

УДК 501.76.556.3.013.01(574.5)

На правах рукописи

Мирошниченко Оксана Леонидовна

**СОЗДАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКСПЕРТНОГО ПОДХОДА**

Специальность: 25.00.07 – Гидрогеология

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Алматы 2004

Работа выполнена в Институте гидрогеологии и гидрофизики им.У.М.Ахмедсафина Министерства образования и науки Республики Казахстан

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
академик НАН РК **В.В.Веселов**

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Л.Ф.Спивак

доктор геолого-минералогических наук,
член-корр. АМР РК **В.И.Порядин**

Ведущая организация: Казахский Национальный технический
университет им.К.И.Сатпаева.

Защита состоится « 30 » апреля 2004 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д.53.13.01 Института гидрогеологии и гидрофизики им.У.М.Ахмедсафина Министерства образования и науки Республики Казахстан по адресу: 480100, Алматы, ул.Валиханова, 94.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института гидрогеологии и гидрофизики Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Автореферат разослан «_____» _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
кандидат геол.-мин. наук



Бураков М.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Большая часть территории Казахстана расположена в аридной зоне, в условиях дефицита поверхностных водных источников. Проблема снабжения населения качественной питьевой водой во многих регионах стоит особенно остро. Одним из путей ее решения является более широкое использование подземных вод. В процессе их поиска, оценки запасов, прогнозирования возможных последствий водоотбора на окружающую среду и решении ряда других прикладных задач используются методы математического моделирования. Важнейшим этапом моделирования является создание модели и ее идентификация, т.е. обоснование адекватности модели природным условиям. Для этого на модели решается серия обратных задач. Это достаточно трудоемкая процедура, требующая больших затрат времени. В связи с этим исследования по автоматизации процессов создания математических моделей гидрогеологических объектов и их идентификации являются весьма актуальными.

Цель работы. Автоматизация формирования математических моделей гидрогеологических объектов и их идентификации на основе применения экспертного подхода и ГИС-технологий с использованием методов оптимального управления.

Основные задачи исследования.

1. Анализ известных методов создания математических моделей геофильтрации и различных подходов к их идентификации, известных примеров использования геоинформационных систем в гидрогеологических исследованиях.
2. Разработка методики применения экспертного подхода и геоинформационных систем в процессе создания математических моделей геофильтрации и их идентификации.
3. Разработка инструментальных средств автоматизированного формирования математических моделей гидрогеологических объектов и их идентификации.
4. Разработка технологии применения экспертного подхода и геоинформационных систем в процессе создания математических моделей геофильтрации и их идентификации.
5. Апробация разработанной методики, технологии и инструментальных средств на примере создания и идентификации математической модели гидрогеологических условий Павлодарского промрайона.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы гидрогеологического районирования и стратификации, экспериментальных определений основных гидрогеологических параметров, основные положения системного и структурного анализа, математического моделирования, теории баз данных и геоинформационных систем, теории классификаций, теории

оптимального управления, теории численных методов решения дифференциальных уравнений.

Научная новизна.

- Разработаны методика и технология решения гидрогеологических задач с использованием ГИС-технологий и экспертного подхода.
- Разработаны и адаптированы инструментальные средства для автоматизированного формирования и калибровки математических моделей гидрогеологических объектов и процессов.
- Создана математическая модель трехмерного конвективно-диффузионного переноса ртути потоком подземных вод Павлодарского промрайона.

Защищаемые положения.

- Разработанные методика и технология решения гидрогеологических задач с использованием ГИС-технологий и экспертного подхода, позволившие автоматизировать процесс формирования математических моделей гидрогеологических объектов и процессов, а также их идентификацию.
- Созданный комплекс инструментальных средств гидрогеологического моделирования, включающий геоинформационную систему, систему управления базами семантических гидрогеологических данных, а также ряд сервисных программ для автоматизированного формирования и калибровки моделей.
- Математическая модель гидрогеологических условий Павлодарского промрайона, имитирующая процесс трехмерного конвективно-диффузионного переноса ртути потоком подземных вод.

Практическая ценность работы. Разработанная технология существенно снижает трудоемкость создания моделей гидрогеологических объектов и процессов, а также позволяет выполнить их калибровку с большей точностью. Это способствует повышению достоверности прогнозов, получаемых в результате моделирования.

На основе разработанных методики, технологии и комплекса инструментальных средств создана математическая модель гидрогеологических условий Павлодарского промрайона, имитирующая процесс трехмерного конвективно-диффузионного переноса ртути потоком подземных вод. Модель использована для оценки угрозы ртутного загрязнения подземных вод, эксплуатируемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения, и разработки мероприятий по снижению риска.

Реализация работы. Разработанная методика и технология решения задач создания и идентификации математических моделей геофильтрации на основе экспертного подхода и ГИС-технологий была успешно реализована в Институте гидрогеологии и гидрофизики

им.У.М.Ахмедсафина в процессе создания модели ртутного загрязнения подземных вод Павлодарского промрайона.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на:

- научно-технической конференции «Гидрогеолого-мелиоративной службе Казахстана 25 лет», Алматы-Шымкент, 1996;
- международной научно-практической конференции «Проблемы вычислительной математики и информационных технологий», Алматы, 1999;
- международном симпозиуме, посвященном 100-летию со дня рождения К.И.Сатпаева «Академик К.И. Сатпаев и его роль в развитии науки, образования и индустрии в Казахстане», Алматы, КазНТУ, 1999;
- международной конференции «Молодые ученые – 10-летию независимости Казахстана», Алматы, КазНТУ, 2001;
- международном научном симпозиуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 2001;
- международной научно-практической конференции «Естественно-гуманитарные науки и их роль в подготовке инженерных кадров», Алматы, КазНТУ, 2002;
- пятом международном конгрессе «ЭКВАТЭК-2002. Вода: экология и технология», Москва, 2002;
- второй международной конференции по экологической химии, Кишинев, Молдова, 2002;
- международной конференции «Математическое моделирование экологических систем», Алматы, 2003.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 15 работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка использованных источников, включающего 117 названий. Работа изложена на 106 страницах машинописного текста, иллюстрированного 15 рисунками.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, академику НАН РК, доктору технических наук, профессору В.В.Веселову, ведущему научному сотруднику Института гидрогеологии и гидрофизики МОН РК, кандидату технических наук В.Ю.Паничкину и всему коллективу лаборатории моделирования и гидродинамики Института гидрогеологии и гидрофизики МОН РК за помощь, оказанную в процессе написания работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, определяется цель и задачи исследования, обосновывается актуальность темы исследования, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, формулируются основные защищаемые положения.

В первой главе приводится описание предметной области гидрогеологии с точки зрения системного подхода, рассматриваются математические модели, используемые в практике гидрогеологических исследований и известные методы их создания, приводится классификация и методы решения обратных задач, используемых в процессе калибровки гидрогеологической модели.

Развитие в последние годы средств вычислительной техники сделало математическое моделирование одним из ведущих методов гидрогеологических исследований. Методологическим вопросам создания и идентификации моделей геофильтрации посвящены исследования Ф.Б.Абуталиева, В.В.Веселова, И.К.Гавич, И.Е.Жернова, Л.Лукнера, В.М.Шестакова, В.А.Мироненко, С.М.Шапиро, Н.С.Огняника, Е.А.Ломакина, И.И.Крашина, В.М.Мирласа, В.Ю.Паничкина, Б.А.Некрасова, Т.Н.Винниковой, В.П.Степаненко и др.

Гидрогеологическое районирование является основой для создания математической модели. Вопросам гидрогеологического районирования в Казахстане посвящены работы У.М.Ахмедсафина, Ж.С.Сыдыкова, В.В.Веселова, С.М.Мухамеджанова, М.Х.Джабасова и др.

Основной проблемой, возникающей в процессе создания моделей гидрогеологических объектов и процессов и их калибровки, является слабая формализуемость предметной области. Это вызвано тем, что гидрогеологический объект имеет довольно сложную структуру и подвержен влиянию множества различных факторов природного и техногенного характера. Кроме того, имитируемые процессы недоступны непосредственному наблюдению, и свойства исследуемого объекта определяются лишь в отдельных точках, причем часто эпизодически и со значительными погрешностями. Как правило, изученность гидрогеологического объекта неравномерна по площади распространения. Выявленные закономерности изменения свойств в пространстве часто имеют сложный характер. Возможна неоднозначная трактовка исходных данных в процессе построения карт, разрезов и т.д.

