

Восточно-Казахстанский государственный технический университет им.
Д.Серикбаева

УДК 556.3.07:004.94

На правах рукописи

БЕЛЬДЕУБАЕВА ЖАНАР ТОЛЕУБАЕВНА

**Разработка информационно-аналитической системы мониторинга
состояния загрязнения подземных вод**

6D070300 – Информационные системы (по отраслям)

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты

Кандидат технических наук
Рахметуллина С.Ж.

Доктор физико-математических наук,
профессор Карчевский А.Л.

Республика Казахстан
Усть-Каменогорск, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ КАЧЕСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД.....	8
1.1 Современное состояние проблемы загрязнения подземных вод.....	8
1.2 Система мониторинга подземных вод в Республике Казахстан.....	9
1.3 Анализ гидроэкологической обстановки в Восточном Казахстане.....	15
Выводы по разделу.....	19
2 МЕТОДЫ И МОДЕЛИ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД	20
2.1 Оценка состояния загрязнения подземных вод на основе математико-статистических методов	20
2.2 Оценки устойчивости системы подземных вод на основе индексов.....	38
2.3 Математическое моделирование процесса загрязнения подземных вод.....	41
2.4 Метод локализации источников загрязнения подземных вод.....	59
Выводы по разделу.....	71
3 РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД.....	72
3.1 Концепция разработки информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод.....	72
3.2 Архитектура информационно-аналитической системы экологичес- кого мониторинга подземных вод.....	74
3.3 Функциональная модель информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод.....	79
Выводы по разделу.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	102
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	109

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие документы и стандарты:

Закон Республики Казахстан «О науке» от 18.02.2011 г. №407-IVЗРК;

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления;

Закон Республики Казахстан «О недрах и недропользовании» от 24 июня 2010 года № 291 -IV;

ГОСТ 2874-82 (95) Вода питьевая, гигиенические требования и контроль за качеством;

ОБОЗНАЧЕНИЕ И СОКРАЩЕНИЕ

GMS	Ground Water Modeling System
ПВ	Подземные воды
ИС	Информационная система
ИАС	Информационно-аналитическая система
2D	Двумерный
3D	Трёхмерный
Grid	Регулярная сетка
ГИС	Геоинформационная система

ВВЕДЕНИЕ

Проблема запасов и качества питьевой воды является одной из актуальных проблем современности. В своем обращении к народу Казахстана «Послание Президента Республики Казахстан - Лидера нации Нурсултана Назарбаева народу Казахстана «Стратегия «Казахстан-2050»: новый политический курс состоявшегося государства» от 14 декабря 2012 г., Президент РК, острый дефицит воды, отнес к одним из глобальных вызовов XXI века [1]. Решение водных проблем является одним из важнейших приоритетов в Стратегии развития Казахстана до 2050 года, рассматривая водные ресурсы как залог здоровья и благополучия граждан страны.

Восточно-Казахстанская область относится к наиболее обеспеченному и богатому водными ресурсами региону Республики Казахстан, что определено ее природно-климатическими условиями [2]. Тем не менее, по уровню загрязнения вод, она занимает одно из первых мест в Казахстане, что обусловлено большой концентрацией на территории области промышленных и сельскохозяйственных предприятий, чьи выбросы в окружающую среду прямо или опосредовано загрязняют и систему подземных вод.

Очистка подземных вод от загрязнения, особенно вызванных промышленностью и городскими поселениями, является очень дорогостоящим мероприятием, основным методом их защиты является профилактика, т.е. выявление источников и мощности загрязнения, а также разработка мер по предотвращению поступления загрязнений в подземные воды [3,4,5].

Одним из главных условий эффективных водоохраных мероприятий является наличие системы качественного мониторинга состояния загрязнения подземных вод [6]. Совершенствование систем экологического мониторинга в последнее время становится одним из приоритетных направлений охраны окружающей среды, что обусловлено с развитием информационных технологий [7]. Система мониторинга состояния подземных вод строится на данных, имеющих ретроспективный характер. Информация об объектах мониторинга характеризуется большим объемом данных, разнородностью, пространственной привязанностью, недоступностью объектов для прямого изучения. Объекты мониторинга имеют широкую территориальную распределенность [8]. Наибольший эффект в реализации задачи мониторинга исследуемых объектов достигается на основе использования современных информационных технологий с целью автоматизации процедур сбора, накопления и анализа данных об их состоянии.

Инструментальным средством поддержки мониторинга состояния запасов и качества подземных вод должна стать информационно-аналитическая система, информационное обеспечение которой интегрирует базы данных объектов мониторинга. Ее математическое обеспечение включает математические и оптимизационные модели, а программное

обеспечение - графический и диалоговый интерфейс, позволяющий реализовать функциональные задачи.

Выше сказанное обуславливает актуальность темы исследования, заключающееся в том, что с целью улучшения качества мониторинга состояния загрязнения подземных вод необходимо разработать информационно-аналитическую систему, реализующую интеграцию современных информационных технологий, математических методов и моделей процесса оценки, загрязнения состояния загрязнения подземных вод на основе режимных данных гидрогеологической партии региона.

Кроме того актуальность диссертационной работы подтверждается тем, что исследование выполнялось в рамках НИР по договору №61-420-17 по теме «Разработка информационно-аналитической системы мониторинга качества и запасов подземных вод РК» бюджетной программы 217 «Развитие науки» (приложение В).

Объект исследования:

Процессы автоматизированного учета, хранения и использования данных мониторинга подземных вод, база данных «Подземные воды» Государственного Банка данных

Предмет исследования:

Методы мониторинга состояния подземных вод на основе режимных данных

Цель работы:

Проектирование и разработка информационно-аналитической системы с целью повышения эффективности процесса мониторинга подземных вод

Методы исследования:

- Методы системного анализа;
- Методы оценки и прогнозирования качества подземных вод;
- Методы определения источников загрязнения;
- Технологии проектирования и разработки информационно-аналитических систем.

Задачи исследования

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

- анализ проблемы и перспектив применения методов математического и компьютерного моделирования, информационных технологий для мониторинга системы подземных вод;
- определение и адаптация к условиям региона математических методов и моделей оценки и прогнозирования состояния загрязнения подземных вод с учетом содержания и состава загрязняющих веществ, строения и состава водоносных пород, условий в которых происходит перенос загрязняющего вещества, определения источников загрязнения;
- разработка технологии предобработки данных для повышения их качества;

- разработка алгоритмов решения поставленных задач и численных алгоритмов реализации методов и моделей;
- проектирование архитектуры информационной системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод;
- разработка информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод;

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

- концепция формирования информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод;
- алгоритмы реализации методов и моделей оценки, прогнозирования состояния загрязнения подземных вод, определения источников загрязнения;
- информационная технология, базирующаяся на комплексном применении информационных ресурсов и методов математического и компьютерного моделирования процесса экологического мониторинга подземных вод;
- архитектура информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод;

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в применении предложенной информационно-аналитической системы в гидроэкологии с целью повышения качества процесса мониторинга состояния загрязнения подземных вод на основе интеграции математических методов и моделей, современных информационных технологий.

