo. При организации ввода графических документов следует учитывать, что хранение их в базе целесообразно организовывать по слоям. На отдельный слой обычно помещают данные одной тематики (например, гидрографическая сеть). Иногда целесообразно еще более глубокое дифференцирование – по типу используемых графических объектов. В этом случае точечные, линейные и площадные объекты помещаются на отдельные слои. Увеличение количества слоев в общем случае обеспечивает большие возможности для автоматизированного оформления изображений графических документов – карт, разрезов, схем, но усложняет организацию процедур обработки семантических данных, связанных с графическими объектами.

Символьные исходные данные, как и графические, могут быть представлены на бумажных и машинных носителях. Данные на бумажных носителях после проверки и подготовки чаще всего вводятся в систему с помощью клавиатуры. Для ввода в базу структурированных (табличных) данных разработаны специальные программные средства, обеспечиваю-

щие работу пользователя в диалоговом режиме (см. рис.4). Ввод неструктурированных текстовых данных возможен или с клавиатуры, или с помощью программ распознавания текста, например, FineReader. Автоматизированный ввод целесообразно использовать в случае больших массивов исходных данных на бумажных носителях. В этом случае текстовые документы сначала сканируются, затем прочитываются программой распознавания, а в заключение просматриваются и при необходимости редактируются. Ввод символьных данных также возможен непосредственно с машинных носителей. Предварительно сведения должны быть преобразованы в соответствующие форматы.

Анализ исходных данных выполняется с использованием средств ГИС MapInfo, системы управления базой семантических данных FOXPRO и специально разработанных программ. Геоинформационная система MapInfo позволяет формировать различные совмещенные изображения карт, разрезов, визуализировать их в требуемом масштабе, изменять системы координат, выбирать нужную картографическую проекцию. Разработанные программные средства осуществляют поиск и вывод на экран при работе с MapInfo сведений, хранящихся в базе семантических данных. Это описания разрезов скважин, режим подземных вод, результаты опытно-фильтрационных работ, сведения по производительности водозаборных сооружений и некоторые другие данные, необходимые для принятия экспертом-моделировщиком того или иного решения (см. рис. 5). В процессе анализа используются топографические, гидрогеологические, геолого-литологические и другие карты и разрезы. В итоге обычно составляется карта районирования – по типу режима подземных вод, условиям их залегания, формирования, особенностям литологического строения водовмещающих пород и т.п. Принципы районирования определяются экспертом-моделировщиком с учетом гидрогеологических условий и целей решаемой с помощью моделирования задачи.

На основе проведенного анализа моделировщик схематизирует гидрогеологические условия. Средствами MapInfo строится гидродинамическая схема. Она включает в себя изображение в плане и несколько изображений в разрезе. На плановом изображении присутствуют естественные и техногенные объекты, влияющие (или способные влиять) на моделируемые процессы. На схематических гидродинамических разрезах изображается структура модели. Обычно это границы выделенных при схематизации слоев. Результаты схематизации записываются в базу графических и символьных (семантических) данных. В последнюю должны быть внесены результаты схематизации разреза по каждой разведочной скважине, а также результаты схематизации влияния на моделируемый процесс природных и техногенных объектов – рек, водохранилищ, каналов, водозаборов и т.п. с учетом выбранного шага аппроксимации по времени. Таким образом, для разведочных скважин в базу вносятся глубины подошв выделенных слоев, для гидрометрических постов на реках – средние значения отметок

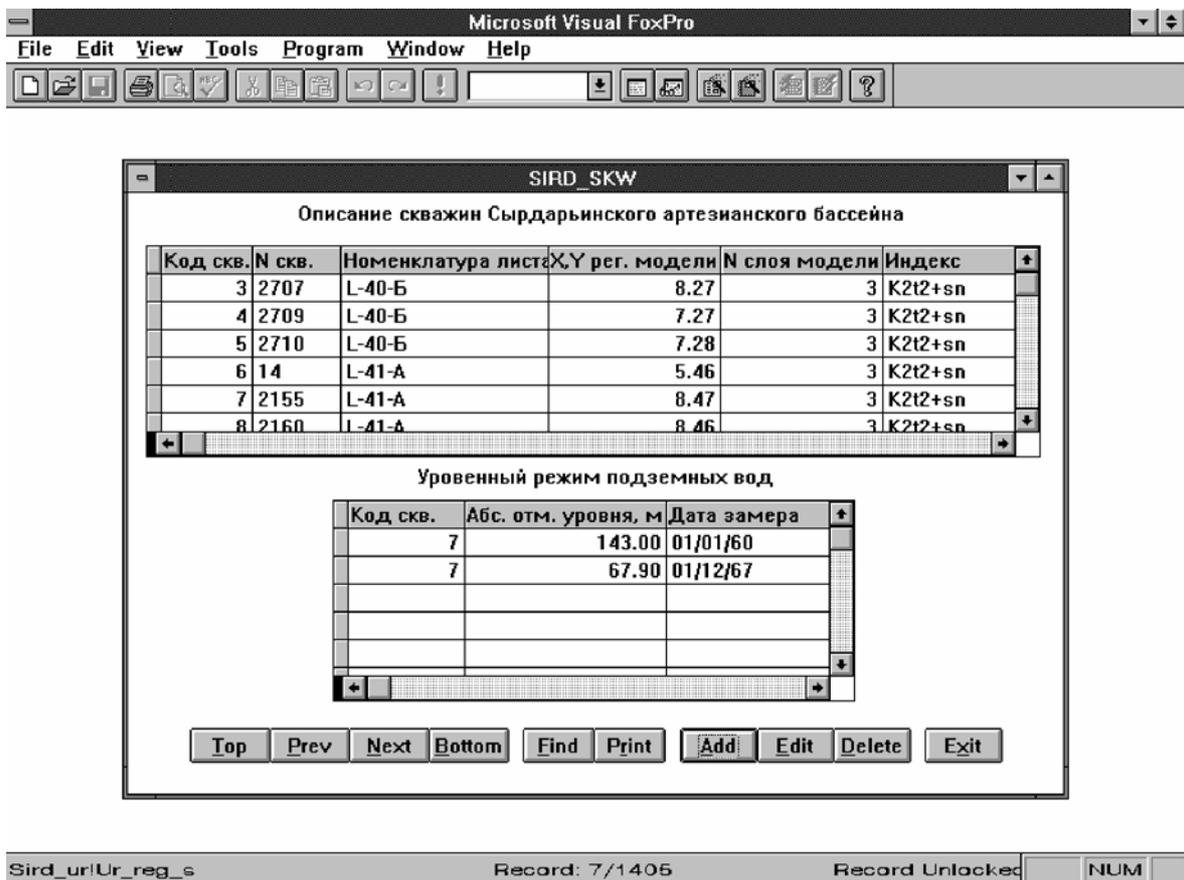


Рисунок 4 - Вид экрана при работе с автоматизированной базой первичной гидрогеологической информации

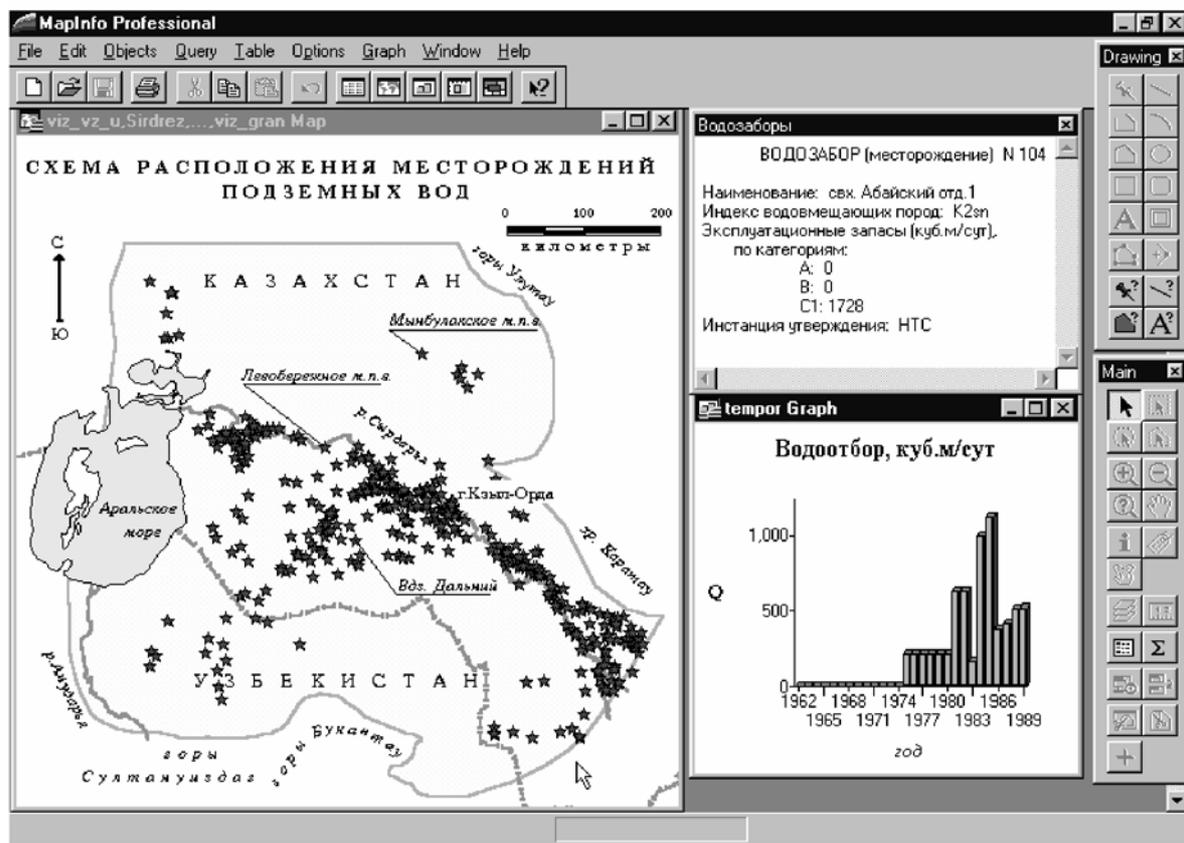


Рисунок 5 - Просмотр сведений по водозабору

уровня воды, для эксплуатационных скважин – средние значения производительности для каждого выделенного шага по времени и т.д. После выделения слоев для каждого из них с использованием средств MapInfo и данных из базы строятся карты параметров (коэффициентов фильтрации, коэффициентов водоотдачи и т.д.). Строятся также карты питания подземных вод и их разгрузки. Устанавливается принадлежность объектов, показанных на плановой гидродинамической схеме, к соответствующему слою модели. На следующем этапе выполняется: формирование наборов исходных данных; создание концептуальной схемы; аппроксимация исходных данных в пространстве и времени; генерация фильтрационной схемы; калибровка модели. Наборы исходных данных формируются с помощью специально разработанных программных средств. Программы эти также представляют выбранные данные в форматах, используемых системой моделирования GMS 3.1.

Затем с помощью GMS 3.1 формируется концептуальная модель. Она включает в себя плановую концептуальную схему и схему структуры модели в разрезе, построенные в соответствии с особенностями имитируемого процесса на основе гидродинамической схемы. Концептуальная схема с помощью ограниченного набора типовых объектов, используемых системой GMS, графически отображает в плане упрощенные гидрогеологические условия по внешней границе моделируемой области и внутри нее. Такими типовыми объектами являются, например, линия, по которой задается меняющийся вдоль нее и во времени напор, река, дрена, поток, непроницаемая граница.