Поэтому моделирование гидрогеологических объектов имеет ряд специфических особенностей. Для установления соответствия модели природным условиям проводится ее калибровка, которая обычно заключается в решении серии обратных задач. Такие задачи являются, как правило, математически некорректными, т.е. нарушаются условия существования и единственности решения, его непрерывной зависимости от входных данных. Вопросы решения обратных задач рассматриваются в работах А.Н.Тихонова, М.М.Лаврентьева, А.А.Самарского, В.Я.Арсенина, О.М.Алифанова, Ф.П.Васильева, А.М.Федотова, П.Эйкхоффа, Й.Барда, Г.М.Вайникко, В.А.Морозова, М.К.Гавурина, В.Г.Романова, А.В.Гончарского и др. Особенности их решения в процессе гидрогеологического моделирования освещены в трудах И.К.Гавич. Как

показывает проведенный анализ публикаций, наиболее приемлемыми в процессе

калибровки гидрогеологических моделей являются методы оптимального управления. Их применение связано с обязательным заданием множества критериев и ограничений - динамических, диагностических, физического правдоподобия, которые определяются экспертом. Правильность задания таких критериев зависит в основном от квалификации эксперта, поскольку он вынужден использовать не только прямую, но и косвенную информацию об объекте вследствие неполноты и некоторой неточности, а иногда и противоречивости исходных данных. Некоторые аспекты применения экспертного подхода в процессе гидрогеологического моделирования рассматриваются в трудах И.К.Гавич, В.В.Веселова, Е.П.Вострокнутова.

Во второй главе рассматривается применение геоинформационных систем в гидрогеологических исследованиях; дается определение экспертному подходу и способам его проведения в процессе гидрогеологического моделирования.

В настоящее время особое место в практике гидрогеологических исследований занимают геоинформационные системы. Различные аспекты их создания рассматриваются в работах В.В.Веселова, Э.А.Закарин, Л.Ф.Спивака, В.Ю.Паничкина, А.М.Берлянта, И.Г.Гомберга, Н.В.Коноваловой, Е.Г.Капралова, Е.А.Полшкова, А.А.Карасева и др. Концепции геоинформационно-математического моделирования гидрогеологических объектов рассматриваются в работах В.В.Веселова, В.Ю.Паничкина и др.

В процессе гидрогеологического моделирования обычно выделяют три основных этапа (И.К.Гавич, 1980):

- анализ и схематизация гидрогеологических условий;
- формирование и идентификация математической модели;
- использование модели для решения тех или иных содержательных задач.

На каждом этапе построения модели используется большой объем разнородной информации об объекте моделирования в виде карт, построенных в различных проекциях, разного содержания и масштаба, разрезов, таблиц, графиков, текстовых описаний и т.д. Для облегчения и сокращения времени принятия решения, повышения его точности все эти данные должны быть представлены в удобной для эксперта форме, позволяющей проводить их эффективный анализ. Значительно снизить трудоемкость моделирования позволяет методика и технология формирования и калибровки математических моделей гидрогеологических объектов, основанная на комплексе инструментальных средств, который включает в себя ГИС, базу первичной гидрогеологической информации, систему математического моделирования и специальные сервисные

программы для обмена данными между основными элементами комплекса (В.В.Веселов, В.Ю.Паничкин, 2001).

Геоинформационные технологии используются для интенсификации работы эксперта, а также повышения достоверности построенной модели. В процессе построения модели эксперт производит выборку всех интересующих сведений из баз графических и семантических данных, формируя запросы на основе языка SQL. Сформированная математическая модель калибруется путем решения на ней серии обратных задач. Эксперт анализирует результаты, используя критерий физического правдоподобия, и в случае необходимости принимает решение об изменении принципов схематизации или математической модели.

В третьей главе описываются инструментальные средства для решения задач формирования и идентификации математических моделей геофильтрации; приводятся разработанные методика и технология формирования и калибровки математических моделей на основе использования ГИС-технологий и экспертного подхода.

Разработанный комплекс инструментальных средств включает в себя ГИС, базу первичных гидрогеологических данных, систему математического моделирования и ряд сервисных программ.

ГИС реализована на основе MapInfo 5.0 и используется для хранения и анализа данных, представленных в графической форме. Это карты и разрезы, построенные по фактическим данным, по результатам схематизации, а также по результатам моделирования.

База первичных гидрогеологических данных создана на FoxPro 6.0 и содержит сведения, представленные в символьной и числовой форме. Это результаты наблюдений и измерений, полученные по пунктам опробования, а также значения параметров, полученные в результате схематизации гидрогеологических условий.

В качестве системы моделирования используется GMS 3.1, позволяющая имитировать процессы геофильтрации (Environmental Modeling Research Laboratory of Brigham Young University, USA, 2000).

Разработанные автором сервисные программы обеспечивают обмен данными между основными компонентами комплекса.

Специальные программы разработаны также для построения наборов исходных данных, используемых системой моделирования GMS 3.1 в процессе решения задач геофильтрации. Они объединены в единый пакет, состоящий из программ формирования абсолютных отметок земли, абсолютных отметок подошв выделенных на модели слоев, исходных значений уровней для решения обратной стационарной задачи. Принцип их работы заключается в выборке и преобразовании сведений, содержащихся в ГИС и базе первичных гидрогеологических данных, в формат .sp2, используемый системой моделирования GMS 3.1.

Условно можно выделить следующие этапы в процессе создания модели (И.К.Гавич, 1980, 1988):

- анализ и схематизация гидрогеологических условий;
- формирование и идентификация математической модели.

На этапе анализа и схематизации осуществляется:

- обоснование и составление схемы гидрогеологического районирования;
- составление гидродинамической схемы, а также построение в соответствии с ней специальных карт гидрогеологических параметров и разрезов.

На этапе формирования и идентификации выполняется:

- формирование наборов исходных данных;
- построение концептуальной схемы;
- аппроксимация в пространстве и по времени;
- генерация фильтрационной схемы;
- калибровка модели и оценка полученных результатов.

Технологическая схема геоинформационно-математического моделирования представлена на рисунках 1-4.

Для обоснования и составления схемы районирования осуществляется сбор, оценка, подготовка и ввод в базы семантических и графических данных исходной информации; определяются границы моделируемой области; выполняется ее районирование по условиям формирования режима подземных вод и водного баланса, характеру границ и граничных условий, литологическому строению и т.п. Схема районирования формируется средствами ГИС.

Схематизация моделируемой области предполагает составление гидродинамической схемы, а также построение в соответствии с ней специальных карт гидрогеологических параметров и разрезов. Для ее проведения используются сведения из баз графических и семантических данных. Результатами схематизации являются плановая и в разрезе гидродинамические схемы, а также аппроксимация моделируемого процесса по времени. На плановой схеме отображаются границы моделируемого объекта, типовые структурные элементы (зоны), в пределах которых значения фильтрационных и других параметров считаются постоянными. С каждой зоной связываются значения этих параметров, а также задаются интервалы их возможного изменения. Карты параметров строятся для каждого слоя, выделенного в разрезе. Для каждого слоя модели задаются границы в плане, которые схематизируются заданием тех или иных типов граничных условий. Результаты записываются в графическую базу данных. Гидродинамическая схема в разрезе отображает выделенные типовые структурные элементы (слои) модели и типы граничных условий. Глубины залегания подошв слоев

вводятся в базу символьных данных. При проведении аппроксимации моделируемого процесса по