Научно-обоснованные теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы использованы в научном проекте по теме «Разработка информационно-аналитической системы мониторинга качества и запасов подземных вод РК», бюджетной программы 217 «Развитие науки», о чем свидетельствует акт внедрения (Приложение В). Подана заявка на получение свидетельства о государственной регистрации прав на объект авторского права «Информационно-аналитическая система мониторинга качества и запасов подземных вод» (программа для ЭВМ).

Разработанная в рамках диссертационной работы информационно-аналитическая система мониторинга состояния загрязнения подземных вод успешно применяется в учебном процессе кафедры «Информационные технологии» ВКГТУ им. Д.Серикбаева (Приложение Г) и в лаборатории ТОО «Центра экологической безопасности», о чем свидетельствует акт внедрения (Приложение Д).

Методы исследования. При выполнении исследовательских работ в рамках диссертационной работы были использованы:

- Методы системного анализа;
- Методы оценки состояния загрязнения подземных вод;
- Методы прогнозирования состояния загрязнения подземных вод, на основе моделей переноса загрязняющего вещества;
- Численные методы;

-Методы определения источников загрязнения;
-Технологии проектирования и разработки информационно-аналитических систем.

Результаты исследования.

В результате исследования была разработана концепция информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод, определены и адаптированы к условиям региона методы математического и компьютерного моделирования процесса оценки загрязнения подземных вод, разработаны алгоритмы решения задач и численные алгоритмы реализации математических методов и моделей, спроектирована и разработана информационно-аналитическая система.

Разработанная информационно-аналитическая система позволяет автоматизировать процесс комплексной оценки и прогноз качества подземных вод.

Апробация результатов диссертационного исследования. По результатам выполненных научных исследований опубликовано 10 научных публикаций, в том числе 4 работы в научных изданиях, входящих в международную базу данных Scopus (3-в материалах Международных научно-практических конференций и 1-в научном журнале) и 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан. Результаты исследований апробированы на международных и республиканских научных конференциях. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Зеленая экономика-будущее человечества», ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 2014 г., на Международной конференции «Global Conference on Computer Science, Software, Network & Engineering COMENG 2014», Турция, 2014 г., на Международной конференции «15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2015», Болгария, 2015 г., Международной конференции «9th International Conference on Application of Information and Communication technologies AICT 2015», г. Ростов на Дону, РФ, 2015 г., Международной конференции «10th International Conference on Application of Information and Communication technologies AICT 2016», Азербайджан.

Публикации по теме исследования. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, 4 из них в научных журналах, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 4 – в материалах Международных научно-практических конференций, 3 публикации проиндексированы в базе данных SCOPUS, в том числе одна публикация в научном журнале.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 91 наименований и приложений.

1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ КАЧЕСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

1.1 Современное состояние проблемы загрязнения подземных вод

В настоящее время особую актуальность приобретают исследования по региональной оценке подверженности грунтовых вод воздействию различных источников загрязнения. Результатом подобных исследований являются обобщенные показатели уязвимости или защищенности подземных вод по отношению к любому или определенному загрязняющему веществу. Известно, что под защищенностью в современной литературе понимается совокупность природных факторов, препятствующих проникновению загрязнения с поверхности в водоносный горизонт [9]. За рубежом в конце 1960-х в процессе построения карт, визуально отражающих процесс ухудшения качества подземных вод, гидрогеологи начали использовать термин «уязвимость», предложенный французом J. Margat. В России с аналогичной целью использовался термин «защищенность». Наравне с ним в 90-е годы в странах СНГ также получил распространение термин «уязвимость», который имеет разное содержание в зависимости от того, в какой именно области применяется.

Определение «уязвимость является внутренним свойством системы подземных вод, которая зависит от ее чувствительности к антропогенному и/или природному воздействию» [10]. Исследованию и решению проблемы уязвимости подземных вод посвящены работы А.П. Белоусовой, И.С. Зекцера, В.В. Тихомирова, А.А. Потапова, Э. М. Госка, G. Bekesi, J. McConchie, S.Foster[11,12,13,14,15,16,17] и др.

Решению проблемы загрязнения подземных вод также посвящены работы ученых различных регионов Казахстана. В частности, учеными Казахского научно-исследовательского института водного хозяйства (г. Тараз) проведены исследования потенциальных источников загрязнения подземных вод [18]. Специалисты кафедры «Безопасность жизнедеятельности и охраны окружающей среды» ВКГТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск) в своей работе дают обоснование выбора способа очистки подземных вод г. Усть-Каменогорска и прилегающих территорий [19]. Учеными Семипалатинского государственного педагогического института (г. Семей) произведена экологическая оценка химического состава подземных вод бывшего семипалатинского испытательного ядерного полигона [20]. Особое место занимают исследовательские работы ученых и специалистов Института гидрогеологии и гидрофизики им. У.М. Ахмедсафина, посвященных структурному моделированию процессов загрязнения подземных вод в Казахстане [21], математическому моделированию процесса загрязнения подземных вод ртутью [22], автоматизации процессов проектирования математических моделей гидрогеологических объектов [23]. Важным инструментом в решении задач

охраны подземных вод является использование информационных систем для мониторинга подземных вод. В частности, информационные системы учета и мониторинга подземных вод созданы в США [24,25,26,27]. и других странах. Коллективом ВКГТУ им. Д.Серикбаева проводились работы по созданию автоматизированной информационной системы, обеспечивающей защищенную удаленную работу пользователей с базой данных «Подземные воды», входящей в состав Государственного банка данных о недрах Республики Казахстан [28]. Разработка данного программного продукта позволила повысить эффективность формирования и использования информационных ресурсов мониторинга подземных вод Республики Казахстан за счет эксплуатации единой централизованной базы данных «Подземные воды» и организации удаленного доступа к данным на основе защищенных протоколов Интернет.

1.2 Система мониторинга подземных вод в Республике Казахстан

Мониторинг подземных вод является составной частью системы мониторинга водных объектов, которая в свою очередь, согласно водному законодательству РК, входит в состав системы государственного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов и осуществляется на всех водных объектах, составляющих водный фонд Республики Казахстан.

Система мониторинга водных ресурсов в Республике Казахстан функционирует на основе соблюдения основных принципов Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, которая была принята 17 марта 1992 года в Хельсинках и вступила в силу в 1996 г [29]. 28.11.2003 г. в Конвенцию внесены поправки. Республика Казахстан присоединилась к Конвенции Законом Республики Казахстан от 23 октября 2000г. № 94-П О присоединении Республики Казахстан к Конвенции об охране и использовании трансграничных водотоков и международных озер [30].

Согласно Руководящим принципам по мониторингу и оценке трансграничных подземных вод, сформулированными Целевой группой ЕЭК по мониторингу и оценке в соответствии с Конвенцией, мониторинг – это непрерывный процесс временных и пространственных наблюдений за одним или более чем одним элементом окружающей среды. Наблюдения проводятся с определенной целью согласно заранее подготовленному плану с использованием сопоставимых методологий измерения параметров и сбора данных [31]. Мониторинг водных ресурсов как составная часть комплексного мониторинга окружающей среды, представляет собой регулярные наблюдения за их состоянием для постоянной оценки, прогноза и контроля их изменений в результате воздействия на них природных и антропогенных факторов, тем самым обеспечивая систему управления водными ресурсами – своевременной, полной и достоверной информацией об экологической, санитарно-эпидемиологической и водохозяйственной обстановке, как на территории водных бассейнов страны, так и за её пределами.