Сформированная концептуальная модель проверяется и в случае необходимости редактируется. Выбирается сеточная аппроксимация моделируемой области. Абсолютные отметки слоев по всей моделируемой области вычисляются методом интерполяции, который выбирается моделировщиком. Затем автоматически генерируется фильтрационная схема и набор исходных данных для решения соответствующей задачи.

Заключительным этапом создания модели является ее калибровка, или доказательство адекватности природным условиям. В процессе калибровки добиваются совпадения рассчитываемых значений динамических параметров (напоров, концентраций, расходов), полученных в результате моделирования с данными полевых исследований с приемлемой точностью. Подбор параметров модели осуществляется при многократном решении прямых задач, при условии соблюдения некоторых ограничений на значения подбираемых параметров модели.

В соответствии с разработанной методикой калибровки для достижения желаемого результата необходимо задать предварительное приближенное значение искомых параметров (коэффициентов фильтрации, площадного питания, водоотдачи, пористости и т.д.) и грубый их подбор вручную. Уточнение параметров производится автоматически с использованием специальных программных средств. Чем ближе предварительное

приближение к результату, тем больше вероятность его получения. После успешной калибровки на модели могут решаться различные содержательные задачи – прогнозирования, оценки, управления и т.п.

Важной функцией системы геоинформационно-математического моделирования является справочно-информационное обслуживание. Данные, хранящиеся в графической базе, могут выдаваться внутренним пользователям системы в виде различных совмещенных карт, разрезов, трехмерных диаграмм, а также в табличной форме. Данные, предназначенные для свободного распространения, могут регулярно публиковаться в INTERNET. Это наиболее оперативный способ распространения информации. Через INTERNET может осуществляться также справочно-информационное обслуживание внешних пользователей системы.

В конце главы приводится краткое описание созданного комплекса инструментальных средств геоинформационно-математического моделирования, который включает сервер и 5 рабочих станций. Функции рабочих станций выполняют компьютеры PIII-PIV, процессоры которых работают на частотах от 800 МГц до 3.0 ГГц. Оперативная память 128-512 Мб. Сервер – HP NetServer LC 2000 PIII. Все машины объединены в одноранговую локальную сеть, пропускная способность которой 100 Мб/с. В состав комплекса входят также несколько принтеров (цветные и черно-белые) формата А4-А2, а также цветной струйный плоттер HP DJ 500 формата А0.

4. ПРИМЕНЕНИЕ И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В КАЗАХСТАНЕ

Сформулированные принципы геоинформационно-математического моделирования апробировались, развивались и совершенствовались в процессе создания моделей гидрогеологических условий Восточного Приаралья, Казахстанской части побережья Каспийского моря, моделирования ртутного загрязнения подземных вод Павлодарского промышленного района, а также моделирования гидрогеолого-мелиоративных условий орошаемых массивов Казахстана. В четвертой главе приводится описание этих моделей и полученных с их помощью результатов.

Геоинформационно-математическая модель гидрогеологических условий Восточного Приаралья

Региональная математическая модель гидрогеологических условий Восточного Приаралья была создана в 1989 - 1991 гг. в Казахстанской опытно-методической экспедиции (КОМЭ) совместно с Институтом гидрогеологии и гидрофизики АН РК и другими производственными организациями Министерства геологии Казахстана на базе ЭВМ ЕС 1055М. В 1991 – 1992 гг. в Институте гидрогеологии и гидрофизики была разработана модель-врезка Кзылжарминского месторождения подземных вод. В дальнейшем проводились работы по пополнению, развитию и совершенствованию функциональных возможностей баз семантической и графической

гидрогеологической информации этого региона. Созданная к настоящему времени геоинформационно-математическая модель может рассматриваться как прототип автоматизированной системы поддержки принятия решений по управлению подземными водными ресурсами региона. Ее архитектура разрабатывалась на основе теоретических концепций, изложенных во второй главе диссертации. Учитывалось, что проблема региона Аральского моря, возможные пути ее решения представляют интерес не только для Казахстана, но и для ученых всего мирового сообщества. В этой связи мы посчитали целесообразным обеспечить доступ через INTERNET к сведениям, предназначенным для свободного распространения. Также принималось во внимание, что по Аральской проблеме опубликовано огромное количество статей, отчетов и монографий. Поэтому в состав комплекса была включена автоматизированная информационная система для хранения библиографических описаний этих документов. Архитектура системы показана на рис. 6. Информационная база комплекса состоит из базы графических данных, базы семантических данных, базы математических моделей, документографической базы, а также данных, помещаемых на WEB-сайт.

В базе графических данных накапливаются числовые модели различных геоизображений региона. Это карты фактического материала, гидрогеологические карты и разрезы, карты основных гидрогеологических параметров (гидроизогипс, водопроницаемости, коэффициентов фильтрации и др.), построенные по фактическим данным, а также по результатам моделирования в разных масштабах и на различные моменты времени. На любых картах расположение географических объектов показывается с помощью графических условных знаков – точек, линий, регионов. С каждым таким объектом обычно связывается некоторая описательная (атрибутивная) информация. Например, точечному условному знаку “разведочная скважина” соответствует ее номер, дата проходки, глубина, результаты опробования и т.п. Эти сведения, соответствующим образом структурированные, хранятся в *базе семантических данных*. Информационную базу математических моделей образуют исходные данные и результаты моделирования, представленные в форматах, используемых системой гидрогеологического моделирования. Неструктурированные документы и их библиографические описания накапливаются в *документографической базе*. Это различные статьи и монографии, отчеты, а также методические инструкции. Сведения, которые могут распространяться без ограничений через глобальную сеть INTERNET, помещаются на WEB-сайте в форматах HTML. Здесь же публикуются мнения ученых по проблеме Арала и возможных путях ее решения.

Функционально комплекс состоит из геоинформационной системы, системы управления семантической базой данных, документографической системы, системы математического моделирования гидрогеологических процессов, программного комплекса по созданию и ведению WEB-страниц, а также программ, обеспечивающих подготовку исходных дан-

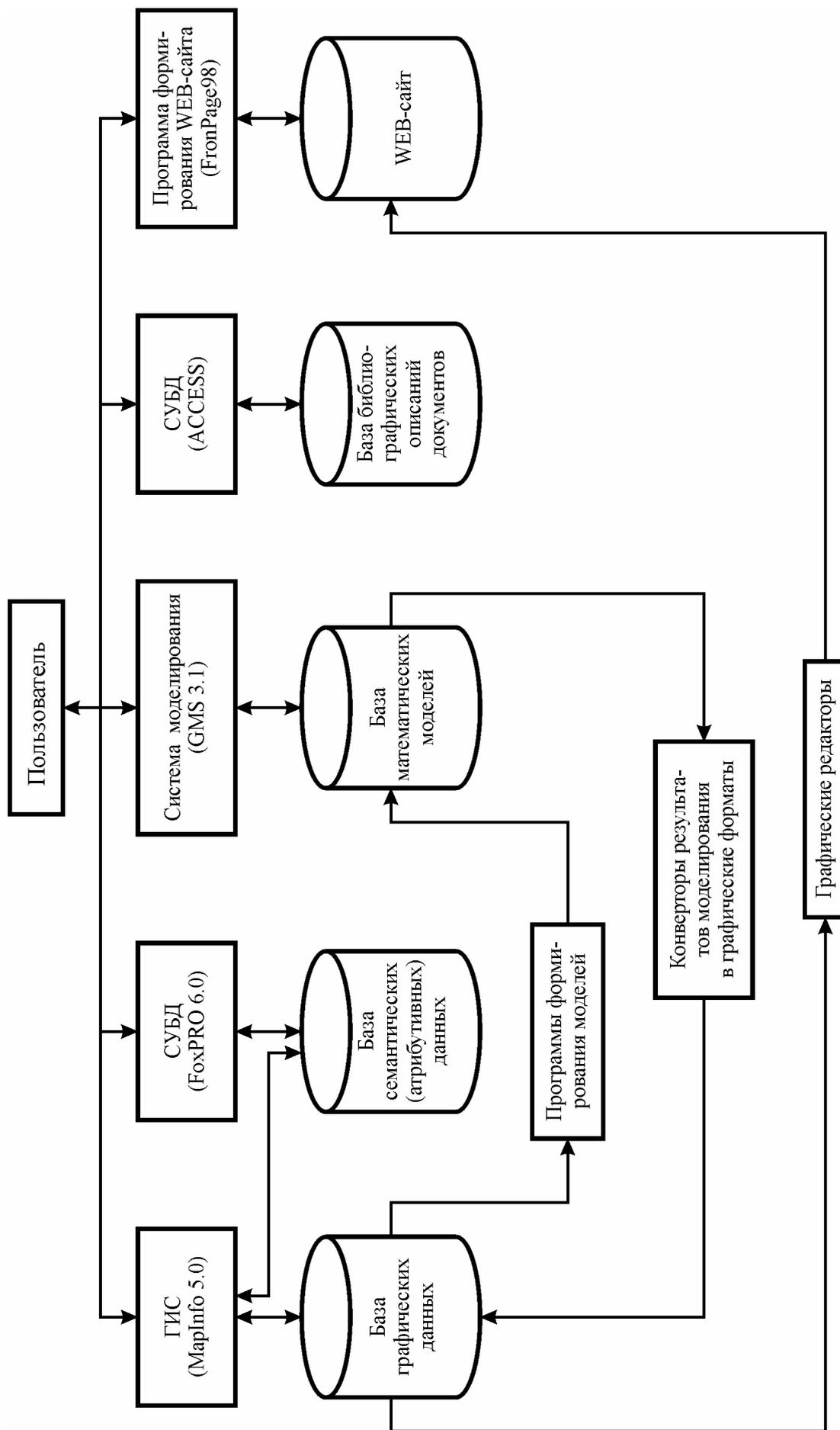


Рисунок 6 - Архитектура АИС Восточного Приралья

ных для создания математических моделей, визуализацию результатов моделирования и преобразование их в форматы графической базы данных (см. рис.6). В настоящее время ГИС функционирует на основе MapInfo 5.0. В качестве системы управления базами данных используется FOXPRO 6.0. Начаты работы по замене системы моделирования АМИГО-ПК на более современную, GMS 3.1. Для работы с библиографическими описаниями различных документов по проблеме Аральского региона (статей, монографий, отчетов и т.п.) используется автоматизированная система, созданная на основе ACCESS. Создание и ведение WEB-сайта выполняется с помощью программы FrontPage 2000. Публикация сведений осуществляется при помощи и поддержке UNESCO.

Логически, с точки зрения пользователя-гидрогеолога, система состоит из *геоинформационной* и *математической модели гидрогеологических условий Восточного Приаралья*, которые являются основными компонентами системы. В состав комплекса входит также *библиографическая система* и *WEB-сайт*, выполняющие вспомогательные функции.

Цель создания *геоинформационной модели* - отображение гидрогеологических условий региона для их изучения и анализа, подготовка исходных данных для математической модели, отображение, оформление и анализ результатов моделирования. В качестве источника исходных данных для создания геоинформационной модели Восточного Приаралья использовались картографические материалы на бумажных носителях (карты, разрезы, построенные по результатам выполненных ранее полевых исследований), а также карты, построенные по результатам моделирования с помощью специальных программных средств.