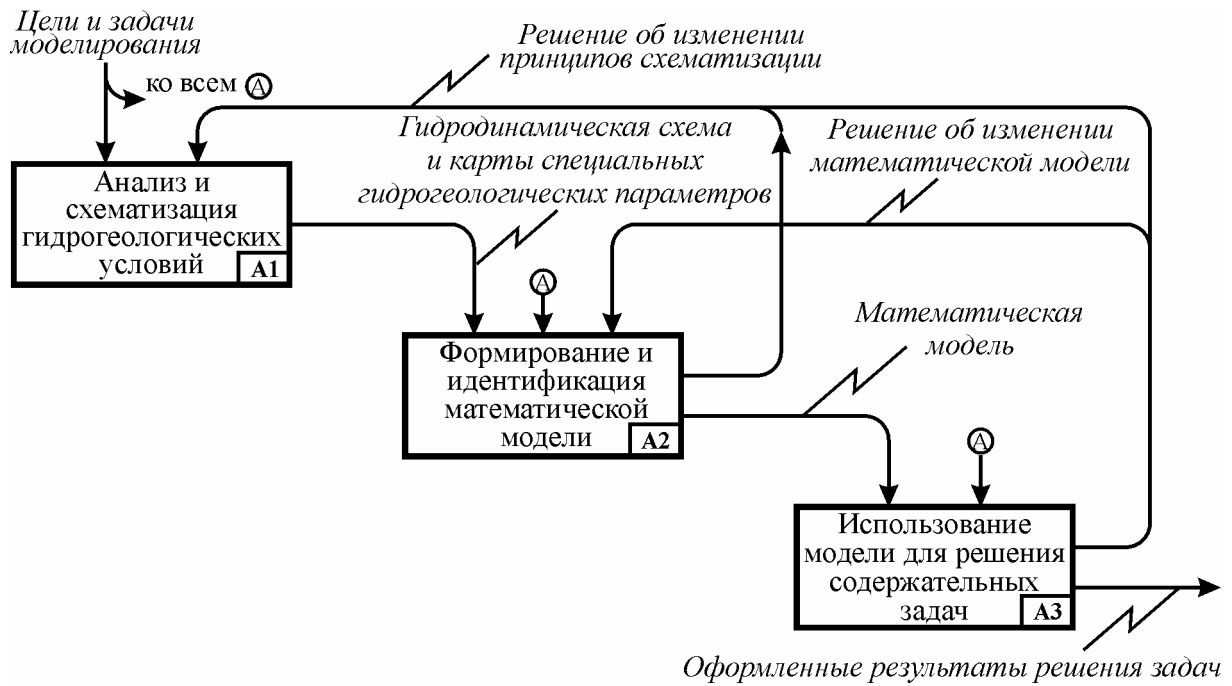


Рисунок 1 - Технологическая схема системы геоинформационно-математического моделирования гидрогеологических объектов.

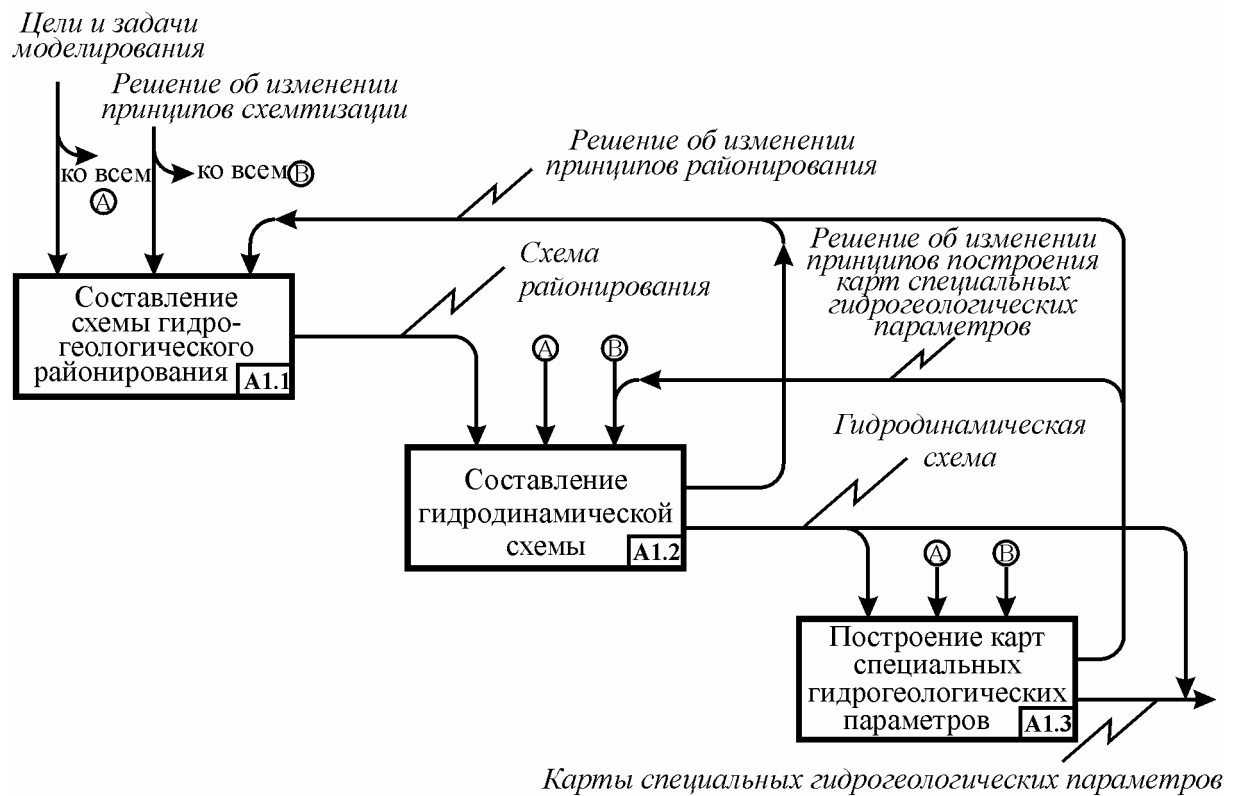


Рисунок 2 - A1. Анализ и схематизация гидрогеологических условий.

Гидродинамическая схема и карты специальных гидрогеологических параметров

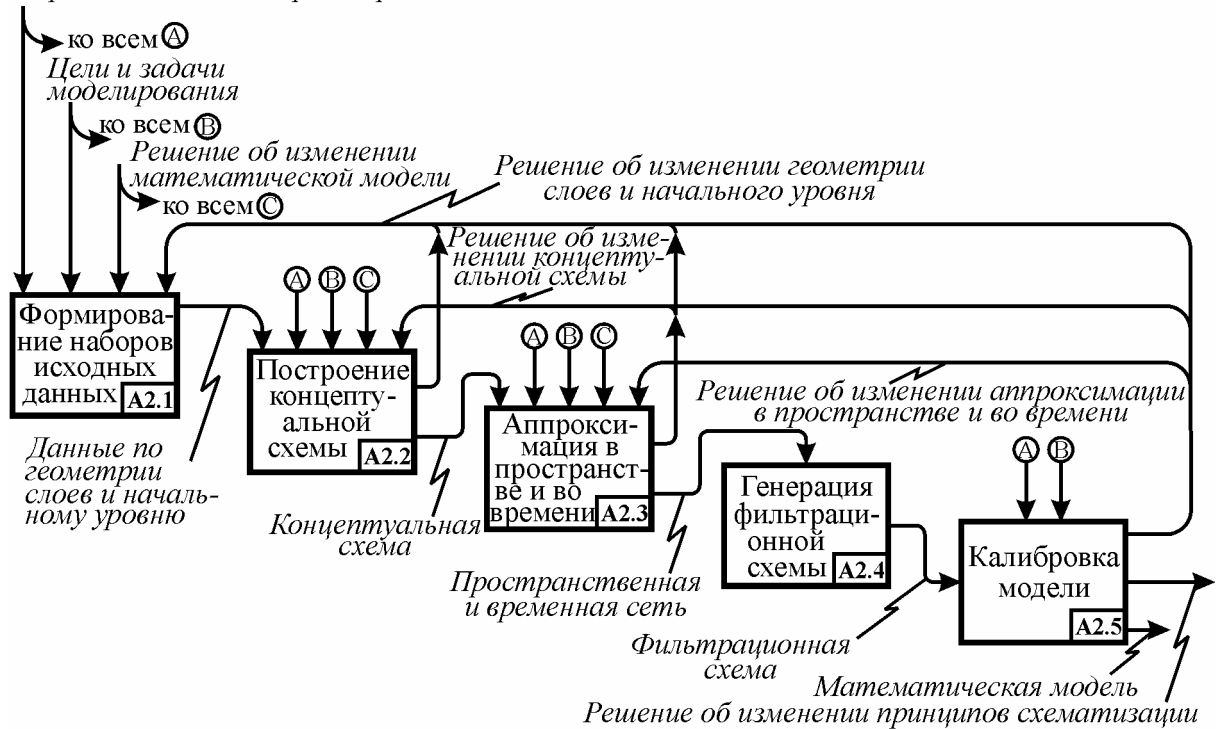


Рисунок 3 - A2. Формирование и идентификация математической модели.