В процессе мониторинга участвуют ряд государственных ведомств (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1- Состав государственных ведомств РК, участвующих в процессе мониторинга водных объектов

Основная цель мониторинга водных ресурсов является получение информации, необходимой для оценки водных ресурсов или для рассмотрения проблем, связанных с ними.

Основной целью формирования системы мониторинга является создание информационного обеспечения управления государственным водным фондом.

При формировании системы мониторинга за основу взяты положения (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 - Основные положения формирования системы мониторинга

Система мониторинга водных ресурсов призвана решать следующие задачи (рисунок 1.3).

ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА		Получение достоверной и оперативной информации о современной ситуации
		Выявление и оценка источников загрязняющих веществ, определение степени их воздействия на водные экосистемы
		Прогноз изменения качественного состояния водных объектов
		Установление фактов аварийного загрязнения водных объектов, оценка их экологических последствий, оповещение об угрозе

Рисунок 1.3 – Задачи системы мониторинга водных ресурсов

Процесс мониторинга представляет собой циклический процесс (рисунок 1.4), в котором циклы мониторинга должны определяться и планироваться с учетом требуемого информационного продукта и специфики предыдущего компонента «цепочки». При составлении программ и оценки водных ресурсов все заинтересованные стороны должны совместно рассматривать все стадии процесса мониторинга [32].

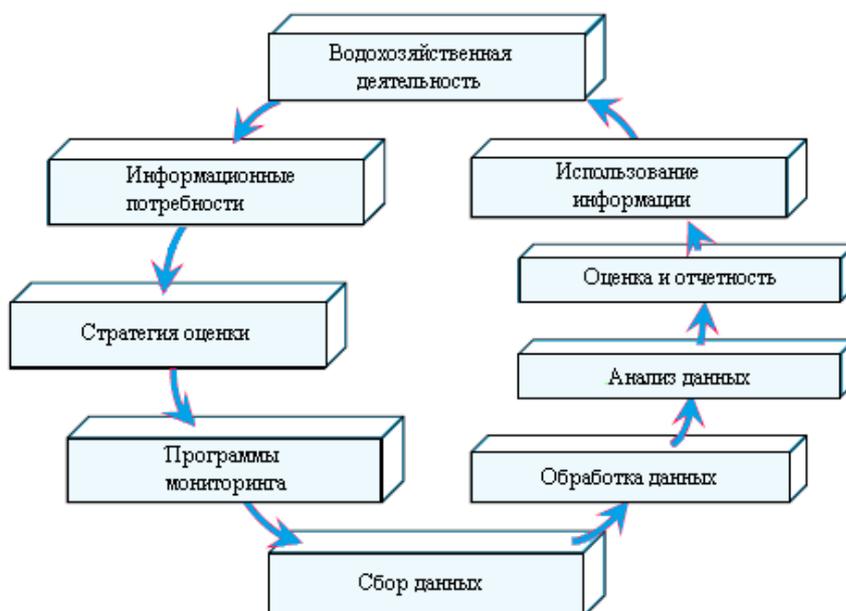


Рисунок 1.4 – Цикличность процесса мониторинга

Источниками информации в системе мониторинга являются первичные данные, извлеченные из различной нормативной, специфической научной литературы, а также других источники (например, базы данных), содержащие информацию статистического или административного характера (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Информационный поток в системе мониторинга водных ресурсов

В настоящее время в Казахстане существует несколько автономно работающих ведомственных систем и служб, осуществляющих наблюдение за состоянием окружающей среды, а также последующую обработку и анализ полученных данных.

Субъектами системы государственного мониторинга являются:

- областные государственные и иные органы и организации, уполномоченные на организацию и ведение экологического мониторинга по отдельным подсистемам на территории области;
- производственные, сельскохозяйственные и другие организации, индивидуальные предприниматели-природопользователи.

Каждый субъект в системе мониторинга производит сбор определенной информации (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Состав субъектов системы мониторинга водных ресурсов и типы собираемых данных

Законодательная база мониторинга водных ресурсов опирается на пакет правительственные документов:

- Экологический кодекс Республики Казахстан от 9 января 2007 г.;
- Водный кодекс Республики Казахстан от 9 июля 2003 г.;
- Закона Республики Казахстан от 24 июня 2010 года "О недрах и недропользовании";
- Постановление Правительства РК «Об утверждении Правил ведения государственного мониторинга водных объектов, государственного учета вод и их использования» от 26.01.2004 г. № 85
- Постановление Правительства РК «Об утверждении Правил осуществления государственного мониторинга недр» от 20 декабря 2010 года № 1373.

Государственный мониторинг недр, включая мониторинг подземных вод осуществляется Комитетом геологии и недропользования Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан.

Основным пользователем информации, полученной в ходе мониторинга для управления водным сектором экономики является

Комитет по водным ресурсам Министерства сельского хозяйства РК
Существуют ряд проблем в мониторинговой системе водных ресурсов РК:

- недостаточное финансирование системы;
- слабо развитая сеть мониторинга;
- работы по сбору информации проводятся в недостаточном объеме и не системно, используются устаревшие методы и оборудование;
- плохое техническое оснащение сети мониторинга и не достаточное применение современных методов;
- не согласованность в работе служб мониторинга различных ведомств и не скоординированное размещение сети мониторинга;

В период с 2008 по 2010 гг. коллективом ВКГТУ им. Д. Серикбаева проводились работы по созданию автоматизированной информационной системы, обеспечивающей защищенную удаленную работу пользователей с базой данных «Подземные воды», входящей в состав Государственного банка данных о недрах Республики Казахстан. Разработка данного программного продукта позволила повысить эффективность формирования и использования информационных ресурсов мониторинга подземных вод Республики Казахстан за счет эксплуатации единой централизованной базы данных «Подземные воды» и организации удаленного доступа к данным на основе защищенных протоколов Интернет (рисунок 1.7).

В результате работы над проектом была создана информационная система, обеспечивающая централизованный способ формирования единой ведомственной БД на основе клиент-серверной архитектуры. На клиентских машинах установлена Интернет-версия клиентского приложения, позволяющая, через единый интерфейс, осуществлять доступ к Республиканской БД.