На исследуемой территории выделено пять основных водоносных горизонтов и комплексов, приуроченных к неоген-четвертичным (**N-Q**), верхнеэоценовым (**P₂³-sk**), верхнетурон-сенонским **K₂t₂-sn**, верхнеальб-сеноманским (**K₁al₃-K₂s**) и нижне-среднеальб-юрским (**K₁al₁₋₂-J**) отложениям. Водоносные горизонты и комплексы разделяют три региональных водоупора, которые слагаются палеогеновыми (**P**), нижнетуронскими (**K₂t₁**) и верхнеальб-сеноманскими (**K₁al₁₋₂**) отложениями, которые имеют практически повсеместное распространение, а также чеганские глины в северо-западной части описываемой территории (**P₂₋₃cg**). Для каждого из перечисленных выше водоносных и водоупорных горизонтов и комплексов были составлены и введены в графическую базу карты специальных гидрогеологических параметров, необходимых для схематизации гидрогеологических условий, создания и идентификации математической модели. Для водоносных горизонтов и комплексов это карты гидроизогипс, построенные на различные моменты времени, избыточного напора, глубин залегания уровня грунтовых вод, минерализации подземных вод, общей и эффективной мощности водовмещающих пород, глубин залегания кровли, водопроницаемости, упругой водоотдачи и некоторые другие. Для водоупоров составлялись карты мощности и глубин залегания их кровли. В

графическую базу данных вводилась также серия гидрогеологических разрезов, построенных для описываемой территории. В работе приводится краткое описание выделенных водоносных горизонтов и комплексов, рассматривается состояние гидрогеологических условий, существовавших на ненарушенный период (1960 г.) и их изменение в результате техногенного воздействия. Описание дается с учетом результатов выполненного нами математического моделирования. Они, в частности, включали в себя расчет балансовых составляющих потока подземных вод для основных водоносных горизонтов и комплексов на различные моменты времени, а также балансы, рассчитанные для отдельных участков неоген-четвертичного, палеогенового и верхнетурон-сенонского водоносных комплексов. Границы балансовых участков выбирались по результатам районирования, в основу которого были положены структурно-тектонические и гидродинамические признаки. Последние, в свою очередь включали в себя единство области питания и разгрузки, а также учитывали различие фильтрационных свойств водовмещающих пород (Сыдыков Ж.С., Шапиро С.М., Джаkelов А.К. и др., 1992).

Подземные воды Приаралья начали использовать с 60-х годов, в первую очередь для хозяйственного водоснабжения населенных пунктов региона. Несмотря на это, проблема снабжения населения качественной питьевой водой всегда была очень острой. Поэтому главной целью математического моделирования гидрогеологических условий Восточного Приаралья являлось изыскание возможности коренного улучшения водоснабжения населения. Это предполагало, в частности, повышение обоснованности решений по: планированию и организации поисково-разведочных и оценочных работ на подземные воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения; управлению режимом эксплуатации действующих водозаборов на подземные воды; сохранению высококачественных подземных вод в условиях возрастающих техногенных нагрузок. Реализация перечисленных выше требований была возможна только при условии создания системы автоматизированных моделей различной структуры и детальности. Она включала в себя *региональную модель* Восточного Приаралья и *модель-врезку* Кзылжарминского месторождения подземных вод.

Математическая модель гидрогеологических условий Восточного Приаралья создавалась в начале 90-х годов сначала на ЭВМ серии ЕС, затем на персональном компьютере с использованием программы АМИГО ПК. В настоящее время она адаптируется в системе моделирования GMS 3.1. Основные задачи, которые решались на *региональной модели* - оценка эксплуатационных запасов подземных вод, а также прогнозирование изменения гидрогеологических условий для различных объемов отбора подземных вод (прогнозирование изменения уровней подземных вод, расчет балансовых составляющих потоков подземных вод, оценка взаимосвязи подземных вод и Аральского моря). Результаты решения, полученные на региональной модели, использовались также как граничные условия для

модели-врезки Кзылжарминского месторождения подземных вод. Границами региональной модели Приаралья являются: на юго-востоке - Каратауское поднятие, на востоке - предгорья хребта Каратау и большой Каратауский разлом, на северо-востоке - водораздел между Тургайским и Чу-Сарысуйским бассейнами. Северная граница определена расчетным путем - по радиусу влияния краевых водозаборов моделируемой территории. С северо-запада моделируемая территория ограничивается Чаграйским плато, Чушкакольским кряжем и Мугоджарами. Западная граница модели проходит по валу Архангельского, пересекающему Аральское море, и далее, по его продолжению - Арало-Кызылкумскому валу. За южную границу модели приняты горы Букантау и Нуратау.

В результате проведенной схематизации в исследуемом регионе в разрезе были выделены четыре водоносных комплекса: палеоген-неоген-четвертичный, верхнетурон-сенонский, верхнеальб-сеноманский и нижне-среднеальб-юрский, взаимодействующие между собой через три разделяющих слоя. Модель имитирует только процесс фильтрация подземных вод. Можно считать, что для верхнего комплекса фильтрация происходит в безнапорных условиях, для нижних – в напорных. До начала 60-х годов существовали естественные, или ненарушенные условия. Затем важную роль стали играть техногенные факторы, существенно изменившие естественный режим подземных вод. В связи с этим модель отображала стационарную фильтрацию (по состоянию на 1960г.) и нестационарную (имевшую место после 1960г.). Необходимо было также учесть, что в естественных условиях подземные воды палеоген-неоген-четвертичного комплекса формируются преимущественно за счет инфильтрации атмосферных осадков, перетока из нижележащего верхнетурон-сенонского водоносного комплекса, притока по внешним границам, а также потери стока реки Сырдарьи. Разгрузка происходит в основном путем испарения с поверхности грунтовых вод, перетока в нижележащий горизонт, в Аральское море, в реку Сырдарью, а также оттока по внешним границам модели. Подземные воды верхнетурон-сенонского водоносного комплекса формируются в основном за счет инфильтрации атмосферных осадков, перетекания из смежных водоносных комплексов, а также притока по внешним границам. Разгрузка осуществляется преимущественно путем оттока в палеоген-неоген-четвертичный водоносный комплекс, в Аральское море, по внешним границам и в меньшей мере через тектонические нарушения. Для верхнеальб-сеноманского и нижне-среднеальб-юрского водоносных комплексов питание подземных вод и их разгрузка происходит через внешние границы, в результате взаимодействия со смежными водоносными горизонтами и через тектонические нарушения. Начиная с 1960г. естественный режим подземных вод нарушается в результате техногенного воздействия. Это в первую очередь нарастающий во времени водоотбор, работа множества самоизливающихся скважин, снижение уровня воды в Аральском море и отступление его береговой линии.

Учитывая значительные отличия в значениях коэффициентов фильтрации водоносных и водоупорных горизонтов (в тысячи раз) была принята предпосылка Мятиева-Гиринского, т.е. водоносные горизонты на модели были представлены как проницаемые слои, а водоупорные – как слабопроницаемые. Процессы стационарной и нестационарной фильтрации подземных вод описывались системами дифференциальных уравнений, которые решались численными конечно-разностными методами. Процессы взаимодействия с окружающей средой отображались с помощью соответствующих граничных условий, а также имитировались заданием положительного или отрицательного площадного питания. При этом юго-восточная, северная, северо-восточная, западная и южная границы для палеоген-неоген-четвертичного (P-N-Q) водоносного комплекса, а также р.Сырдарья задавались в виде граничных условий I рода с заданным напором. Восточная, западная, южная, северная и северо-восточная границы для палеоген-неоген-четвертичного (P-N-Q) комплекса, а также области отсутствия водоносных комплексов, тектонические нарушения моделировались в виде границ II рода с заданным расходом. Граница по контуру Аральского моря задавалась в соответствии с положением его береговой линии. Разгрузка подземных вод путем испарения, работа водозаборов, инфильтрация атмосферных осадков схематизировались в виде отрицательного или положительного площадного питания. При решении обратной нестационарной и прогнозных задач испарение подземных вод и разгрузка их в озерные котловины, разгрузка подземных вод в Аральское море через его дно задавались на модели как граничные условия III рода. Водозаборы подземных вод схематизировались как отрицательное площадное питание, изменяющееся во времени. Работа самоизливающихся скважин при решении эпигнозной задачи схематизировалась как отрицательное площадное питание, а при решении прогнозных задач как граничное условие III рода.

Моделируемая область аппроксимировалась неравномерной ортогональной сеткой с шагом от 5 - 10 км в центральной части области и в местах расположения основных водозаборов до 40 км по периферии. Размерность области $M * N$ составляла $89 * 53$ узлов. Общее количество счетных узлов для четырех слоев составляло порядка 18 000.

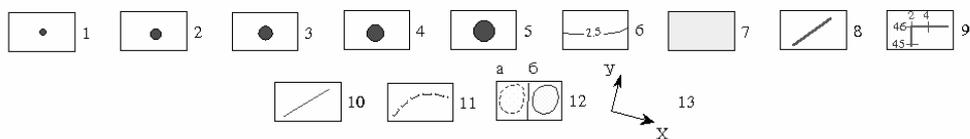
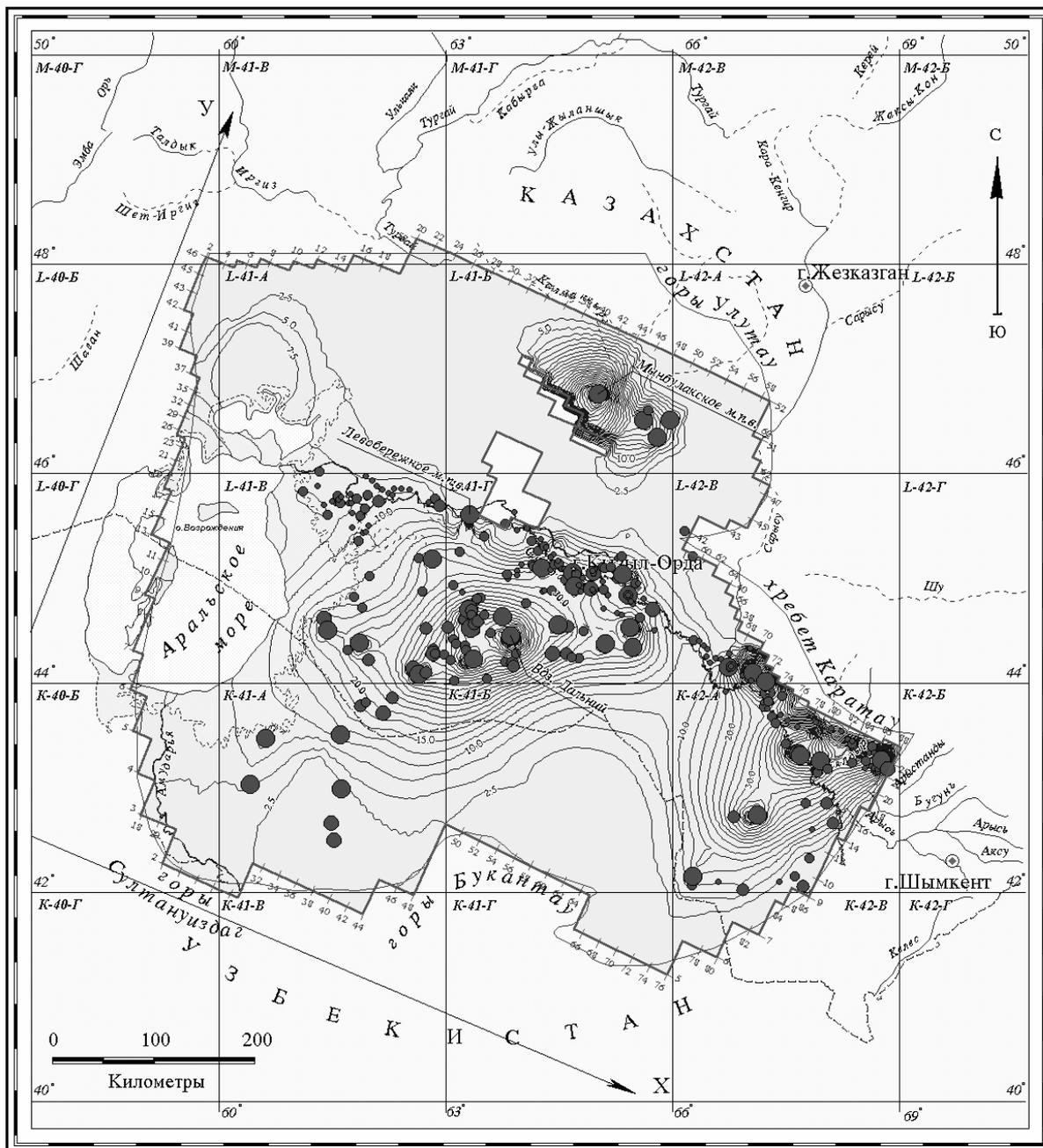
С целью калибровки модели, доказательства ее адекватности природным условиям на ней были решены обратная стационарная и нестационарная задачи.