Гидродинамическая схема и карты специальных гидрогеологических параметров

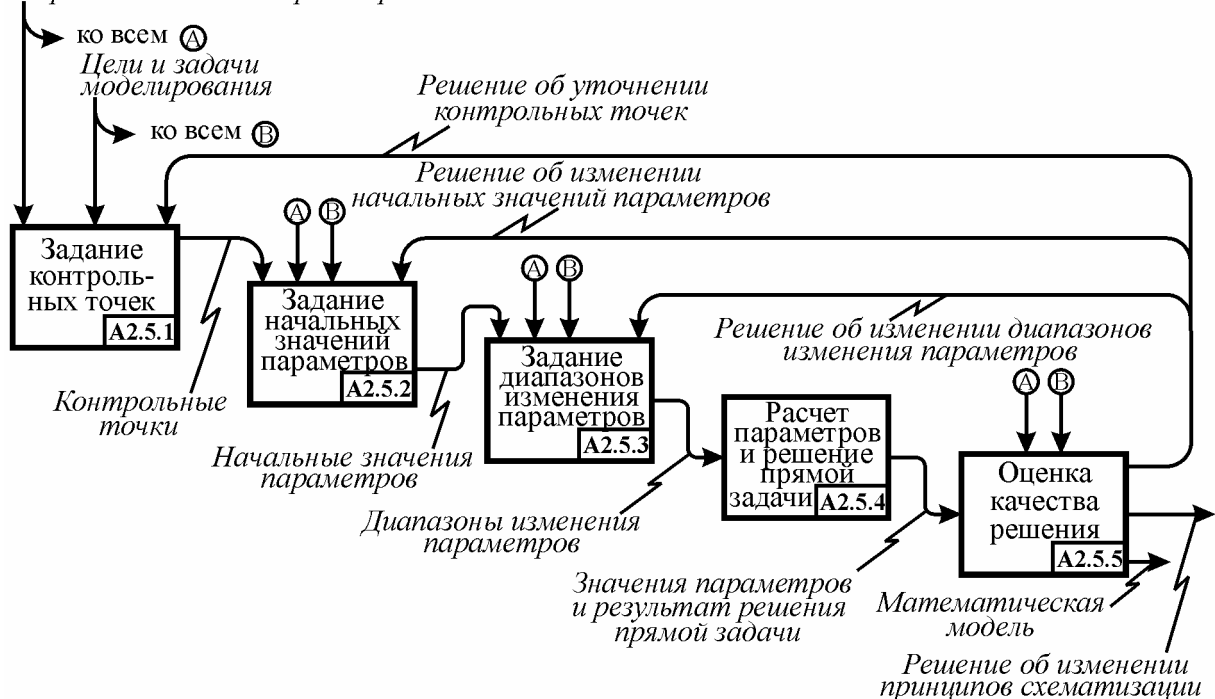


Рисунок 4 - A2.5. Калибровка модели.

времени задаются временные интервалы, на протяжении которых значения динамических параметров, характеризующих процессы взаимодействия моделируемого объекта с окружающей средой, условно считаются постоянными (стрессовые периоды). (И.К.Гавич, 1988; В.В.Веселов, В.Ю.Паничкин, 2002).

Концептуальная схема является отображением гидродинамической схемы средствами GMS 3.1. Ее условно можно разделить на плановую и в разрезе концептуальные схемы. На плановой концептуальной схеме типовым набором объектов, используемым системой моделирования GMS 3.1, представлены границы моделируемой области, естественные и техногенные объекты, оказывающие существенное влияние на моделируемый процесс (например, эксплуатационные скважины с указанием расходов и времени их замеров). Для оценки качества калибровки модели на схему наносятся наблюдательные точки, с которыми связываются, например, значения уровней подземных вод и даты их замеров. Карты параметров конвертируются в форматы GMS 3.1 и в случае необходимости задаются графики изменения во времени параметров модели. Задается также начальное значение уровня подземных вод. Для построения концептуальной схемы в разрезе из баз графических и семантических данных производится выборка сведений, отражающих результаты схематизации моделируемого объекта в разрезе (абсолютные отметки поверхности земли и подошв выделенных на модели слоев) и преобразование их в форматы GMS 3.1.

Для преобразования концептуальной схемы в фильтрационную при использовании конечноразностных моделей фильтрации необходимо задать сеточную аппроксимацию моделируемой области в пространстве (в плане и разрезе) и выполнить аппроксимацию моделируемого процесса по времени. Для аппроксимации моделируемой области в плане автоматически генерируется в общем случае неравномерная прямоугольная сеть, имеющая точки сгущения на требующих более детальных исследований участках. Задается количество слоев модели. Аппроксимация моделируемой области в разрезе осуществляется автоматически на основе сведений о геометрии слоев (абсолютные отметки поверхности земли и подошв выделенных слоев), представленных в концептуальной схеме. Для осуществления аппроксимации моделируемого процесса по времени задается количество и длина стрессовых периодов, каждый из которых разбивается на фиксированное количество шагов для записи результатов решения задачи.

Фильтрационная схема генерируется автоматически путем отображения концептуальной схемы на сформированную сеть. При этом выполняется интерполяция в ячейки трехмерной сети и результаты представляются в форматах, используемых программой MODFLOW (Michael G. McDonald and Arlen W. Harbaugh, 1988). С помощью специальных

программных средств осуществляется формальная проверка исходных данных и их редактирование в случае обнаружения ошибок.

Калибровка проводится для доказательства адекватности модели природным условиям. В процессе ее проведения выполняется подбор параметров модели. Для оценки степени геологического соответствия модели объекту строятся критерии физического правдоподобия, т.е. задаются пределы допустимых изменений значений параметров модели. (И.К.Гавич, 1980; В.А.Мироненко, В.М.Шестаков, 1978). Качество подбора оценивается по совпадению вычисленных значений динамических функций (абсолютных отметок уровней, расходов потока и т.п.) с заданными значениями в контрольных точках, содержащихся в табличных файлах наблюдательных точек для GMS. Обычно в качестве наблюдательных точек используются режимные или разведочные скважины. Расход потока подземных вод на модели вычисляется для произвольно заданных линейных или площадных объектов, которые обозначают на изображении концептуальной модели, например, реки, дрены и т.п. Для таких объектов задаются также замеренные опытным путем или определенные в результате экспертной оценки значения расходов. Для автоматизации подбора коэффициентов фильтрации и площадного питания используется программа PEST (J.Doherty, L.Brebbler, P.Whyte, 2000). Копия экрана, на которой отображены результаты калибровки модели, представлена на рисунке 5.

В четвертой главе анализируются гидрогеологические условия Павлодарского промрайона, приводятся результаты их схематизации и описываются основные этапы создания и калибровки математической модели переноса ртути потоком подземных вод.

Региональные гидрогеологические исследования проводились С.М.Мухамеджановым, Ф.К.Кабиевым и др. В процессе написания диссертационной работы были использованы также материалы Павлодарской гидрогеологической экспедиции и результаты исследований кафедры гидрогеологии и инженерной геологии КазНТУ им.К.Сатпаева.