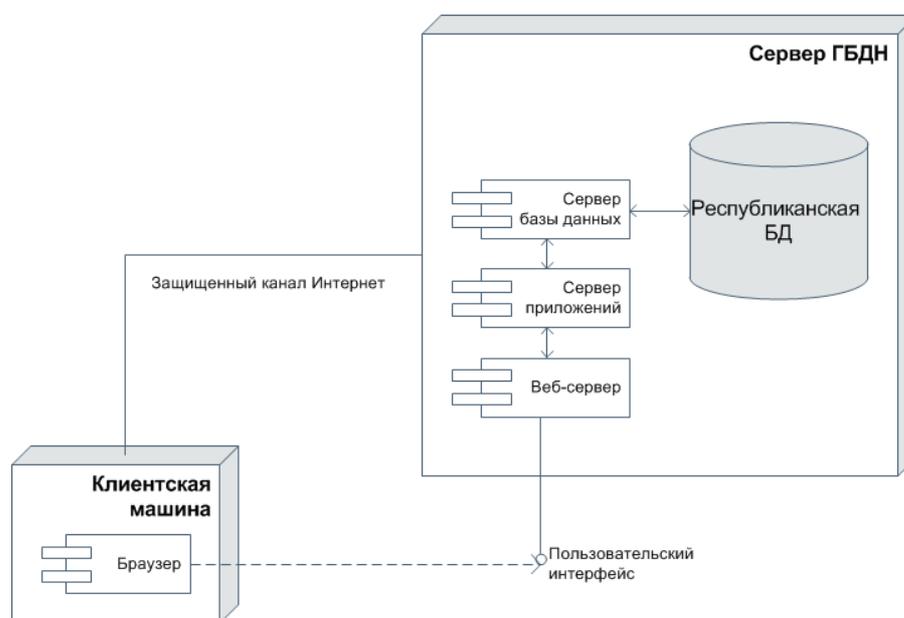


Рисунок 1.7 - Архитектура АИС по использованию БД «Подземные воды»

Однако, в ходе реализации указанного проекта стало очевидно, что необходимо развивать аналитическую составляющую мониторинга подземных вод Республики Казахстан, т.е. переходить от простого сбора и хранения эмпирических данных к их анализу и моделированию, а также прогнозированию состояния подземных вод. База данных, сформированная благодаря функционированию вышеописанной информационной системы, предоставляет богатый эмпирический материал для реализации задач мониторинга подземных вод.

1.3 Анализ гидроэкологической обстановки в Восточном Казахстане

На территории Республика Казахстан сосредоточены значительные водные ресурсы. Система подземных вод подвержена негативному воздействию в результате сброса в водоёмы недостаточно очищенных сточных вод различными предприятиями, расположенными на территории страны.

Восточно-Казахстанская область (ВКО), в силу большей сосредоточенности на территории региона предприятий сельского хозяйства и промышленных предприятий, является одним из наиболее неблагоприятных регионов республики по состоянию окружающей среды, в том числе и гидросферы. Решение проблемы загрязнения поверхностных и подземных вод является одной из первоочередных природоохранных задач в ВКО. Проблема в гидросфере региона обусловлена как количественным истощением природных вод, так и широкомасштабным ухудшением качества воды, что затрудняет полноценно использовать имеющиеся водные ресурсы. Эта проблема касается, в первую очередь, промышленных городов

ВКО и, в том числе, г. Усть-Каменогорска – одного из крупнейших центров цветной металлургии Казахстана.

В связи с этим решение проблемы качества подземных вод приобрело особое значение. В результате мониторинга, проводимого РГП «Казгидромет», выяснилось, что самыми загрязненными в республике являются реки Восточного Казахстана. При этом, самый высокий уровень загрязнения поверхностных вод наблюдается в районах добычи и обогащения полиметаллических руд.

Река Иртыш является водоемом высшего порядка и местным базисом эрозии. Наиболее неблагоприятная обстановка в бассейне реки Иртыш, где экстремально высокие уровни загрязнения цинком и медью рек Глубочанки, Красноярки, Брексы, Ульбы, Бухтармы. В области в результате отработки полиметаллических месторождений открытым способом в 40-50 гг. прошлого столетия забалансовые руды и вскрышные породы складировались в поймах рек без противофильтрационных экранов. Атмосферная влага, накапливающаяся в толщах отвала, превращается в насыщенную металлами серную кислоту и с дренажными водами отвала попадает в грунтовые воды, ручьи и реки. Так, случаи высокого загрязнения (ВЗ) и экстремально высокого загрязнения (ЭВЗ) зарегистрированы в реках Брекса, Тихая, Ульба, каждая из которых последовательно впадает друг в друга и обусловлена историческими загрязнениями. Загрязнение реки Брекса связано с интенсивным загрязнением ручья Мартынов ключ (впадает в р. Брекса) дренажными водами породного отвала Шубинского рудника. Далее Брекса впадает в р.Тихая, где происходит разбавление. И загрязнение цинком р. Брекса с 191,6 ПДК ЭВЗ снижается до 17,4 ПДК, далее ниже по течению - до 12 ПДК.

Случаи высокого загрязнения р.Ульба цинком, марганцем также связаны с процессами выщелачивания токсичных элементов из-под отвала № 2 Тишинского рудника. Отсыпка отвала № 2 Тишинского рудника производилась в период с 1967 по 1977 год без специальной подготовки основания на галечно-вылунные отложения долины реки Ульба. Особенно весом вклад Усть-Каменогорск-Глубоковского, Лениногорского и Зыряновского промузлов [33].

Перечень компонентов в порядке степени опасности: Hg, Tl, Be (I группа – чрезвычайно опасные); Cd, Se, Pb, Li, Ba, Bi, W, As, Ag, Sb, Nb, Sm, Co, Te (II группа – высокоопасные); V, Fe, Cu, Zn, Ni, Eu (III группа – опасные) [34].

Одним из источников загрязняющих веществ, поступающих в водоемы на территории городов, являются очистные сооружения. В данное время наблюдается большая перегрузка очистных сооружений городов Усть-Каменогорска и Семей. Имеет место тепловое загрязнение рек за счет сбросов промышленных предприятий и ГЭС. До сих пор, теперь уже преимущественно на генном уровне, проявляются последствия радионуклеидного загрязнения природных сред, обусловленные

последствиями тридцатилетних испытаний на Семипалатинском ядерном полигоне [35].

В таблице 1.1 приведены очаги загрязнения подземных вод на территория г.Усть-Каменогорск.

Таблица 1.1 Очаги загрязнения подземных вод г. Усть-Каменогорска

Предприятие-загрязнитель	Источники	Загрязняющие вещества
1	2	3
УК ПК МП АО «Казцинк»	Цеха и участки цинкового и свинцового заводов. Случайный розлив электролитов, просачивание с цеховых полов, утечка технологической воды из труб и резервуаров. Щелоки из шлака, клинкера и мышьякового шлама, твердых отходов производства.	Токсичные в-ва: NO _z , NO _a , NH ₄ , Sr, F, Cr, Mo, Mn, Co, Cu, Cd, Hg, Tl, Pb, As, Se, hydrocarbons. Нетоксичные в-ва: Cl, SO ₄ , Na+K, Li, Ca, Mg, Fe, Zn, Al, acidic water.
АО «УМЗ»	Щелоки из шлама и твердых отходов металлургического пр-ва, пр-ва тория, тантала, бериллия, ниобия и азотной кислоты. Щелоки из отвала твердых отходов, расположенного вдоль ж/д, содержат отходы концентратов и оксида урана и ура нового пр-ва.	Токсичные в-ва: NO _a , NH ₄ , F, Mn, Cu, Cd, Tl, Pb, Be, U (возможны), radioactive substances, hydrocarbons. Нетоксичные в-ва: Cl, SO ₄ , Na+K, Li, Ca, Mg, Fe, Zn.
УК КЗ	Щелоки из шлама и минеральных масел, содержащие трихлорбифенил (ПХБ).	Токсичные в-ва: NO ₃ , Mn, most probably PCB and hydrocarbons. Нетоксичные в-ва: Cl, SO ₄ , Na+K, Li, Ca, Mg
АО «УКТМК»	Щелоки из соли электролитов и шлама. Щелоки из шлама.	Токсичные в-ва: NO ₃ , Sr, Mn, Pb, hydrocarbons. Нетоксичные в-ва: NH ₄ , Cl, SO ₄ , Na+K, Li, Ca, Mg, Fe, Zn, Ti.