В процессе решения обратной стационарной задачи был осуществлен подбор фильтрационных параметров водоносных и разделяющих слоев, а также уточнены величины питания и разгрузки подземных вод по внешним и внутренним границам модели. При решении обратной нестационарной (эпигнозной) задачи на модели воспроизводилась работа водозаборных и самоизливающихся скважин за период с 1961 по 1989 год, снижение уровня воды в Аральском море с 53 до 39м, отступление его береговой линии. Подбирались значения коэффициентов упругой и гравитационной

водоотдачи. Адекватность модели природным условиям оценивалась по степени совпадения натуральных и модельных напоров подземных вод, а также анализа балансовых составляющих потока подземных вод. Систематическая погрешность решения обратной стационарной задачи (для разных водоносных комплексов) изменялась от 0.15 до – 0.75 м, случайная погрешность колебалась от 5.4 до 6.9 м. В соответствии с целями моделирования предусматривалось решение на модели двух вариантов прогнозных задач. Первый предполагал сохранение производительности водозаборных скважин на уровне 1989 г., т.е. 4.2 м³/с (в том числе из палеоген-неоген-четвертичного водоносного комплекса 1.4 м³/с, из верхнетурон-сенонского – 2.8 м³/с). Второй предусматривал водоотбор в рамках утвержденных запасов (по сумме категорий), а также работу водозаборных сооружений по состоянию на 1989 г. на неутвержденных запасах, т.е 32.7 м³/с (10.0 м³/с – из палеоген-неоген-четвертичного и 22.7 м³/с - из верхнетурон-сенонского водоносных комплексов). Прогноз изменения гидрогеологических условий в пределах моделируемой территории производился сроком на 50 лет. При этом сохранялись подобранные значения инфильтрационного питания подземных вод и притоков по внешним границам II рода.

В соответствии с первым вариантом прогноза на конец 2039 года произойдет снижение уровня подземных вод во всех комплексах. В палеоген-неоген-четвертичном - в среднем на 3 – 5 м; в верхнетурон-сенонском и верхнеальб-сеноманском – на 5-15 м. Понижение напоров в отдельных водозаборах достигнет 40 м, хотя и не превысит допустимой величины. Таким образом, водоотбор на уровне 1989 г. является обеспеченным. Суммарная величина расходов скважин на самоизливе в целом по всему водоносному комплексу к 2039 г. сократится на 0.4 м³/с и составит 1.3 м³/с. Величина ущерба поверхностному стоку будет незначительной. Разгрузка подземных вод первого от поверхности водоносного комплекса в Аральское море снизится до 2.3 м³/с в связи со сработкой напоров подземных вод в палеогеновых отложениях. По меловому водоносному комплексу она возрастет с 1.8 до 2 м³/с

При решении прогнозной задачи по второму варианту имитировалось существенное увеличение водоотбора до 32.2 м³/с, в том числе по палеоген-неоген-четвертичному водоносному комплексу до 10.0 м³/с, а по меловому - до 22.7 м³/с. К концу прогнозного периода суммарный расход скважин на самоизливе сократится до 0.5 м³/с, произойдет снижение напоров по всем водоносным комплексам. По верхнему водоносному комплексу региональное понижение уровня составит порядка 3 м, а в Прикаратауской части территории - до 5 – 10 и более метров. Эти понижения будут меньше допустимых, за исключением района г.Кызылорды. Здесь они будут сопоставимы с допустимыми. В водоносных комплексах меловых отложений снижение напоров произойдет практически повсеместно. На отдельных водозаборах оно достигнет 60 – 80 м, оставаясь в пределах допустимой величины (см. рис. 7).



Эксплуатационные запасы месторождений подземных вод по сумме категорий и производительность водозаборов, действующих на неутвержденных запасах (л/с): 1 - от 1 до 10; 2 - от 10 до 30; 3 - от 30 до 50; 4 - от 50 до 100; 5 - >100. 6 - прогнозные понижения; 7 - область моделирования; 8 - граница области моделирования; 9 - сеточная аппроксимация модели; 10 - граница района исследований; 11 - государственная граница Республики Казахстан. 12 - акватория Аральского моря по состоянию на: а) - 1961 г.; б) - 1989 г. 13 - оси локальной системы координат моделируемой области

Рисунок 7 - Карта прогнозных понижений уровня подземных вод водоносного комплекса верхнетурон-сенонских отложений ($K_2 t_2-sn$) Восточного Приаралья по состоянию на 2040 г. (II вариант прогноза)

Изменение соотношения напоров приведет к смене направленности перетекания. Это, вероятно, повлечет за собой изменение качества подземных вод мелового водоносного комплекса. Следует ожидать существенного изменения структуры баланса подземных вод. Значительно сократятся площади разгрузки подземных вод из мелового водоносного комплекса в палеоген-неоген-четвертичный. В то же время увеличится разгрузка из нижележащих меловых водоносных комплексов в верхнетурон-сенонский. По палеоген-неоген-четвертичному водоносному комплексу сократится величина испарения, значительно возрастет перетекание из него в меловой, уменьшится отток по внешним границам. Суммарная разгрузка подземных вод в Аральское море снизится до $2.6 \text{ м}^3/\text{с}$. В этой связи, вероятно, сократится привнос солей в акваторию моря за счет подземных вод.

Результаты моделирования подтвердили техническую возможность извлечения подземных вод в объемах утвержденных запасов по сумме категорий. Вместе с тем не до конца ясным остался вопрос оценки влияния массивированного отбора подземных вод на их качество, а также на состояние окружающей среды. Был сделан вывод, что решение этих задач возможно только на более детальных моделях, которые представляется целесообразным создавать для отдельных участков исследуемой территории.

Такая *модель-врезка* была создана для Кзылжарминского месторождения подземных вод (Веселов В.В., Мирлас В.М., Трушель Л.Ю., 1993). Целью моделирования являлась оценка эксплуатационных запасов подземных вод верхнемелового водоносного горизонта и прогнозирование возможного ухудшения их качества в результате перетекания соленых вод из смежных водоносных горизонтов. В результате было доказано, что эксплуатационные запасы подземных вод Кзылжарминского месторождения можно считать обеспеченными на основании гидродинамических критериев. В то же время методом балансовых расчетов было установлено, что существует опасность ухудшения качества отбираемой воды к концу прогнозного периода в результате поступления солоноватых вод из смежных водоносных горизонтов – маастрихтского и верхнеальб-сеноманского.

Геоинформационно-математическое моделирование гидрогеологических условий Казахской части побережья Каспийского моря

Исследования выполнялись с целью оценки влияния наблюдающегося подъема уровня Каспийского моря на положение поверхности грунтовых вод для прогнозирования возможного подтопления ряда промышленных и гражданских объектов прибрежной зоны.

Внешние границы исследуемой территории проходят на западе по административной границе с Россией, на юге – по северному склону гор Мангыстау и по контуру распространения водоносного горизонта четвертичных отложений. Северная, северо-восточная и восточная границы определялись исходя из возможного радиуса подпорного влияния Каспийского моря и располагаются на расстоянии 100 – 150 км от положения береговой линии моря до начала подъема в нем уровня воды. Этот период

соответствовал 1977 году. Юго-восточная граница модели проходит по западному чинку Устюрта.

Исследования предусматривали создание системы моделей отдельных участков территории. Это позволило учесть влияние Каспийского моря, потери воды из коммуникационных сетей, уменьшение испарения с поверхности грунтовых вод на застраиваемых территориях и другие факторы, оказывающие существенное воздействие на режим подземных вод на участках, приуроченных к зонам расположения важных промышленных и гражданских объектов.

Система состоит из трех компонент: базисной региональной модели территории масштаба 1:500000, модели низовьев р. Урал масштаба 1:200000 и модели подземных вод г. Атырау масштаба 1:10000. Внешние границы региональной модели задавались следующим образом: по контуру распространения четвертичного горизонта — граничные условия II-го рода с расходом, равным нулю, по остальным границам — граничные условия I-го рода. Инфильтрация атмосферных осадков и испарение грунтовых вод имитируются соответственно положительным или отрицательным площадным питанием. В пределах выделенной территории повсеместно распространены грунтовые воды, приуроченные к четвертичным отложениям. Взаимосвязь их с нижележащими водоносными комплексами практически отсутствует, поэтому на всех моделях гидрогеологические условия в разрезе были схематизированы в виде единого планового водоносного горизонта с непроницаемой нижней границей.

При решении *обратной стационарной задачи* на модели воспроизводились гидрогеологические условия на 1975г. В процессе решения уточнялись значения площадного питания и разгрузки, потоки по внешним границам I-го и II-го рода, фильтрационные свойства водовмещающих пород. Критерием завершения решения являлось совпадение отметок уровней подземных вод, замеренных по скважинам и полученных на модели. Результат решения показан на рис. 8.

В процессе решения обратной нестационарной задачи на системе моделей имитировался процесс затопления побережья в период с 1977 по 1992 г. В течение этого времени уровень Каспийского моря поднялся с -29 до -27.1 м.