В пределах исследуемой территории получили распространение водоносный горизонт аллювиальных современных отложений поймы р.Иртыш (aQ_{IV}), водоносный горизонт верхнечетвертичных отложений первой надпойменной террасы (aQ_{III}) и водоносный комплекс верхнемиоценовых нижне-среднеплиоценовых отложений павлодарской свиты (N_{1-2pv}). Региональным водоупором 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

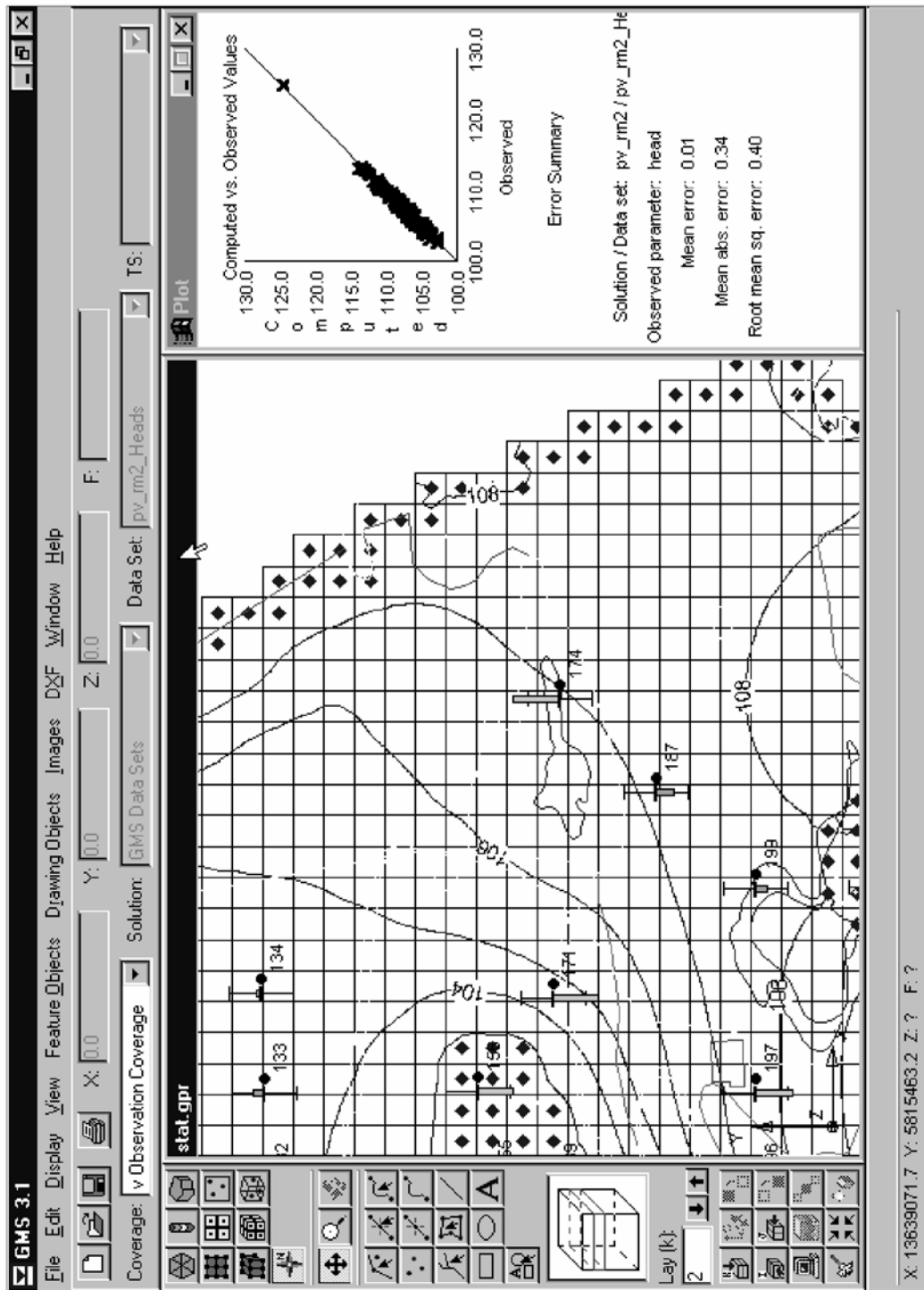


Рисунок 5 - Копия экрана, сделанная в процессе работы с системой моделирования GMS 3.1.
 Результат решения обратной стационарной задачи.

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 году начинается сброс сточных вод в Былкылдак, в 1972 г. с пуском ТЭЦ-3 активизируется работа золоотвала, с 1977г. постепенно заполняется накопитель Сарымсак. В 1992 году заполняется водой магистральный канал, являющийся северной границей модели и начинается подача воды из р.Иртыш на поля орошения. Накопители, золоотвал и оросительная система становятся интенсивными источниками питания подземных вод. В результате происходит подъем их уровня. В настоящее время техногенные факторы являются доминирующими и во многом определяют режим подземных вод на изучаемой территории. 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.

Результаты схематизации гидрогеологических условий Павлодарского промрайона показаны на рисунке 6.

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

В процессе решения обратной стационарной задачи на модели с использованием программы PEST подбирались коэффициенты фильтрации водовмещающих пород, инфильтрационное питание и величина испарения с поверхности подземных вод. Подобранные значения коэффициентов фильтрации не выходят за допустимые пределы. Для песков они колеблются от 0.2-0.5 (глинистые пески) до 20-30 м/сут (разнозернистые пески). Для супесей, суглинков соответственно 0.1-0.01 м/сут. Для глин первого-второго от поверхности земли слоя модели – 0.001 м/сут, для третьего-пятого слоев - 0.0001 м/сут. Величина инфильтрационного питания изменяется от $n \cdot 10^{-6}$ до $n \cdot 10^{-4}$ м/сут. Критическая глубина залегания уровня грунтовых вод принята равной 2.4 м. Максимальная величина испарения при достижении уровня грунтовых вод поверхности земли соответствует величине испарения с открытой водной поверхности – 870 мм в год.

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 величине 0.34 м, средняя квадратичная ошибка 0.40 м, что в данном случае является допустимым и соответствует погрешности определения исходных данных.

В процессе решения обратной нестационарной 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. Было получено достаточно близкое совпадение фактического уровня с модельным.

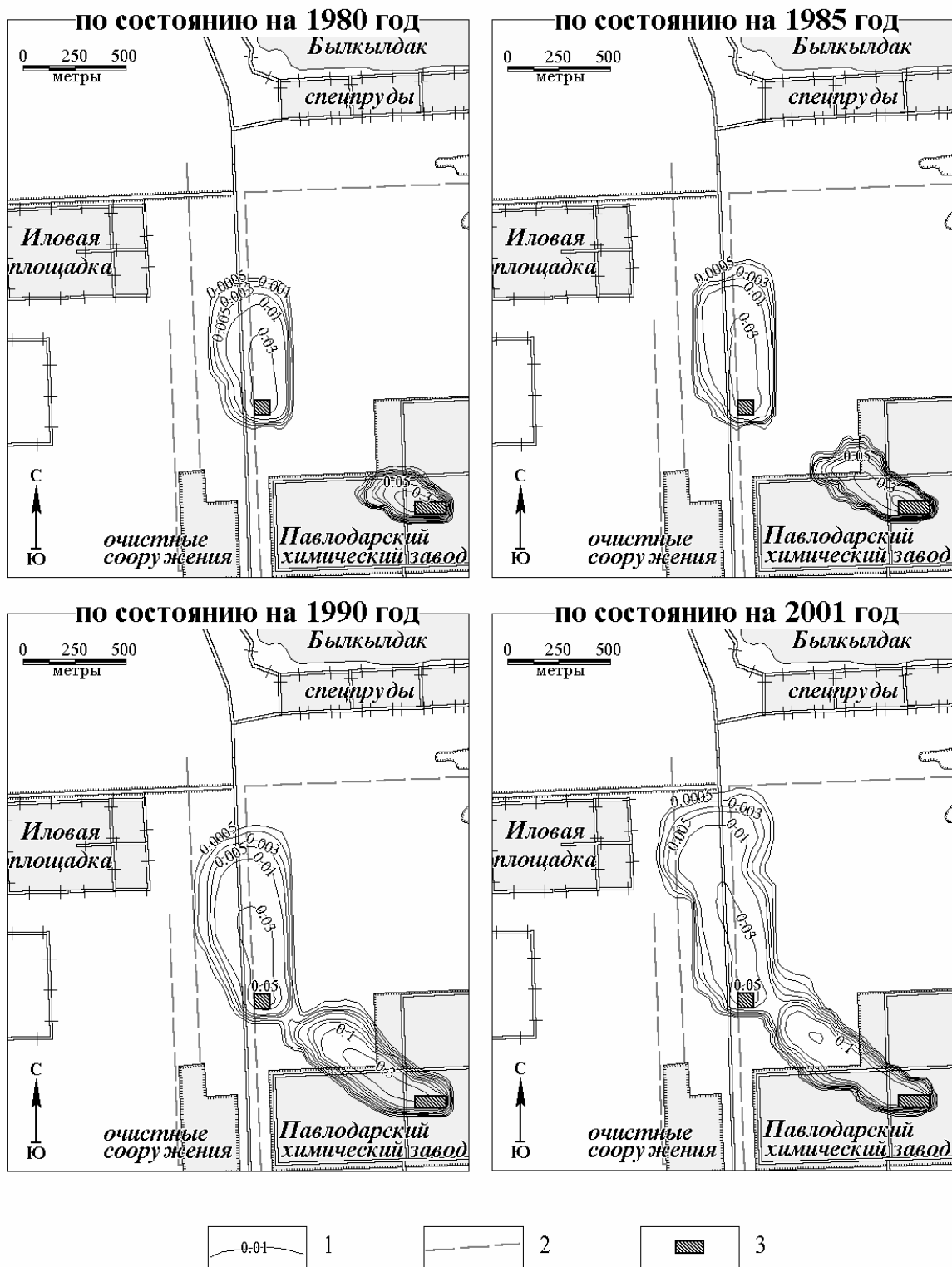
На модели прогнозировалось распространение ореола ртутного загрязнения подземных вод в течение 30 лет (до 2031 г.). Считалось, что в течение прогнозного периода сохранятся естественные и техногенные факторы, влияющие на формирование подземных вод, существующие в 2001 г. Было сделано два варианта прогноза.