1	2	3
ТОО АЭС Согринская ТЭЦ. УКТЭЦ	Щелоки из золоотвалов.	Токсичные в-ва: N0 ₃ , F, Sr, Mn, B. Нетоксичные в-ва: Cl, S0 ₄ , Na+K, Ca, Mg, Zn.
ТБО свалка	Щелоки из твердых промышленных отходов. Щелоки из твердых бытовых отходов.	Токсичные в-ва: N0 ₃ , F, Mn, Cd, Pb. Нетоксичные в-ва: Cl, S0 ₄ , Na+K, Ca, Mg, Zn.

Основными факторами, обуславливающими сложную экологическую ситуацию в ВКО, являются:

- загрязненность водных ресурсов Иртышского бассейна;
- уменьшение территорий лесных массивов, что влечет изменение гидрологического баланса;
- кислотные дожди с последующим образованием токсичных солей, связанные с выбросами оксидов серы и оксидов азота предприятиями металлургического и теплоэнергетического комплексов;
- недостаточная сеть пунктов наблюдения за состоянием окружающей среды;
- недостаточное финансирование природоохранных мероприятий;
- слабая востребованность научно-технического потенциала ВКО предприятиями - природопользователями;

Все эти факторы, в первую очередь, негативно влияют на ухудшение качества жизни населения региона, особенно детского. Поэтому решение проблемы качества водных ресурсов, в том числе подземных вод, являющихся основным источником питьевой воды, является стратегической задачей политики администрации региона.

Проведенный анализ литературных источников, систем мониторинга, современного состояния проблемы загрязнения подземных вод, системы мониторинга подземных вод в РК, гидроэкологической обстановки в регионе позволяет сделать вывод о необходимости данного диссертационного исследования и сформировать цель работы.

На основании изученного материала сформулированы задачи, необходимые для достижения цели диссертационной работы, пути ее достижения и основные положения научных исследований.

Задачи, необходимые для достижения цели:

- осуществить анализ проблемы и перспектив применения методов математического и компьютерного моделирования, информационных технологий для мониторинга системы подземных вод;

- разработать алгоритм оценки и прогнозирования состояния загрязнения подземных вод, определения источников загрязнения на основе

математических методов и моделей с учетом условий региона, то есть содержания и состава загрязняющих веществ, строения и состава водоносных пород, условий в которых происходит перенос загрязняющего вещества;

- разработка алгоритмов решения поставленных задач и численных алгоритмов реализации методов и моделей;

- разработка технологии подготовки данных для повышения их качества;

- проектирование архитектуры информационной системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод;

- разработка информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод.

Выводы по разделу

- анализ состава и функциональных возможностей региональной системы экологического мониторинга показал, что при оценке и прогнозе загрязнения подземных вод используется ограниченный набор стандартных расчетных методик и практические рекомендации специалистов;

- анализ существующих инструментальных средств поддержки информационных технологий экологического мониторинга показал, что для повышения эффективности мониторинга загрязнения подземных вод требуется разработать алгоритм комплексного применения методов и моделей, основанных на стандартных инженерных расчетах и методиках, базирующихся на математическом моделировании распространения загрязнения в системе подземных вод с учетом геогидрохимических условий и локализации источников загрязнения;

- согласно современной концепции разработки информационных систем экологического мониторинга (ИСЭМ) в системе экологического мониторинга загрязнения подземных вод необходимо использовать технологии визуализации результатов прогноза и оценки загрязнения подземных вод с помощью современных геоинформационных технологий.

2 МЕТОДЫ И МОДЕЛИ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

2.1 Оценка состояния загрязнения подземных вод на основе математико-статистических методов

Методы оценки состояния уровня загрязнения подземных вод, а именно степени, интенсивности и масштаба загрязнения основаны на математико-статистических расчетах, выполняемых на основе общих и специальных показателей. В процессе оценки осуществляется сравнение измеренных значений показателей с фоновыми значениями и предельно-допустимыми нормативными значениями. Данные методы включают в себя систему критериев.

Количественными критериями, относительно которых характеризуется изменение качества воды, являются показатели ее фонового качества и показателе качества хозяйственного использования.

Фоновое качество подземных вод характеризуется показателями (сухой остаток, общая жесткость, концентрация отдельных веществ и др.), которые свойственны этим водам до начала интенсивного техногенного воздействия. Например, качество подземных вод до строительства и эксплуатации промышленного или агропромышленного объекта или качество воды на водозаборном сооружении до начала подтягивания к нему некондиционных вод.

Показатели качества (допустимые нормы), определяющие возможность хозяйственного использования подземных вод по тону или иному назначению, характеризуются специальными требованиями. Качество питьевых вод определяется требованиями ГОСТ 2874-82. "Вода питьевая". Допустимые нормы для питьевых вод включают предельно допустимые концентрации (ПДК) отдельных химических веществ в подземных водах, предельно допустимые значения микробиологических показателей, предельно допустимые значения органолептических показателей.

Обозначим показатели фонового и предельно допустимого качества соответственно через C_{ϕ} и $C_{п}$, где обычно $C_{\phi} < C_{п}$.

Выделяется две степени загрязнения [36]:

I – допредельная, концентрация C загрязняющего вещества больше C_{ϕ} , но меньше $C_{п}$, т.е.

$$C_{\phi} < C < C_{п} \text{ или } \bar{C}_{\phi} < \bar{C} < C, \quad \text{где } \bar{C}_{\phi} = \frac{C_{\phi}}{C_n}, \bar{C} = \frac{C}{C}; \quad (2.1)$$

II – запредельная концентрация загрязняющего вещества больше $C_{п}$, т.е.

$$C > C_{п} \text{ или } C > I.$$

Первая степень соответствует начальной стадии загрязнения. Во второй степени выделяются следующие градации (подстепени):

Па. $I < \bar{C} < 10$; Пб. $10 < \bar{C} < 100$; Пв. $\bar{C} > 100$.

Градация Пв характеризует экстремальное загрязнение.

При изучении загрязнения подземных вод выделяется, в основном, вторая степень с указанием градаций Па, Пб и Пв. Это относится к участкам промышленных и других объектов, являющихся источниками загрязнения, а также к выделению областей загрязнения по скважинам региональной опорной наблюдательной сети. На участках водозаборных сооружений выделяются степени I и Па.

Показатели загрязнения подземных вод.

Характеристика очагов загрязнения подземных вод дается, прежде всего, по общим показателям; дополнительной является характеристика по специальным показателям (таблица 2.1).