На созданной и откалиброванной системе моделей была решена серия прогнозных задач. Наибольший интерес представляет прогноз возможного изменения гидрогеологических условий для варианта, предусматривающего дальнейший подъем уровня воды в Каспийском море: в 2000 г. — до -27 м; в 2010 г. — до -26.5 м; в 2020 г. — до -26 м. К концу прогнозного периода водами Каспийского моря будет затоплена обширная территория прибрежной зоны. Подпор подземных вод будет наблюдаться в узкой полосе, ширина которой не будет превышать 5 — 10 км. Анализ решения на модели гидрогеологических условий г. Атырау показал, что при изменении уровня воды в р. Урал от отметки -26.84 м в 1993г. до -26.5 м в

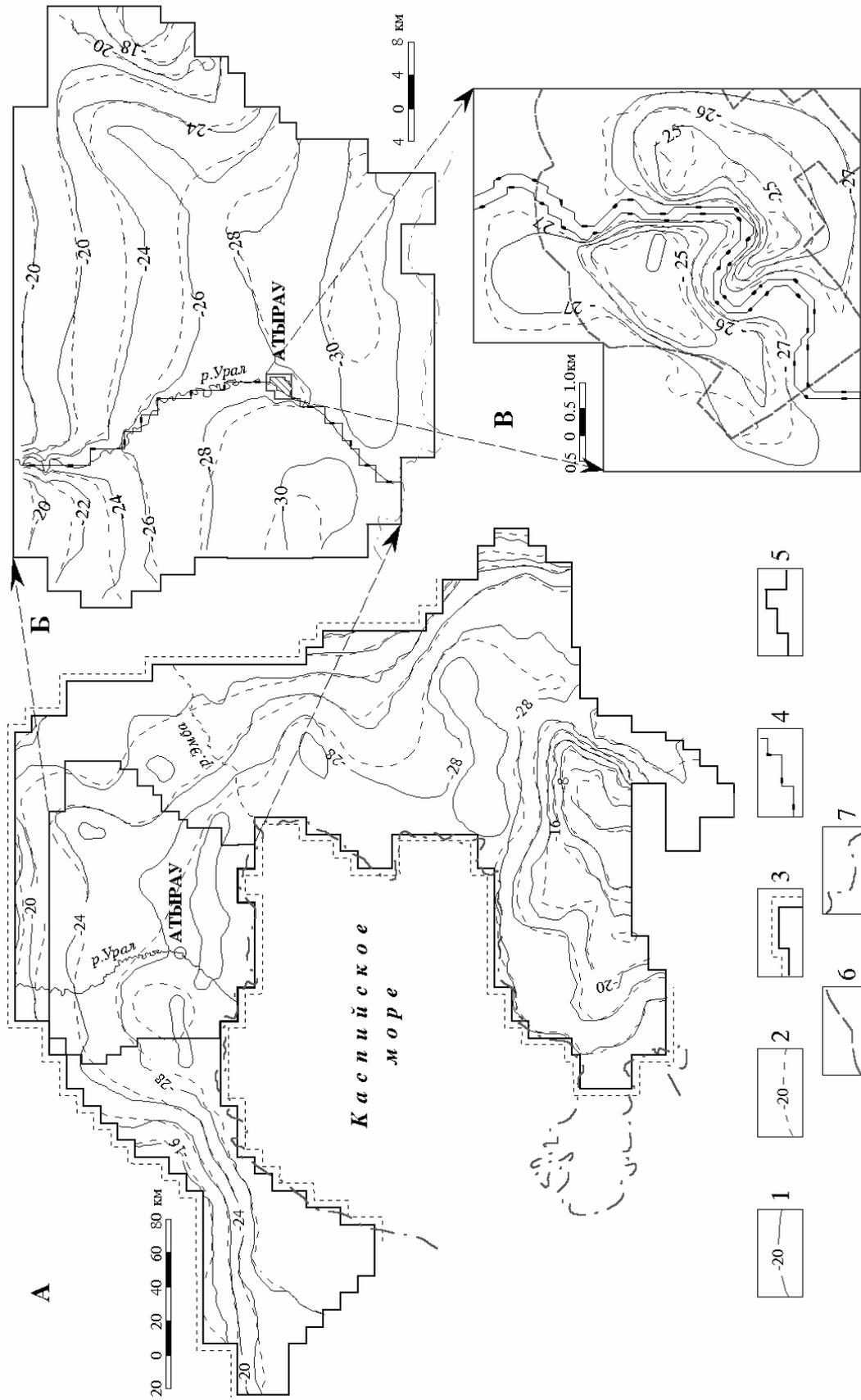


Рисунок 8 - Совмещенные карты гидроизогипс (результат решения обратной стационарной задачи):
 А - Казахстанской части побережья Каспийского моря, Б - низовьев р.Урал, В - района г.Атырау

2015г. и стабилизации инфильтрационного питания в черте города на уровне 1993 г. подъем подземных вод произойдет лишь в прирусловой зоне шириной до 200 м. Величина подъема уровня в 100 м от русла реки не превысит 0.5 м. На расстоянии 200 м эта величина будет составлять несколько сантиметров.

Результаты моделирования показали, что подъем уровня Каспийского моря не оказывает существенного влияния на режим грунтовых вод на территории г. Атырау. Он действует опосредованно через подпор уровня воды в р. Урал. Этот подпор оказывает влияние лишь в узкой приречной полосе. Краткосрочные нагоны также не оказывают существенного влияния на уровенный режим грунтовых вод, вызывая подъем уровня на расстоянии до 100 м от реки. Очевидно, что подпорные явления в грунтовых водах на территории города обусловлены в первую очередь процессами самоподтопления за счет утечки из водопроводных и канализационных сетей города, поливов зеленых насаждений и фильтрации из ирригационных каналов. Свою роль в процессе подтопления города играет, очевидно, ликвидация естественных и искусственных дренажных коллекторов.

Геоинформационно-математическое моделирование ртутного загрязнения подземных вод Павлодарского промышленного района выполнялось с целью оценки опасности загрязнения подземных вод ртутью для окружающей среды и разработки на основе полученных результатов рекомендаций по снижению риска. В процессе моделирования решались задачи многовариантного прогнозирования распространения ореола ртутного загрязнения подземных вод при условии реализации тех или иных мероприятий по демеркуризации на загрязненной территории и задача оценки запасов ртути в водоносном горизонте. Исследуемая территория расположена в пределах Павлодарского района Павлодарской области на правом берегу р.Иртыш. Источником ртути является цех по производству каустической соды и хлора, функционировавший на территории Павлодарского химического завода (АО “Химпром”) с 1975 по 1990гг. Ртуть попала в подземные воды в результате многочисленных аварий в цехе.

В пределах района работ получили распространение водоносный горизонт в аллювиальных современных отложениях поймы р.Иртыш (aQ_{IV}), водоносный горизонт в верхнечетвертичных отложениях первой надпойменной террасы (aQ_{III}) и водоносный комплекс в верхнемиоценовых нижне-среднеплиоценовых отложениях павлодарской свиты (N_{1-2pv}). Водопором для них являются глины калкаманской свиты неогена.

Формирование подземных вод района в естественных условиях осуществлялось преимущественно за счет инфильтрации атмосферных осадков и притока по внешним границам. Подземные воды современных, верхнечетвертичных отложений и отложений павлодарской свиты имеют хорошую гидравлическую связь между собой. Поток подземных вод, образующийся в отложениях павлодарской свиты частично разгружался в верхнечетвертичные отложения, а затем в пойму, которая дренировалась

рекой Иртыш. Разгрузка подземных вод происходила также в озерные котловины, путем испарения и в результате оттока по внешним границам. В 1970 г. начинается сброс сточных вод в Былкылдак, в 1972 г. с пуском ТЭЦ-3 активизируется работа золоотвала, с 1977 г. постепенно заполняется водой накопитель Сарымсак. В 1992 году заполняется водой магистральный канал, являющийся северной границей района работ, и начинается подача воды из р.Иртыш на поля орошения. Накопители, золоотвал и оросительная система становятся интенсивными источниками питания подземных вод. Мощный поток подземных вод, формирующийся в районе золоотвала в результате фильтрационных потерь через его дно технических вод проходит через территорию химического завода, загрязняется ртутью и переносит ее преимущественно в северо-северо-западном направлении. Моделирование выполнялось с помощью системы GMS 3.1. Для подготовки исходных данных была создана геоинформационная система (на MapInfo 5.0) и база первичных гидрогеологических данных (на FOXPRO 6.0).

Границами модели в плане на западе является р.Иртыш, на севере - магистральный оросительный канал. На востоке граница проходит по цепи озер. На модели они схематизированы граничными условиями первого рода. Юго-западная и юго-восточная границы модели проведены по линиям тока и схематизированы как непроницаемые. Озера Былкылдак, Сарымсак и Карабидаик схематизированы как внутренние границы первого рода. Разгрузка подземных вод в результате испарения имитируется граничными условиями третьего рода. Моделируемая область в плане аппроксимирована прямоугольной неравномерной сеткой размером $M*N = 99*82$, шаг которой изменяется от 50 до 250 м. Минимальный шаг выбран в районе основного источника ртутного загрязнения подземных вод (цеха №31 по производству каустической соды химического завода), максимальный – по периферии модели. Водовмещающие породы на исследуемой территории представлены песками с прослоями глин, не выдержанных по простиранию. В процессе схематизации моделируемая область в разрезе была представлена в виде пяти слоев с учетом особенностей ее литологического строения. Считалось, что режим фильтрации напорно-безнапорный.

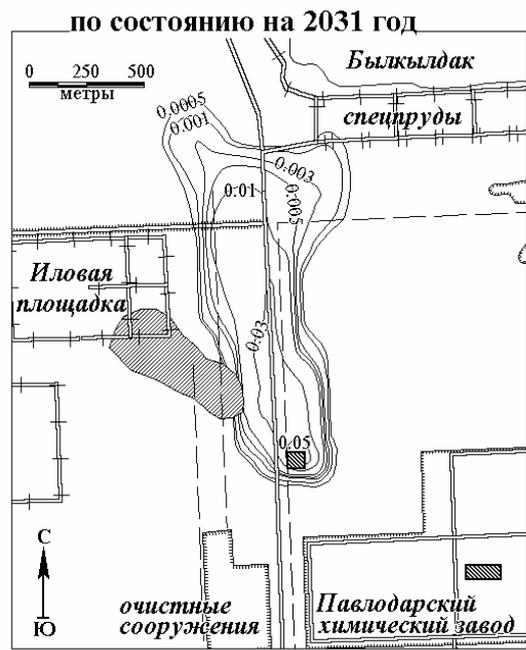
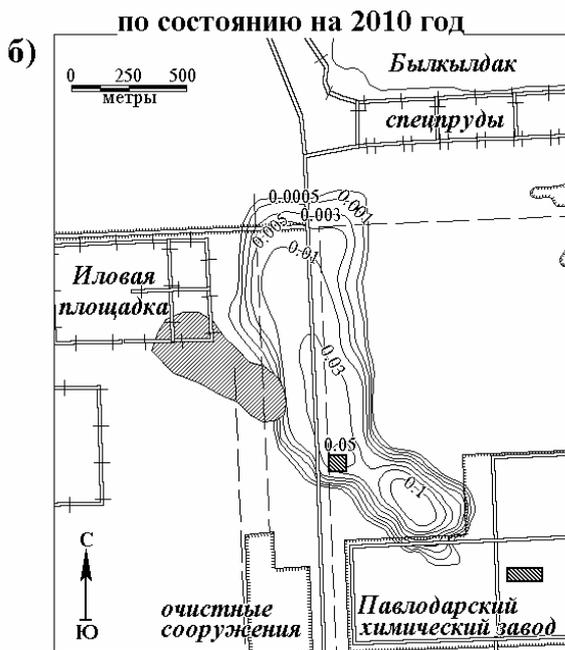
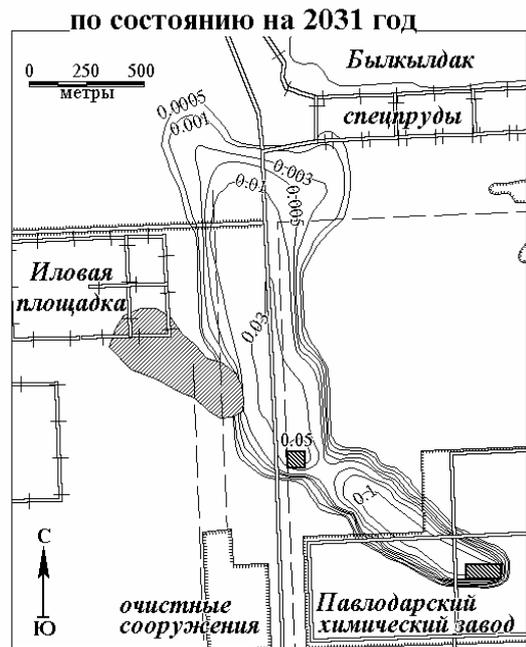
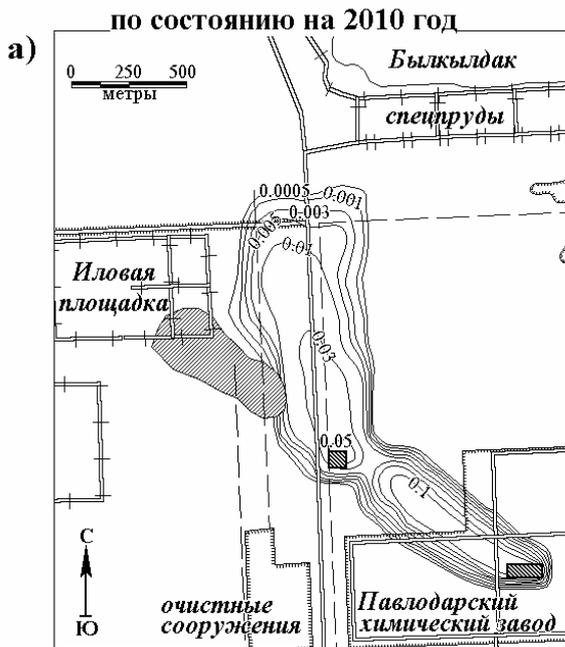
С целью доказательства адекватности модели природным условиям выполнялась ее калибровка, которая включала в себя решение обратной стационарной и обратной нестационарной задач.