1. Сохранение существующих источников загрязнения подземных вод (под цехом производства каустической соды и в районе насосной станции), концентрация ртути в которых принималась постоянной на весь прогнозный период (0.15 и 0.04 г/л соответственно).
2. Изоляция источника под цехом. Данный вариант соответствовал условиям, которые сложатся на объекте в случае строительства “стены в грунте”.

По результатам моделирования ореол ртутного загрязнения от источника, расположенного под цехом, будет распространяться в северо-северо-западном направлении. По первому варианту к концу прогнозного периода он увеличится и составит приблизительно 2.8 км. По второму варианту, в результате сооружения “стены в грунте”, ореол загрязнения на территории химического завода будет постепенно уменьшаться и к концу прогнозного периода полностью исчезнет. Ореол загрязнения, распространяющийся от насосной станции и канализационных сетей сохранится и будет иметь также северо-северо-западное направление (В.В.Веселов, В.Ю.Паничкин, 2002). Результаты решения эпигнозной и прогнозных задач приведены на рисунках 7-9.

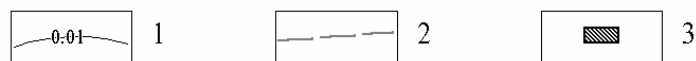
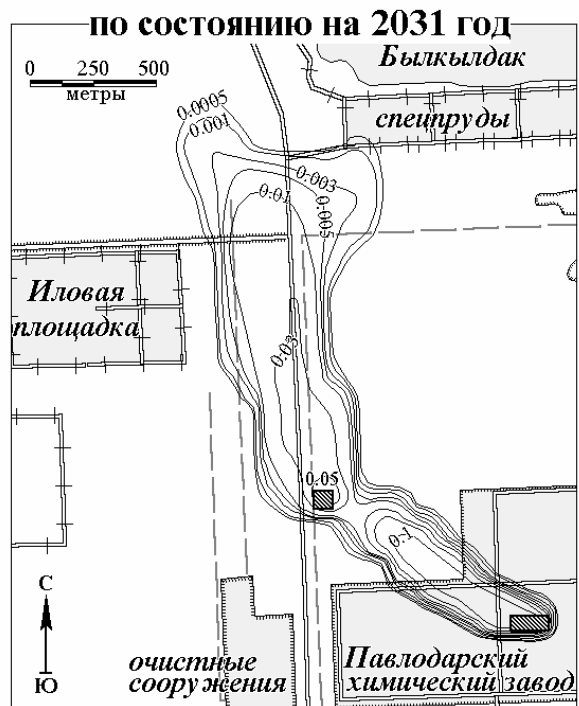
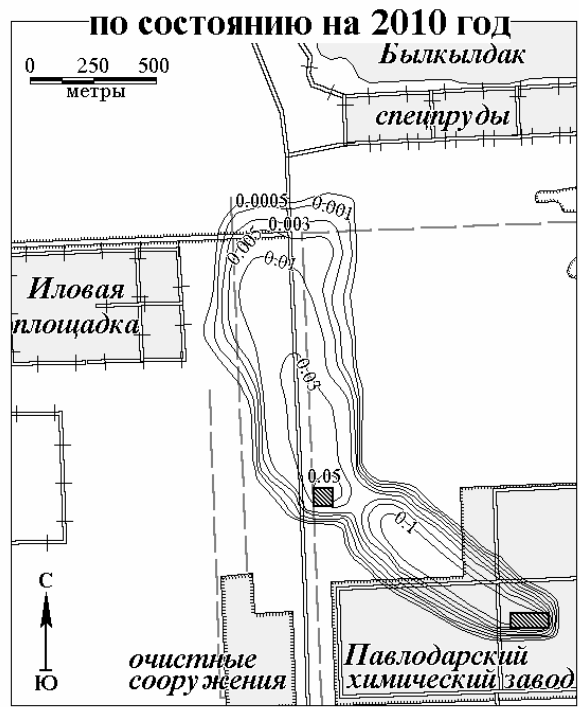
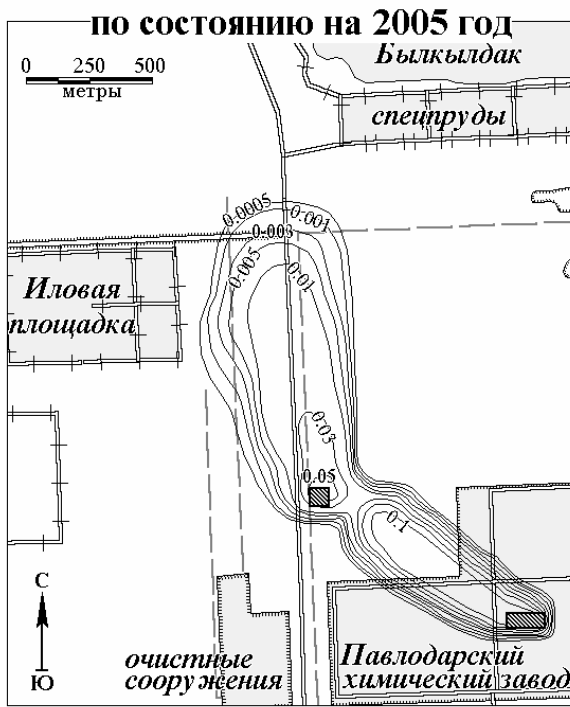
Это позволяет сделать вывод, что при сохранении существующего на 2001 г. направления движения подземных вод серьезной опасности для жителей с.Павлодарское в течение прогнозного периода не ожидается. Не произойдет также поступления ртути в р.Иртыш. Но строительство стены в грунте не приведет к значительному улучшению качества подземных вод, поскольку остается еще один источник их загрязнения. Необходимо подчеркнуть, что на исследуемой территории доминирующими являются техногенные факторы формирования подземных вод. Поэтому их изменение может привести к изменению направления движения

подземных вод к западу, что создаст реальную угрозу жителям с.Павлодарское.