К общим показателям относятся: минерализация (М), общая жесткость (Ж), окисляемость перманганатная (О), температура (t), величина рН, содержание хлоридов (Cl⁻), сульфатов (SO₄²⁻), нитратов (NO₃⁻), фтора (F⁻), железа (Fe), марганца (Mn), меди (Cu²⁺), цинка (Zn²⁺), свинца (Pb²⁺), содержание нефтепродуктов (н/п).

Специальные показатели включает набор определений, выполняемых при полном химическом анализе; содержание хлорорганических пестицидов, бензапирена, СПАВ, фенола, специфические вещества, характерные для конкретных объектов.

Таблица 2.1– Общие и специальные показатели

Общие показатели	Специальные показатели
<ul style="list-style-type: none">- минерализация (М),- общая жесткость (Ж),- окисляемость перманганатная (О),- температура (t),- величина рН,- содержание хлоридов (Cl⁻);- содержание сульфатов (SO₄²⁻),- содержание нитратов (NO₃⁻);- содержание фтора (F⁻),- содержание железа (Fe);- содержание марганца (Mn);- содержание меди (Cu²⁺),- содержание цинка (Zn²⁺),- содержание свинца (Pb²⁺),- содержание нефтепродуктов (н/п).	<ul style="list-style-type: none">- содержание хлорорганических пестицидов,- содержание бензапирена,- СПАВ,- фенола,- специфические вещества, характерные для конкретных объектов.

При характеристике качества воды обязателен учет органолептических и микробиологических показателей.

Методика определения окисляемости перманганатной и содержания нефтепродуктов изложена в работах [37,38,39], величины рН в работе [40], температуры - в работе [41].

Различают химическое и тепловое загрязнения подземных вод. Особенно распространено химическое. Нередко химическое и тепловое загрязнения проявляются совместно.

Оконтуривание области загрязнения

Область загрязнения оконтуривается по линии минерализации I г/л или по линии предельных значений других обобщенных показателей (общей жесткости, окисляемости перманганатной), или по линии ПДК для наиболее характерного загрязняющего компонента, или по линии ПДК группы основных загрязняющих компонентов. В последнем случае (например, для трех загрязняющих веществ) контур области загрязнения должен проходить через точки, в которых соблюдается условие

$$\frac{C_1}{C_{1n}} + \frac{C_2}{C_{2n}} + \frac{C_3}{C_{3n}} = 1, \quad (2.2)$$

где C_1 , C_2 и C_3 – фактические содержания трех выделенных загрязняющих веществ в подземных водах;

C_{1n} , C_{2n} и C_{3n} – предельно допустимые концентрации (ПДК) этих веществ.

Точки, в которых сумма относительных концентраций (C/C_n) загрязняющих веществ больше 1, попадают в область загрязнения.

Значение ПДК для указанных показателей загрязнения согласно ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая» составляют: сухой остаток 1000 мг/л, общая жесткость 7 моль/м³, хлориды 350 мг/л, сульфаты 500 мг/л, нитраты 45 мг/л (или 10 мг/л в пересчете на азот), фтор 0,7-1,5 мг/л (в зависимости от климатического района), медь 1 мг/л, цинк 5 мг/л, свинец 0,03 мг/л, железо мг/л, марганец 0,1 мг/л. Предельная величина окисляемости перманганатной составляет 2 мг/л для источника первого класса качества и 5 мг/л для источника второго класса качества.

Например, область загрязнения оконтуривается по величине минерализации, существенно превышающей фоновую. В загрязненной воде содержатся в значительных количествах по сравнению с фоном хлориды, нитраты, тяжелые металлы (медь, цинк, свинец). В этом случае область загрязнения характеризуется величиной минерализации (сухим остатком), концентрациями хлоридов, нитратов, тяжелых металлов. Другой пример. Область загрязнения оконтуривается по величине общей жесткости, в воде в повышенных количествах содержатся фтор и нефтепродукты. В этом случае

область загрязнения характеризуется величиной общей жесткости, концентрациями фтора и нефтепродуктов.

Оконтуривание области загрязнения основывается на построении триангуляции, то есть планарного графа, все внутренние области которого являются треугольниками, и расчете изолинии по полученной триангуляции. Вершинами треугольников, составляющих триангуляцию, являются точки, соответствующие скважинам водозаборов, а также фиктивные скважины с нулевой концентрацией загрязняющего вещества, ввод которых необходим для расчета точек изолиний на ребрах графа, соединяющих точки с концентрацией $ZB > 1$.

Задача, построения триангуляции по исходному набору точек является неоднозначной. Существует множество видов триангуляций и методов их построения. Наиболее приемлемой для задач картографии считается триангуляция Делоне [42].

Проверка условия Делоне для пары треугольников заключается, собственно, в проверке, не попадает ли вершина смежного треугольника в окружность, описанную вокруг данного треугольника.

$$\begin{aligned}
 k &= x_{P1}^2 + y_{P1}^2; \\
 m &= x_{P2}^2 + y_{P2}^2; \\
 n &= x_{P3}^2 + y_{P3}^2; \\
 a &= x_{P1} \cdot (y_{P2} - y_{P3}) + x_{P2} \cdot (y_{P3} - y_{P1}) + x_{P3} \cdot (y_{P1} - y_{P2}); \\
 b &= k \cdot (y_{P2} - y_{P3}) + m \cdot (y_{P3} - y_{P1}) + n \cdot (y_{P1} - y_{P2}); \\
 c &= k \cdot (x_{P2} - x_{P3}) + m \cdot (x_{P3} - x_{P1}) + n \cdot (x_{P1} - x_{P2}); \\
 d &= k \cdot (x_{P2} \cdot y_{P3} - x_{P3} \cdot y_{P2}) + m \cdot (x_{P3} \cdot y_{P1} - x_{P1} \cdot y_{P3}) + n \cdot (x_{P1} \cdot y_{P2} - x_{P2} \cdot y_{P1}).
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Условие Делоне не выполняется при выполнении соотношения

$$a \cdot (x_{P0}^2 + y_{P0}^2) - b \cdot x_{P0} + c \cdot y_{P0} < d
 \tag{2.4}$$

и требуется перестроение двух рассматриваемых треугольников.

Треугольник триангуляции считается удовлетворяющим условию Делоне, если этому условию удовлетворяет триангуляция, составленная только из этого треугольника и трех его соседей (если они *существуют*, т.е. рассматриваемый треугольник не примыкает к границе области) [42].

Следовательно, проверив рассматриваемый треугольник на выполнение условия Делоне по отношению к трем смежным треугольникам, и, при необходимости, проведя перестроения, можно утверждать, что треугольник удовлетворяет условию Делоне.

Таким образом, важнейшим свойством триангуляции Делоне является то, что она может быть получена из любой другой выпуклой триангуляции

последовательным перестроением пар соседних треугольников, не удовлетворяющих условию Делоне.

Существует несколько способов построения триангуляции Делоне. Все они сводятся к последовательному добавлению точек в частично построенную триангуляцию Делоне и проверке условия Делоне для вновь образованных треугольников. В случае невыполнения этого условия производятся необходимые перестроения до тех пор, пока триангуляция снова не будет полностью удовлетворять условию Делоне [42].