Обратная стационарная задача решалась на 1970 г. В процессе ее решения на модели с использованием программы PEST подбирались коэффициенты фильтрации водовмещающих пород, инфильтрационное питание и величина испарения с поверхности подземных вод. Качество решения обратной задачи оценивалось по совпадению уровней, рассчитанных на модели, с замеренными по скважинам на момент времени, соответствующий ненарушенным условиям. Средняя арифметическая погрешность решения составляет порядка 0.01 м, средняя ошибка по абсолютной вели-

чине 0.35 м, средняя квадратичная ошибка 0.44 м, что в данном случае является допустимым и соответствует погрешности определения исходных данных.

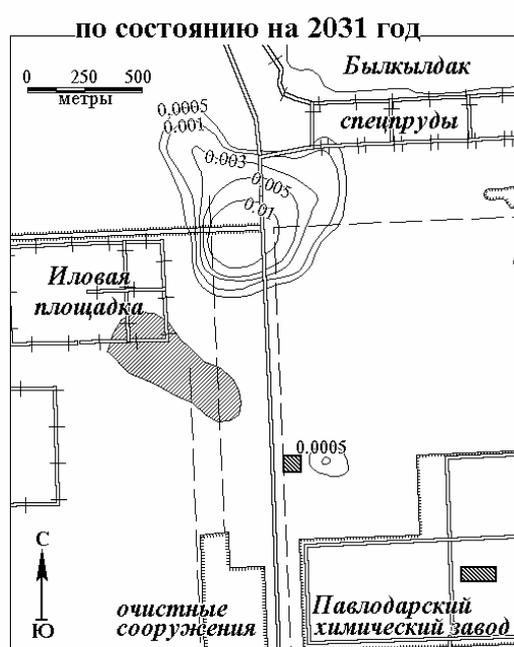
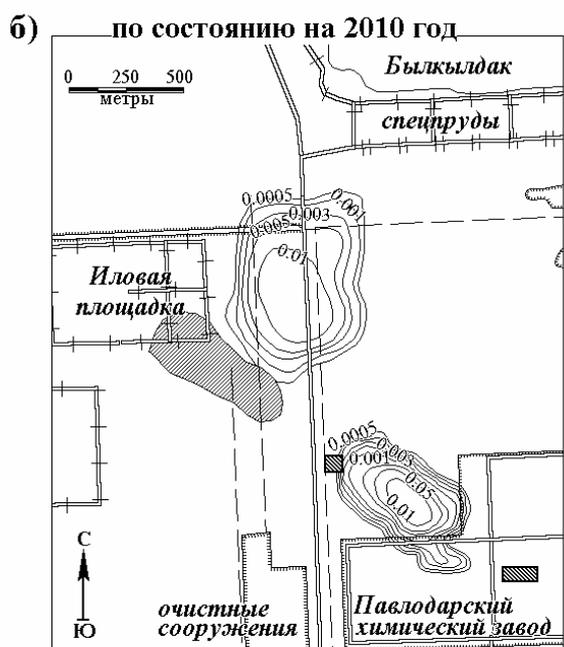
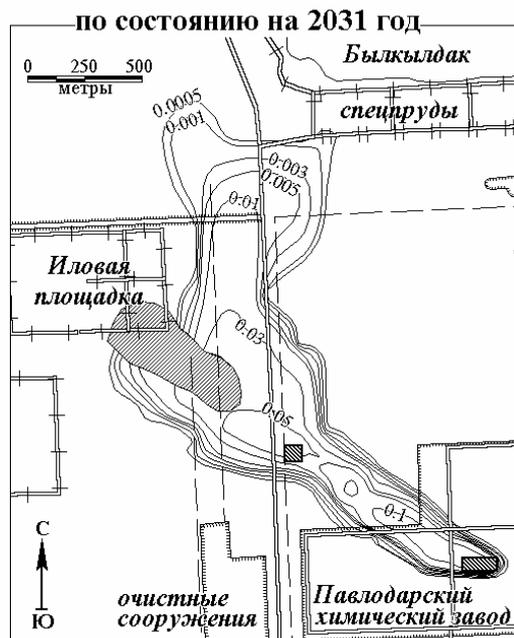
Обратная нестационарная задача решалась в два этапа. На первом этапе решалась нестационарная гидродинамическая задача. На втором – задача транспорта ртути потоком подземных вод.

В процессе решения обратной нестационарной гидродинамической задачи на модели подбирались значения упругой и гравитационной водоотдачи. Значение гравитационной водоотдачи для песков 0.22, для супесей и суглинков первого и второго от поверхности слоев 0.05. Упругая водоотдача пласта для всех напорных слоев равна 0.001 м^{-1} . Эти значения находятся в допустимых пределах и не противоречат данным, полученным в процессе проведения опытно-фильтрационных работ. Подбирались также величины инфильтрационного питания подземных вод за счет потерь технических вод на территории промышленных объектов, потери воды из коммуникаций. Правильность подбора контролировалась по совпадению рассчитанных на модели уровней с уровнями, замеренными по наблюдательным скважинам. На следующем этапе на модели было воспроизведено распространение ореола ртутного загрязнения подземных вод. Предполагалось, что имеется два основных источника – под цехом №31 с электролизерами и в районе насосной станции по перекачке сточных вод. Считалось, что ртуть в подземные воды начала поступать с 1975г., после пуска в эксплуатацию цеха №31. На модели источники были схематизированы граничными условиями первого рода. Подбор концентрации ртути в источниках в процессе решения позволил получить удовлетворительное совпадение рассчитанных на модели концентраций ртути с фактическими, определенными в результате проведенных лабораторных исследований. В целом можно считать, что качество решения обратной стационарной и нестационарной задач удовлетворительное. На модели в настоящее время выполнено четыре варианта прогноза сроком на 30 лет. Первый вариант предполагал сохранение существующих источников загрязнения. Второй - локализацию источника под цехом №31 с ртутными электролизерами, как это предусматривается программой по демеркуризации территории химзавода. По третьему варианту существующие гидрогеологические условия изменялись. Имитировалось прекращение подачи воды из Иртыша на северный промузел. В этом случае не будет потерь технических вод из магистральных водоводов. Это, в свою очередь, приведет к изменению направления потока подземных вод, а значит и к изменению направления перемещения ореола загрязнения их загрязнения. Четвертый вариант прогноза выполнялся при условии полной локализации двух основных источников, расположенных соответственно под цехом №31 и в районе насосной станции, осуществлявшей ранее перекачку ртутьсодержащих промстоков в накопитель Былкылдак. Результаты прогнозирования показаны на рис. 9-10.



1 - изолинии концентрации ртути, растворенной в подземной воде. Цифра - значение концентрации, мг/л. 2 - область отсутствия водоносного горизонта. 3 - канализационная сеть. 4 - основные источники загрязнения подземных вод ртутью.

Рисунок 9 - Результат решения задачи для различных вариантов прогноза: а) первый; б) второй



1 - изолинии концентрации ртути, растворенной в подземной воде. Цифра - значение концентрации, мг/л. 2 - область отсутствия водоносного горизонта. 3 - канализационная сеть. 4 - основные источники загрязнения подземных вод ртутью.

**Рисунок 10 - Результат решения задачи для различных вариантов прогноза:
а) третий; б) четвертый**

Видно, что по первому варианту к концу прогнозного периода ореол загрязнения увеличится и его длина составит порядка 2.8 км. Направление распространения – северо-северо-западное. По второму варианту ореол загрязнения на территории химического завода постепенно уменьшится и к концу прогнозного периода полностью исчезнет. Это произойдет в результате локализации источника под цехом (сооружения “стены в грунте”). Ореол загрязнения, распространяющегося от насосной станции и канализационных сетей, сохранится. Направление его распространения - северо-северо-западное. По третьему варианту в результате прекращения потерь воды на территории очистных сооружений изменится направление потока подземных вод и ореол ртутного загрязнения подземных вод отклонился к западу. Наибольший практический интерес представляет четвертый вариант прогноза. В настоящее время уже завершено строительство “стены в грунте” вокруг цеха №31 и начато ее сооружение вокруг насосной станции, осуществлявшей ранее перекачку ртутьсодержащих промстоков. Четвертый вариант имитирует локализацию двух этих основных источников ртутного загрязнения подземных вод. На рис. 10, отображающем результаты моделирования, видно, что к концу прогнозного 30-летнего периода ореол загрязнения, распространяющегося от цеха №31 в северо-западном направлении, значительно уменьшится (до 100 м в поперечнике). Содержание ртути в подземной воде снизится до 2 - 6 ПДК (ПДК ртути в питьевой воде составляет 0.0005 мг/л). Уменьшится и ореол загрязнения, распространяющегося от насосной станции и канализационных сетей. Его максимальная величина не будет превышать 1 км. Центр ореола будет располагаться примерно в 0.5 км юго-западнее спецпрудов. Максимальная концентрация ртути в центре ореола не превысит 15 - 20 ПДК

На созданной геоинформационной модели гидрогеологических условий северной части Павлодарского промышленного района был выполнен расчет запасов ртути, содержащихся в подземных водах. Границы толщи водовмещающих песчаных отложений, загрязненной ртутью, в плане проводились по изолиниям концентрации ртути, равным 0.0005 мг/л, т.е ПДК. Нижняя граница в разрезе проводилась по кровле первого локального водоупора, представленного глинами павлодарской свиты. Глубина кровли изменялась от 16 – 18 м на территории химического завода до 5 - 7 м в крайней северо-северо-западной части ореола ртутного загрязнения подземных вод (1.9 км на северо-северо-запад от цеха №31). Ореол загрязнения простирается от цеха №31 в северо-северо-западном направлении. Его длина – 1.9 км, максимальная ширина – 470 м. Площадь ореола составляет 0.65 км².