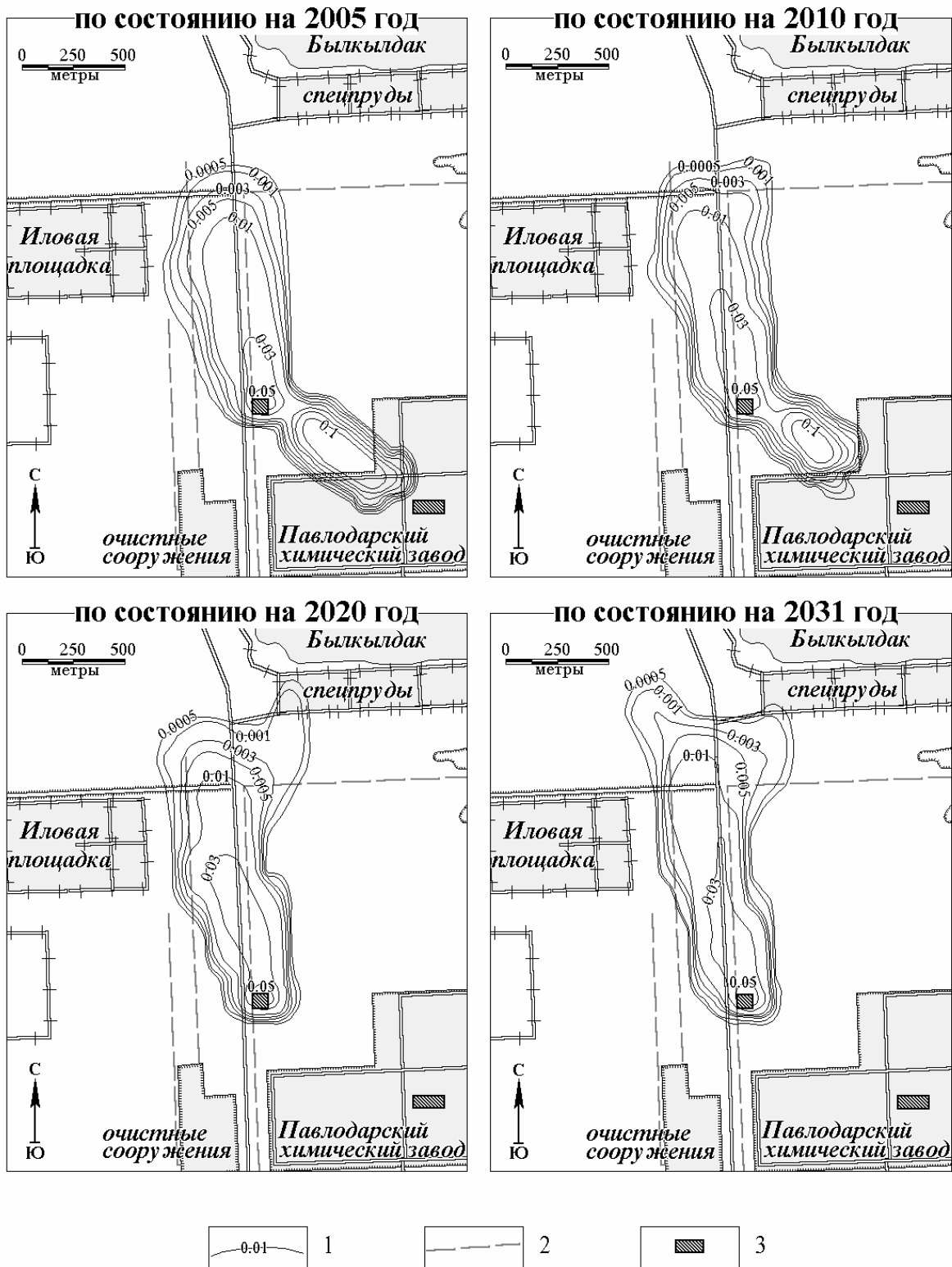
1 - изолинии концентрации ртути, растворенной в подземной воде. Цифра - значение концентрации, мг/л; 2 - канализационная сеть; 3 - основные источники загрязнения подземных вод ртутью.

Рисунок 7 - Математическая модель ртутного загрязнения подземных вод северной части Павлодарского промышленного района. Результат решения эпигнозной задачи.



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

Рисунок 8 - Математическая модель ртутного загрязнения подземных вод северной части Павлодарского промышленного района.
 Результат решения прогнозной задачи (1 вариант).



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

Рисунок 9 - Математическая модель ртутного загрязнения подземных вод северной части Павлодарского промышленного района.
 Результат решения прогнозной задачи (2 вариант).

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе получены следующие научные и практические результаты.

- Разработана методика и технология применения экспертного подхода и геоинформационных систем для автоматизированного формирования математических моделей и их идентификации.
- Разработан комплекс инструментальных средств, включающий в себя геоинформационную систему, систему управления базами семантических данных, систему математического моделирования гидрогеологических процессов, а также ряд сервисных программ для автоматизированного формирования и калибровки моделей.
- Создана математическая модель гидрогеологических условий Павлодарского промрайона, имитирующая процесс трехмерного конвективно-диффузионного переноса ртути потоком подземных вод. Модель использована для оценки угрозы ртутного загрязнения подземных вод, эксплуатируемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения, и разработки комплекса мероприятий по снижению риска.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Создание системы автоматизированного мелиоративного кадастра в Казахстане // Материалы научно-технической конференции «Гидрогеолого-мелиоративной службе Казахстана 25 лет», Алматы-Шымкент, 1996, С.18-19.
2. 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», Алматы, 1999, С.144.
3. Веселов В.В., Махмутов Т.Т., Касымбеков Д.А., Паничкин В.Ю., Смоляр В.А., Мирошниченко О.Л. Подземные воды Приаралья (состояние и перспективы использования) // Минерагеня и перспективы развития минерально-сырьевой базы, Алматы, «Гылым», 1999, Ч.1, С.181-196.
4. 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», Алматы, КазНТУ, 1999, Ч.1, С.272-274.
5. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Решение обратных гидрогеологических задач на основе экспертного подхода и геоинформационных технологий // Труды международной

- конференции «Молодые ученые – 10-летию независимости Казахстана», Алматы, КазНТУ, 2001, Ч.2, С.58-61.
6. Мирошниченко О.Л. К вопросу оптимизации моделирования гидрогеологических систем // Труды международного научного симпозиума студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», Томск, 2001, С.115.
 7. Мирошниченко О.Л. Использование ГИС-технологий для калибровки модели гидрогеологических условий северной части Павлодарского промрайона // Труды международной научно-практической конференции «Естественно-гуманитарные науки и их роль в подготовке инженерных кадров», Алматы, КазНТУ, 2002, Ч.2. С.297-301.
 8. 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», Москва, 2002, С.192.
 9. 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», Москва, 2002, С.193.
 10. 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», Москва, 2002, С.241.
 11. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. ГИС-технологии в гидрогеолого-мелиоративных исследованиях // Геология Казахстана, Алматы, 2002, №1, С.96-103.
 12. Miroshnichenko O.L. Utilization of GIS-technologies in the process of calibration of hydrogeological models // Proceedings of the Second International Conference on Ecological Chemistry, October 11-12, 2002, Chisinau, Moldova, P.324.
 13. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Автоматизация калибровки моделей гидрогеологических объектов // Геология Казахстана, Алматы, 2002, №6, С.73-80.
 14. 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.

15. Веселов В.В., Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Опыт применения автоматизированных технологий в гидрогеологическом моделировании // Известия Национальной Академии наук Республики Казахстан, серия геологическая, Алматы, «Гылым», 2003, №3, С.117-124.

Oxana L. Miroshnichenko

**Creation and identification of the mathematical models of geofiltration
on the base of GIS-technologies and expert approach**

The object of the investigation is the process of creation and identification of the geo-filtration' mathematical models on the basis of GIS-technologies' and expert philosophy' application.

The objective of the work is automation of building of the mathematical models of the hydro-geological objects and their identification on the basis of expert philosophy' and GIS-technologies' application with involvement of the optimal control methods.

During the investigation execution the following have been applied: **methods** of the hydro-geological zoning and stratification, experimental determinations of the main hydro-geological parameters as well as main provisions of the systems and structural analysis, mathematical modeling, database's and geo-information systems' theory, theory of classification, theory of optimal control, theory of numerical method of differential equations solutions.

In the dissertation study the following **scientific and practical results** have been obtained:

- The technique and technology have been developed related to the expert method' and geo-information systems' application for the automated generation of the mathematical models and their identification.
- The complex of tools has been developed, which includes the geo-information system, semantic database management system, system of mathematical modeling of the hydro-geological processes, as well as the set of service programs for automated building and calibration of the models.
- The mathematical model of the Pavlodar industrial zone' hydro-geological conditions has been created, which simulates the process of three-dimensional convective-diffusion transfer of mercury by the underground waters flow. The model has been used with the purpose to evaluate the threat of the mercury contamination of the underground waters, which are used for the economic-drinking supply of the population, and to develop the set of measures for the risk decrease.