Изначально триангуляция строится на минимальном наборе точек. При добавлении каждой новой точки определяется ее местоположение в триангуляции (локализация) и происходит построение новых треугольников. При этом возможны две ситуации: добавляемая точка попадает внутрь или вне триангуляции. В первом случае делению на несколько новых треугольников подлежит треугольник, внутри которого оказалась добавляемая точка. Во втором случае необходимо построение дополнительных, внешних к текущей триангуляции, треугольников, причем их количество заранее не определено, а процедура построения довольно сложна. Для упрощения алгоритма добавления новой точки в триангуляцию необходимо гарантировать, что все точки, добавляемые в триангуляцию, будут расположены внутри нее. Для этого в качестве первоначального набора точек не обходимо взять только точки, принадлежащие выпуклой оболочке исходного множества точек, и построить на этом наборе триангуляцию Делоне. После добавления каждой новой точки производится проверка условия Делоне для всех вновь образованных пар треугольников. Если для какой-либо пары условие не выполняется, происходит перестроение этой пары.

Исходные данные для реализации метода триангуляции представляют собой список точек (узлов будущей триангуляции). В контексте рассматриваемой проблемы, а именно построения контура области загрязнения подземных вод, точки соответствуют скважинам режимной сети системы подземных вод г. Усть-Каменогорск. Каждая точка представляет собой набор трех значений: координат точки на плоскости и некоторого значения в этой точке (далее именуемого высотой).

Построение выпуклой оболочки. На первом этапе построения определяется точка, явно принадлежащая выпуклой оболочке. Она должна иметь максимальное значение по оси ординат. Если таких точек несколько, то из их числа выбирается та, которая имеет минимальное значение по оси абсцисс (рис. 2, точка 1). Найденная точка добавляется в выпуклую оболочку. На следующем шаге осуществляется процесс «заворачивания», который состоит в сравнении углов между базовым вектором, соединяющим предпоследнюю и последнюю точки выпуклой оболочки, и всеми возможными векторами, соединяющими последнюю точку выпуклой оболочки со всеми существующими точками (рис. 2.1).

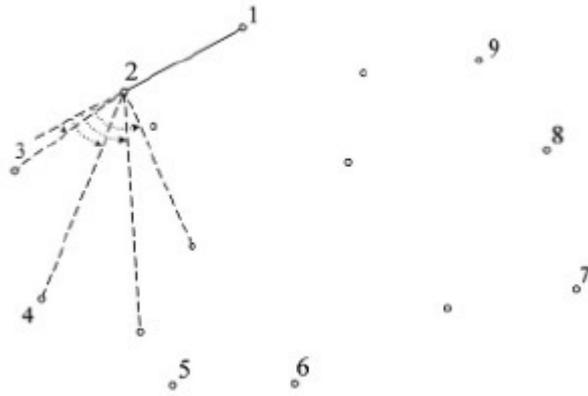


Рисунок 2.1 – Начальная точка выпуклой оболочки

Так как на первом шаге *выпуклая* оболочка содержит только одну точку, то в качестве базового вектора берется горизонтальный вектор произвольной длины, направленный влево и проходящий в точку 1. Та точка, при рассмотрении которой угол между векторами оказался минимален, и будет следующей точкой выпуклой оболочки. Процесс повторяется до тех пор, пока вновь найденная точка не будет являться первой точкой выпуклой оболочки (рис. 2.2). Все точки, не попавшие в состав выпуклой оболочки, будут внутренними для этой оболочки.

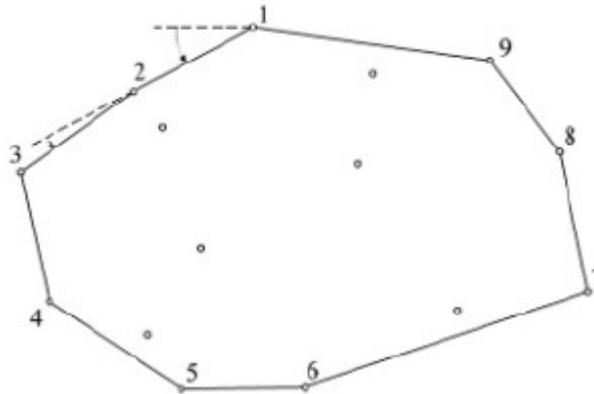


Рисунок 2.2 – Построение выпуклой оболочки

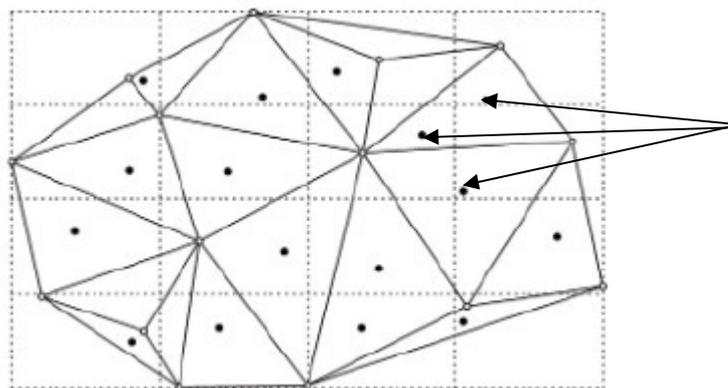
Построение триангуляции Делоне

Начальная триангуляция Делоне строится на основе только тех точек, которые принадлежат выпуклой оболочке. Создаются треугольники, одной из вершин которых является первая точка выпуклой оболочки, а двумя остальными - все возможные пары соседних точек выпуклой оболочки. Далее выполняется проверка выполнения условия Делоне для всех пар треугольников. Пары треугольников, не удовлетворяющие условию, перестраиваются.

После того, как первоначальная триангуляция построена, производится последовательное добавление точек, еще не включенных в триангуляцию. Каждая новая точка локализуется, и происходит добавление новых

треугольников. После чего выполняется процесс проверки условия Делоне для всех вновь образованных пар треугольников и делаются необходимые перестроения.

Самым трудоемким шагом этого этапа является локализация точки. Нелинейность зависимости времени локализации точки от количества точек, уже включенных в триангуляцию при последовательном переборе треугольников, очень сильно выражена. Для сокращения времени перебора применяется метод динамического кэширования поиска, заключающийся в построении кэша - специальная структура, позволяющая за короткое время найти некоторый треугольник, близкий к искомому. Кэш представляет собой сетку (рис. 2.3), в каждой ячейке которой находится ссылка на некоторый треугольник триангуляции. Ссылка ячейки обновляется в момент добавления нового или при перестроении уже существующего треугольника, центр масс которого расположен в пределах этой ячейки. В результате перестроений на какие-то треугольники могут ссылаться несколько ячеек, а на другие может не быть ни одной ссылки.



Ссылки ячеек кэша на
треугольники, с
которых начинается
локализация точки

Рисунок 2.3 - Кэш

Далее в окрестности найденного треугольника производится поиск искомого треугольника (рис. 2.4). Для этого осуществляется проверка треугольников, смежных треугольнику, найденном при помощи кэша. Если среди них не будет найден искомый треугольника, в очередь поиска добавляются треугольники, смежные с только что проверенными треугольниками, за исключением тех, по ссылке с которых был осуществлен переход на данные треугольники. Процесс продолжается до тех пор, пока искомый треугольник не будет обнаружен.