Расчет средневзвешенного значения гравитационной водоотдачи толщи водовмещающих песчаных отложений выполнялся по 32 картировочным скважинам. Расчетное значение гравитационной водоотдачи принималось для: крупнозернистых песков – 0.28; средне- и разномзернистых песков – 0.24; глинистых песков – 0.05. Суммарное содержание ртути, рас-

творенной в подземных водах, приуроченных к песчаным отложениям, залегающим выше первого от поверхности локального водоупора, составляет 24,2 кг.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы. Без значительного дополнительного вмешательства, способного неблагоприятно изменить существующие в настоящее время гидрогеологические условия в Северной части Павлодарского промышленного района, шлейф загрязнения подземных вод ртутью не представляет в ближайшие десятилетия угрозы реке Иртыш и жителям села Павлодарское. Изоляция основных источников ртути под цехом №31 и в районе бывшей насосной станции с помощью фильтрационной завесы типа “стена в грунте” остановит дальнейшее локальное загрязнение ртутью подземных вод.

ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований:

1. изучена предметная область гидрогеологических исследований и выполнено ее информационное моделирование;
2. сформулированы основные концепции применения геоинформационно-математического моделирования в гидрогеологических исследованиях;
3. разработана методика, технология и инструментальные средства геоинформационно-математического моделирования;
4. на основе разработанных подходов создан ряд баз данных, геоинформационных и математических моделей сложных гидрогеологических объектов Казахстана, выполнена их интеграция в единый автоматизированный комплекс.

Поставленные задачи исследований выполнены полностью. Полученные результаты могут быть использованы при создании геоинформационно-математических моделей гидрогеологических условий экологически неблагоприятных регионов Казахстана для решения задач, связанных с эксплуатацией подземных вод, защитой их от истощения и загрязнения, защитой инженерных сооружений от вредного воздействия подземных вод, а также при разработке аналогичных автоматизированных систем в смежных областях – гидрологии, геологии, географии и т.п. Разработки, выполненные автором, способствуют снижению трудоемкости моделирования гидрогеологических объектов, увеличению его информативности и в конечном счете – повышению качества получаемых результатов. Научно-технический уровень выполненной работы высокий, что подтверждается участием автора в нескольких международных проектах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. и др. Основные концепции, структура программно-математического и информационного обеспечения автоматизированной постоянно действующей модели гидро-

геологических условий региона // Проблемы гидрогеологии и охраны геологической среды Казахстана, Алма-Ата, 1990, С.185-199.

2. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. Геоэкоинформатика. Системно-информационный подход к задачам моделирования гидрогеологических объектов, Алма-Ата, 1991, 176с.

3. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. и др. Принципы организации математической модели рационального использования, управление эксплуатацией и охраны подземных вод бассейна Аральского моря // Экологические проблемы Казахстана (Доклады республиканского совещания), Алма-Ата, 1991, С.109-118.

4. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. и др. Теоретическое и методологическое обоснование математической модели Приаралья // Вестник АН КазССР, Алма-Ата, 1991, № 2, С.10-16.

5. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. и др. Изучение гидрогеологической обстановки Приаралья на математических моделях // Тезисы докладов семинара "Математическое моделирование гидрогеологических процессов", Душанбе, 1991, С.32-33.

6. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю., Гетман Т.Н. Автоматизированная технология моделирования гидрогеолого-мелиоративных условий на постоянно действующей модели // Научные приборы и автоматизация научных исследований, Алма-Ата, 1992, С.171-179.

7. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. О создании системы математических эколого-гидрогеологических моделей казахстанской части Приаралья // Условно-корректные задачи математической физики и анализа, Новосибирск, 1992, С.124-125.

8. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. Информационные аспекты эколого-гидрогеологического мониторинга в Приаралье // Медицинские, социальные и экологические проблемы Приаралья, Алма-Ата, 1992, С.106-107.

9. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. К вопросу о создании математических моделей гидрогеологических условий экологически нарушенных регионов Казахстана // Материалы научной и учебно-методической конференции, посвященной 60-летию юбилею кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, Алма-Ата, 1992, С.29-30.

10. Веселов В.В., Сыдыков Ж.С., Паничкин В.Ю. и др. Решение эколого-гидрогеологических проблем в бассейнах Арала и Каспия методами математического моделирования // Тезисы Международного симпозиума "Водные ресурсы Центральной Азии и охрана окружающей среды", Китай, г. Урумчи / Казахстан, г. Алматы, 14-15 октября 1993 г., С.51-52.

11. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. Прогноз развития подтопления населенных пунктов на побережье Каспийского моря // Тезисы докладов Республиканского семинара "Опыт устранения подтопления в городах и населенных пунктах Казахстана", Алматы-Шымкент, 1993, С.11-12.

12. Веселов В.В., Винникова Т.Н., Калмыкова Н.В., Паничкин В.Ю. Исследование гидродинамических процессов формирования подземных вод Приаралья на региональных математических моделях // Геология и разведка недр Казахстана, Алматы, 1995, №2, С.31-36.

13. Веселов В.В., Мирлас В.М., Паничкин В.Ю. Прогноз уровня грунтовых вод под влиянием подпора со стороны Каспийского моря (методом математического моделирования) // Каспийское море и его прибрежная зона (природные условия и экологическое состояние), Алматы, 1995, С.84-90.

14. Веселов В.В., Спивак Л.Ф., Паничкин В.Ю. Структурное моделирование гидрогеологических условий восточного Приаралья // Материалы Международной конференции “Актуальные проблемы математики и математического моделирования экологических систем”, посвященной 60-летию академика Султангазина Умирзака Махмутовича (3-5 октября 1996), Алматы, 1996, С.26-28.

15. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Создание системы автоматизированного мелиоративного кадастра в Казахстане // Тезисы научно-технической конференции “Гидрогеолого-мелиоративной службе Казахстана 25 лет”, Алматы-Шымкент, 1996, С.18-19.

16. Веселов В.В., Паничкин В.Ю. Геоинформационные системы – основа эколого-гидрогеологического мониторинга регионов Казахстана // Сборник статей конференции “Промышленная экология и охрана экосистем”, Алматы, 1997, С.1-7.

17. Шакибаев И.И., Ляшенко И.И., Диссель Н.А., Паничкин В.Ю. и др. Руководство по Информационному обеспечению Мониторинга орошаемых земель, Астана, 1998, 32 с.

18. Веселов В.В., Паничкин В.Ю. Изучение гидрогеологических условий Приаралья с использованием компьютерных технологий // Материалы международной научно-практической конференции “Проблемы вычислительной математики и информационных технологий” (25-26 марта 1999 г.), Алматы, 1999, С.143.

19. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. ГИС-технологии в гидрогеологическом моделировании // Материалы международной научно-практической конференции “Проблемы вычислительной математики и информационных технологий” (25-26 марта 1999 г.), Алматы, 1999, С.144.

20. Веселов В.В., Махмутов Т.Т., Паничкин В.Ю. и др. Подземные воды Приаралья (состояние и перспективы использования) // Минералогия и перспективы развития минерально-сырьевой базы, Алматы, 1999, часть 1, С.181-196.

21. Веселов В.В., Паничкин В.Ю. Автоматизированная информационная система гидрогеологических условий Приаралья // Труды Международного симпозиума посвященного 100-летию со дня рождения К.И.Сатпаева “Академик К.И.Сатпаев и его роль в развитии науки, образо-

вания и индустрии в Казахстане” (7-8 апреля 1999 г.), Алматы, 1999, часть 1, С.269-272.

22. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Формирование математических моделей гидрогеологических объектов с использованием ГИС-технологий // Труды Международного симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения К.И.Сатпаева “Академик К.И.Сатпаев и его роль в развитии науки, образования и индустрии в Казахстане” (7 - 8 апреля 1999 г.), Алматы, 1999, часть 1, С.272-274.

23. Веселов В.В., Паничкин В.Ю. Геоинформационное и математическое моделирование гидрогеологических условий Восточного Приаралья // Геодинамика и минерагения Казахстана, Алматы, 2000, часть 2, С.179-190.

24. Паничкин В.Ю. Геоинформационно-математическое моделирование гидрогеологических процессов при решении водохозяйственных и экологических проблем Казахстана // Геология Казахстана, Алматы, 2001, №2, С.86-97.

25. Паничкин В.Ю. Разработка систем геоинформационно-математического моделирования в Казахстане // Доклады Национальной Академии наук Республики Казахстан, Алматы, 2001, №2, С.47-53.

26. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Решение обратных гидрогеологических задач на основе экспертного подхода и ГИС-технологий // Труды международной конференции “Молодые ученые-10-летию независимости Казахстана”, Алматы, 2001, С.58-61.

27. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. ГИС-технологии в гидрогеолого-мелиоративных исследованиях // Геология Казахстана, Алматы, 2002, №1, С.96-103.

28. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Лушин Э.Н. Исследование ртутного загрязнения подземных вод в северной части Павлодарского промрайона // Труды международной научно-практической конференции “Естественно-гуманитарные науки и их роль в подготовке инженерных кадров”, Алматы, 2002, С.173-178.

29. Паничкин В.Ю. Геоинформационно-математическое моделирование гидрогеологических условий Павлодарского промрайона // Труды международной научно-практической конференции “Естественно-гуманитарные науки и их роль в подготовке инженерных кадров”, Алматы, 2002, С.334-337.

30. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Геоинформационно-математическое моделирование подземных водных ресурсов Восточного Приаралья // Сборник материалов Пятого Международного конгресса “ЭКВАТЭК-2002. Вода: экология и технология” (4-7 июня 2002 г.), Москва, 2002, С.192.

31. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Геоинформационные технологии в гидрогеологических исследованиях в Казахстане // Сборник материалов Пятого Международного конгресса “ЭКВАТЭК-2002.

Вода: экология и технология“ (4-7 июня 2002 г.), Москва, 2002, С.193.

32. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Применение экспертного подхода и ГИС-технологий при создании и идентификации математических моделей гидрогеологических объектов Казахстана // Сборник материалов Пятого Международного конгресса “ЭКВАТЭК-2002. Вода: экология и технология“ (4-7 июня 2002 г.), Москва, 2002, С.241.

33. Паничкин В.Ю. Геоинформационно-математическое моделирование ртутного загрязнения подземных вод Павлодарского промрайона // Геология Казахстана, Алматы, 2002, №6, С.66-72.

34. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Автоматизированная калибровка моделей гидрогеологических объектов // Геология Казахстана, Алматы, 2002, №6, С.73-80.

35. Panichkin V. Geoinformational-mathematical simulation of mercury pollution of groundwaters of Pavlodar industrial region // Proceedings of the Second International Conference on Ecological Chemistry, October 11-12, 2002, Chisinau, Moldova. P.323.

36. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Опыт применения автоматизированных технологий в гидрогеологическом моделировании // Известия НАН РК. Серия геологическая, Алматы, 2003, №3, С.117-124.

37. Тантон Т.В., Веселов В.В., Илющенко М.А., Паничкин В.Ю. Оценка уровня риска, вызванного ртутным загрязнением северной промышленной зоны города Павлодара // Доклады Национальной Академии наук Республики Казахстан, Алматы, 2003, № 4, С.78-81.

38. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Захарова Н.М. и др. Геоинформационно-математическая модель Восточного Приаралья // Сборник материалов Международной конференции “Математическое моделирование экологических систем“, 9-12 сентября 2003, Алматы, С.93.

39. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Использование ГИС-технологий в процессе моделирования ртутного загрязнения подземных вод Павлодарского промрайона // Сборник материалов Международной конференции “Математическое моделирование экологических систем“, 9-12 сентября 2003, Алматы, С.94.

40. Паничкин В.Ю. Развитие, совершенствование методов и средств гидрогеологического моделирования // Известия НАН РК. Серия геологическая, Алматы, 2003, №4, С.86-97.

41. Паничкин В.Ю. Методика, технология и результаты моделирования ртутного загрязнения подземных вод Павлодарского промрайона // Известия НАН РК. Серия геологическая, Алматы, 2003, №5, С.117-124.

42. Паничкин В.Ю. Геоинформационно-математическая модель ртутного загрязнения подземных вод Павлодарского промрайона // Доклады Национальной Академии наук Республики Казахстан, Алматы, 2003, № 6, С.89-97.

ТҮЙІН

Зерттеудің объектісі гидрогеологиялық объектілерді модельдеу процесі болып табылады.

Жұмыстың мақсаты – күрделі гидрогеологиялық жүйелердің теориялық-әдістемелік негіздерін жасау және дамыту, сондай-ақ Қазақстанда гидрогеологиялық зерттеулерде қазіргі заманғы ақпараттық технологияларды пайдалану концепциясын қолдану.

Зерттеу жүргізу кезінде жүйелік талдау, жіктеу теориялары, геоақпараттық жүйелер теориялары, мәліметтер базасы теориялары, имитациялық модельдеу, гидрогеологиялық міндеттерді сандық шешу **әдістері** қолданылды.

Орындалған жұмыстардың нәтижесінде:

1. гидрогеологиялық зерттеулердің мәндік аясы зерттелді, оның ақпараттық моделі жасалды. Ақпараттық модельдеудің жасалған әдістемесі бірінші кезеңде қосымша саласында сөзбен сипаттама жасауды, екінші кезеңде Д.Росстың жасаған SA тілін пайдалана отырып, автоматтандырылған функцияларға қойылатын талаптарды анықтау қарастырылған. Автоматтандырылған жүйелерде сақталып, өңделуге тиіс мәліметтердің ақпараттық моделін бөлшектегенде туынды құрылымдар ретінде объектілерді пайдалана отырып процесстен тыс амал қолданылады;
2. гидрогеологиялық зерттеулерде геоақпараттық-математикалық модельдеуді қолданудың негізгі концепциялары жасалды. Сәйкес түрде құрылымдалған және құрылымдалмаған символды ақпарат байланысатын геокөріністердің алуан типтерін бірігіп пайдалану геоақпараттық модельдеудің негізгі принципі болып табылады. Геологиялық объекті толық және жан-жақты суреттеу кешенді геоақпараттық-математикалық модельдерді қамтамасыз етеді. Геоақпараттық модельдеу әртүрлі масштабтағы және кеңісті қамтуы әртүрлі болатын модельдерді құруды және бірге қолдануды болжайды. Әртүрлі типті геоақпараттық модельдер бірігей картографиялық негізде құралады. Аралдарында мәліметтер алмасу құралатын мәліметтер базасымен және математикалық модельдеу жүйелерімен интеграцияланған геоақпараттық жүйелер гидрогеологиялық зерттеулерде геоақпараттық-математикалық модельдеу принциптерін жүзеге асыра алатын бағдарламалық кешеннің негізгі құрама бөлшектері болып табылады;
3. геоақпараттық-математикалық модельдеудің әдістемесі, технологиясы мен құралдық амалдары жасалды. Геоақпараттық-математикалық модельдеудің негізгі принциптерін жүзеге асыратын құралдар кешенінің құрамына MapInfo 5, FOXPRO 6.0 және GMS 3.1. бағдарламалары жатады. Олар графикалық және семантикалық мәліметтер базасын, гидрогеологиялық объектілерді, математикалық объектілерді құру және жүргізу функцияларын орындайды, сондай-ақ модельдерде қамтылған гидрогеологиялық міндеттерді шешуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ негізгі құрама жүйелердің арасындағы мәліметтер алмасуды қамтамасыз ететін арнайы жасалған сервистік құралдардың жиынтығы және сыртқы-ішкі пайдаланушыларға

анықтамалық- ақпараттық қызмет көрсету мәселелерін шешетін бағдарламалар бар;

4. жасалған амалдардың негізінде бірнеше мәліметтер базасы, Қазақстан Республикасының күрделі гидрогеологиялық объектілерінің геоақпараттық және математикалық модельдері жасалды, бірегей автоматтандырылған кешенге олардың интеграциясы орындалды. Модельдеу әдісі арқылы Шығыс Арал өңірінің жер асты суларының пайдалану қорларын бағалау, жер асты суларын таңдаудың әртүрлі көлемдеріне арналған гидрогеологиялық жай-күйлердің өзгеруін жорамалдау, Каспий теңізі жағалауының Қазақстандық бөлігіндегі судың әртүрлі деңгейлері үшін гидрогеологиялық жай-күйлердің өзгеруін жорамалдау, Павлодардың өнеркәсіп ауданының солтүстік бөлігіндегі жер асты суларының сынаппен ластану ореолының таралуының көп варианттар болжамдары оларда алынған негізгі ғылыми нәтижелер болып табылады.

Жұмыстың негізгі сипаттамасы. Құралды амалдардың жасалған кешенінің құрамына келесілер кіреді: MapInfo 5.0 негізінде жүзеге асырылған геоақпараттық жүйе; FoxPro 6.0 жасалған алғашқы гидрогеологиялық мәліметтер базасы; GMS 3.1 модельдеу жүйесі; кешеннің негізгі құрамаларының арасында мәліметтер алмасуды қамтамасыз ететін, сервистік бағдарламалар.

Теориялық жұмыстар, әдістеме, технология мен құралды амалдар **ҚР БҒМ Гидрология және гидрофизика институтында** енгізілген және Шығыс Арал өңірінің, Каспий теңізі жағалауының Қазақстандық бөлігінің, Павлодардағы өнеркәсіп ауданының гидрогеологиялық жай-күйлерін модельдеу процесінде пайдаланылады.

Қолданылу аясы. Алынған нәтижелер жер асты суларын пайдаланумен, оларды құрғап кетуден және ластанудан қорғаумен, инженерлік имараттарды жер асты суларының зиянды әсерінен қорғаумен байланысты мәселелерді шешу үшін Қазақстанның экологиялық қолайсыз аймақтарының гидрогеологиялық жай-күйлерін геоақпараттық-математикалық модельдерін жасау кезінде, сондай-ақ аралас салаларда-гидрология, геология, география, т.б. ұқсас автоматтандырылған жүйелерін жасау кезінде қолданылуы мүмкін.

Экономикалық тиімділігі. Осы жұмысты орындау көп тер төгуді қажет ететін гидрогеологиялық объектілерді модельдеудің жұмысын жеңілдетеді, оның ақпараттылығын ұлғайтады, ең соңында, алынған нәтижелердің сапасын жоғарылатуға көмектеседі.

Зерттеу объектісінің дамуы туралы болжамдар. Гидрогеологиялық объектілерді модельдеу саласындағы бұдан былайғы зерттеулер геоақпараттық-математикалық модельдеудің құралды амалдарын жақсарту, олардың функциялық мүмкіндіктерін жақсарту, дистанциялық барлап қарау жүйелерімен және мониторингтік жүйелермен интеграциялау бағытында ұсынылуы мүмкін.

SUMMARY

The object of investigation is the process of mathematical modeling of hydro-geological objects.

The purpose of study is development and improvement of theoretical and methodological basics of modeling of complex hydro-geological systems as well as concept of application of modern information technologies in hydro-geological studies in Kazakhstan.

Investigation involved following **methods**: systems analysis, theory of classification, theory of geoinformation systems, theory of databases, methods of simulation and numerical resolution of hydro-geological problems.

The results of completed works are as following:

1. The subject domain of hydro-geological investigations had been studied and information modeling thereof had been executed. The developed technique of information modeling provides at its first stage the composition of verbal description of application domain, at second stage – clarification of requirements to the functions, which shall be automated, by means of SA language developed by D. Ross. At further detailing of information model of data, which shall be stored and processed in automated systems, the non-process approach is applied with involving of objects as original constructions;
2. Main conceptions of geoinformation and mathematical modeling application in hydro-geological investigations had been formulated. Main principle of geoinformation modeling is joint use of different type of geoimages, which is properly associated with structured and non-structured symbolic information. Complex geoinformation and mathematical models provide most full and comprehensive reflection of the hydro-geological object. Geoinformation modeling assumes formation and joint use of models of different scales and spatial coverage. Multi-type models are being formed on the same mapping basis. Main components of the software package, which is capable to realize the principles of geoinformation and mathematical modeling in hydro-geological investigations, are the geoinformation systems integrated with databases and systems of mathematical modeling with data exchange arranged between them;
3. The methodology, technology and tools of geoinformation and mathematical modeling had been developed. Tool package, which is capable to realize the principles of geoinformation and mathematical modeling, includes the following software: MapInfo 5, FOXPRO 6.0 and GMS 3.1. They execute the functions of creation and maintaining of the graphic and semantic databases, mathematical models of the hydro-geological objects; also they allow solving the conceptual hydro-geological problems on the models. Additionally there is a set of service tools, which provide the data exchange between main components of the system, and the programs, which execute the functions of the reference-information servicing of internal and external users of the system.

4. Based on the developed approaches the set of databases and geoinformation and mathematical models of complicated hydro-geological objects of Kazakhstan had been developed as well as integration thereof into the unified automated complex. Main scientific results obtained from mentioned above set are modeling method-based assessments of production reserves of the ground waters of the East Priaral and forecasting of changes in hydro-geological conditions for different rates of the ground waters withdrawal, as well as forecast of changes in hydro-geological conditions at Kazakhstan sector of the Caspian Sea coast for its different water levels, multi-variant forecasts of distribution of mercury pollution area in the ground waters in the north part of the Pavlodar industrial region.

Main Specifications of the Package

The developed tool package includes the following software: geoinformation system based on MapInfo 5, primary hydro-geological database based on FOXPRO 6.0 and modeling system GMS 3.1; service tools, which provide the data exchange between main components of the package.

Theoretical designs, methodology, technology and tools have been implemented in the Institute of Hydro-Geology and Hydro-Physics under the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan. Also they have been applied in modeling of hydro-geological conditions of the East Priaral, Kazakhstan sector of the Caspian Sea coast, the Pavlodar industrial region.

Scope of Application

Obtained results may be applied while creating the geoinformation and mathematical models of hydro-geological conditions of environmentally unfavourable regions of the Republic of Kazakhstan with the purpose to solve problems related to exploitation of the ground waters and protection thereof against desiccation and pollution, protection of engineering structures against harmful effect of the ground waters, as well as while developing of similar automated systems in allied spheres – hydrology, geology, geography, etc.

Economic Effectiveness

Executed developments promote decreasing of labour-intensiveness of the modeling of hydro-geological objects, increasing of self-descriptiveness and ultimately in increasing of the quality of results being obtained.

Assumptions about Development of Subject being Investigated

Further investigations in the sphere of modeling of hydro-geological objects may be continued in direction of improvement of tools of geoinformation and mathematical modeling, expansion of their functionalities, integration with remote sensing systems and monitoring systems.