Two prognosis versions of the halation expansion of the underground waters' mercury contamination within the period of 30 years (up to year 2031) have been performed on the model. The first version has assumed the retention of existing sources of the underground waters contamination (under the department of the caustic soda production at the Pavlodar chemical plant and around the pumping station, which previously has performed the mercury containing drains transferring). The second version has assumed the isolation of the source under the department and has been corresponding to the conditions, which could occur at the object in case of the "wall in the soil" construction. From the model-

ing results the mercury contamination halation from the source will propagate in the north-north-west direction. In the first version it will increase and comprise 2.8 km by the end of the prognosis period. In the second version it will gradually decrease and disappear completely. But the contamination halation, which is propagated from the pumping station and canalization networks, will remain and will have the north-north-west direction as well. Hence, at maintaining the existing direction of the underground waters flow' direction there is no danger for the inhabitants of the Pavlodarskoe settlement within the prognosis period. The mercury inflow from the Irtysh River will not happen as well. But the "wall in the soil" construction will not result in significant improvement of the underground waters' quality, because the other source of their contamination will remain. Throughout the investigated territory the dominating are the man-caused factors of the underground waters formation, and their changing can result in variation of the underground waters flow direction to the west, which will create the real threat to the inhabitants of the Pavlodarskoe settlement.

Main characteristics of the developed complex. The complex contains the following components: GIS, based on MapInfo 5.0; database of the primary hydro-geological data, based on FoxPro 6.0; modeling system GMS 3.1; service programs, developed by the author and providing the data exchange between the main components of the complex.

The developed technique, technology and set of tools **have been introduced into the practice** during the building of the mathematical model of the Pavlodar industrial zone' hydro-geological conditions, which simulates the process of three-dimensional convective-diffusion transfer of mercury by the underground waters flow.

The scope of application of developed technique and technology is the modeling of the geo-filtration processes in the hydro-geological researches.

The economic effectiveness of the study consists in considerable reduction of time and labor resources, required for the model building and calibration, as well as for increasing of the expert estimations' accuracy and obtained results' reliability.

The prognosis assumptions about the development of the study object. Development of the technique and technology of the hydro-geological problems' solution is assumed to be performed towards the further automation of the hydro-geological conditions' mathematical model design on the basis of GIS-technologies, as well as towards automation of the filed hydro-geological researches with application of the Global Positioning Systems integrated with mobile computing devices.

Мирошниченко Оксана Леонидовна
Геоакпараттық жүйе (ГАЗ) технологияларын және сараптау жұмыстарын пайдалану негізінде геофльтрацияның математикалық модельдерін құру және бірігейлендіру

Геоакпараттық жүйе (ГАЗ) технологияларын және сараптау жұмыстарын пайдалану негізінде геофльтрацияның математикалық модельдерін құру және бірігейлендіру процесі **зерттеу объектісі** болып табылады.

Жұмыстың мақсаты – гидрогеологиялық нысандардың математикалық модельдерін құруды автоматтандыру және оларды оңтайлы басқару әдістерін пайдалана отырып сараптау және ГАЗ-технологияларды қолдану негізінде бірігейлендіру.

Зерттеу жүргізу барысында гидрогеологиялық бөлшектеу және стратификациялау, негізгі гидрогеологиялық өлшемдерді сараптамалық айқындау **әдістері**, сондай-ақ жүйелік және құрылымдық талдаудың, математикалық модельдеудің, деректер базалары мен геоакпараттық жүйелер теориясының, жіктеу теориясының, оңтайлы басқару теориясының, дифференциалды теңдеулерді шешудің сандық әдістері теориясының негізгі ережелері пайдаланылды.

Диссертациялық жұмыста мынадай **ғылыми және практикалық** нәтижелер алынды.

- Математикалық модельді қалыптастыру және бірігейлендіру үшін сараптау және геоакпараттық жүйелерді пайдаланудың әдістемесі мен технологиясы әзірленді.
- Геоакпараттық жүйеден, семантикалық деректер базасын басқару жүйесінен, гидрогеологиялық процестерді математикалық модельдеу жүйесінен тұратын аспапты құралдар кешені, сондай-ақ модельдерді автоматты түрде жасауға және калибрлеуге арналған бірнеше сервистік бағдарламалар әзірленді.
- Жер асты суларының ағынымен сынаптың үш өлшемді конвективті-диффузиялық жолмен жүру барысын көрсететін Павлодар өнеркәсіп ауданының гидрогеологиялық жағдайының математикалық моделі құрылды. Модель халықтың шаруашылық не ауызсу үшін пайдаланатын жер асты суларының сынаппен ластану қаупін бағалау үшін және ол жөніндегі тәуекелді төмендету жөніндегі іс-шаралар кешенін әзірлеу үшін пайдаланылды.

Модельде жер асты суларының сынаппен ластану аймағының 30 жыл ішінде (2031 жылға дейін) таралу болжамының екі варианты берілген. Біріншісі жер асты суларын ластау көздерін сол күйінде сақтауды (Павлодар химия зауытының каустикалық сода өндіру цехының астында және құрамында сынап бар ағындарды айдайтын бұрынғы насос

станциясының ауданында). Екіншісі ластау көзінің цехтың астында жеке қалдыруды ұсынады және «топыраққа қабырға тұрғызған» жағдайда объектіге қойылатын талаптарға сәйкес келеді. Модельдеу нәтижелері бойынша цех астындағы көзден сынаппен ластанған жерге дейінгі аймақ солтүстік-солтүстік-батыс бағытында созылады. Божамды кезең аяғында ол бірінші вариант бойынша ұлғайып, шамамен 2.8 км-ге жетеді. Екіншісі бойынша – біртіндеп азайып, толығымен жоғалады. Бірақ насос станциясы мен канализация станциясы арасында созылып жатқан ластану аймағы сақталып қалады және солтүстік-солтүстік-батыс бағытында созылады. Осылайша, осы кездегі жер асты су қозғалысының бағыты сақталған жағдайда болжамды кезең ішінде Павлодар ауылының тұрғындары үшін жер асты суы қаупі жоқ. Сондай-ақ сынаптың Ертіс өзеніне түсу қаупі де байқалмайды. Бірақ «топыраққа қабырға тұрғызу» жер асты суларының сапасын жақсартпайды, өйткені оны ластайтын тағы бір ластау көзі бар. Зерттелуші аумақта жер асты суларын құрайтын техногенді факторлар негізгі факторлар болып табылады, өйткені олардың өзгеруі жер асты сулары бағытының батысқа қарай өзгеруіне әкеп соғуы мүмкін, бұл Павлодар ауылының тұрғындары үшін қауіпті болып табылады.

Әзірлеудің **негізгі сипаттамасы**. Кешеннің құрамына MapInfo 5.0. негізінде іске асырылған ГАЖ, FoxPro 6.0. негізінде құрылған бастапқы гидрогеологиялық деректер базасы; GMS 3.1 модельдеу жүйесі; кешеннің негізгі компоненттері арасында деректерді айырбастауды қамтамасыз ететін автор әзірлеген сервистік бағдарламалар кіреді.

Әзірленген әдістеме, технология және аспапты құралдар кешені **практикаға** жер асты суларының ағынымен сынаптың үш өлшемді конвективті-диффузиялық жолмен жүру барысын көрсететін Павлодар өнеркәсіп ауданының гидрогеологиялық жағдайының математикалық моделін құру барысында енгізілді.

Гидрогеологиялық зерттеулердегі геофльтрация процестерін модельдеу әзірленген әдістемені және технологияны **пайдалану саласы** болып табылады.

Модельді және оны калибрлеуді құруға, сондай-ақ сараптау бағаларының дәлдігін және алынған нәтижелердің дұрыстығын көтеруге жұмсалатын уақыт пен еңбек ресурстарын біршама қысқарту жұмыстың **экономикалық тиімділігі** болып табылады.

Зерттеу объектісінің дамуы туралы болжамды ұсыныстар. ГАЖ-технологиялар негізінде гидрогеологиялық нысандардың математикалық модельдерін жобалауды болашақта автоматтандыру, сондай-ақ мобильді есептеу қондырғыларымен бірге сабақтасқан кең көлемде позициялау жүйелерін пайдалана отырып далада жүргізілетін гидрогеологиялық зерттеулерді автоматтандыру барысында гидрогеологиялық міндеттерді шешудің әдістемесі мен технологиясы дамытылуы тиіс.