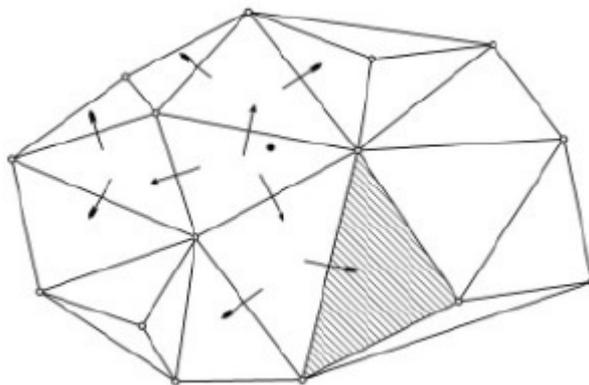


Рисунок 2.4 – Поиск искомого треугольника

Для увеличения скорости работы кэша используется метод динамического кэширования. Суть этого метода заключается в создании кэша динамически изменяемого размера. Размер кэша зависит от количества точек триангуляции. При добавлении в триангуляцию новых точек, при достижении некоторого их порогового количества, разбиение кэша увеличивается в два раза по обеим осям координат.

В качестве начального размера кэша берем сетку $m \times m$, где m кратно 2, причем m - максимально возможное число, меньшее, чем $2 \cdot \sqrt{\frac{n}{R}}$, где n - количество точек, заносимых в кэш первоначально,

R - константа, задающая скорость роста кэша. Ее оптимальное значение определяется опытным путем. Также определяется очередное пороговое значение, при достижении которого произойдет увеличение кэша: $R \cdot m^2$.

Часто детализации триангуляции, построенной на исходных данных, не достаточно для полноценного построения изолиний. Необходимо искусственное повышение детализации путем более мелкого разбиения треугольников. Степень детализации зависит от заданного параметра разбиения \mathcal{E} , т.е. разбиению подлежат все стороны треугольников, длина которых больше этого параметра.

Для уменьшения количества искажений процесс разбиения проводится в несколько этапов. В качестве начального параметра разбиения берется значение, равное половине длины самого длинного ребра триангуляции. На каждом новом этапе текущий параметр разбиения уменьшается вдвое до тех пор, пока не станет равным параметру разбиения \mathcal{E}

Разбиение заканчивается, когда после очередного этапа не останется ни одного ребра, подлежащего разбиению.

При разбиении ребра триангуляции происходит добавление нового узла. Возникает задача определения его высоты. Простая линейная интерполяция по высотам смежных узлов практически не имеет смысла, поэтому используется метод кубической интерполяции [43].

Вначале осуществляется поиск векторов нормалей $N1$ и $N2$ к искомой поверхности в узлах 1 и 2 соответственно (рис. 2.5).

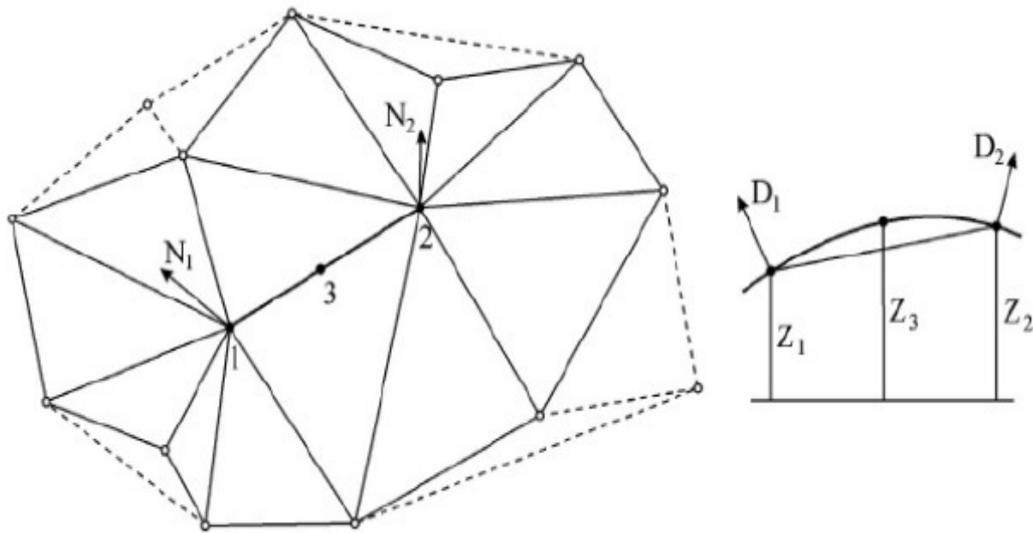


Рисунок 2.5 – Вычисление высоты в добавляемом узле (точка 3) триангуляции (вид сверху и в вертикальном разрезе)

Примем обозначение точек 1 и 2 как $P1$ и $P2$, а отрезок соединяющий данные точки как 1-2. Находится нормаль ($N12$) к вертикальной плоскости, в которой лежит отрезок, соединяющий точки 1-2:

$$\begin{aligned} x_{N12} &= y_{P2} - y_{P1}; \\ y_{N12} &= -x_{P2} - x_{P1}; \\ z_{N12} &= 0. \end{aligned} \tag{2.4}$$

Затем определяются векторы $D1$ и $D2$, представляющие проекции векторов нормалей $N1$ и $N2$:

$$\begin{aligned} D1 &= N1 \times N12; \\ D2 &= N2 \times N12. \end{aligned} \tag{2.5}$$

На следующем шаге вычисляется длина проекции отрезка 1-2 на горизонтальную плоскость:

$$l = \sqrt{(x_{P2} - x_{P1})^2 + (y_{P2} - y_{P1})^2} \tag{2.6}$$

Затем нужно определить производную на концах отрезка 1-2.

$$z_{P1}' = \frac{z_{D1}}{\sqrt{x_{D1}^2 + y_{D1}^2}};$$

$$z_{P2}' = \frac{z_{D2}}{\sqrt{x_{D2}^2 + y_{D2}^2}}.$$
(2.7)

Значение кубического сплайна в центре отрезка 1—2 задается формулой:

$$z_{P3} = \frac{(z_{P1}' + z_{P2}') \cdot l - 2 \cdot z_{P2} - z_{P1}}{8} + \frac{3 \cdot (z_{P2} - z_{P1}) - (2 \cdot z_{P1}' + z_{P2}') \cdot l}{4} + \frac{z_{P1}' \cdot l}{2} + z_{P1},$$
(2.8)

где z_{P3} - искомая высота в центре отрезка 1-2 [42,43].

На краях триангуляции возможно существование сильно выпянутых треугольников. Вызвано это тем, что при построении выпуклой оболочки расстояние между ближайшими точками этой оболочки может значительно превосходить среднюю длину дуг триангуляции. Такие треугольники не всегда корректно описывают поверхность, заданную исходными данными. Для устранения этого эффекта необходимо отслеживать такие треугольники и исключить их из расчетов.

Выявления таких треугольников можно осуществить при помощи проверки косинусов его углов. Если косинус хотя бы одного угла проверяемого треугольника больше заданного значения (например 0,99), треугольник считается некорректным и исключается.

Процесс повышения детализации для исходной триангуляции показан на рис. 2.6.

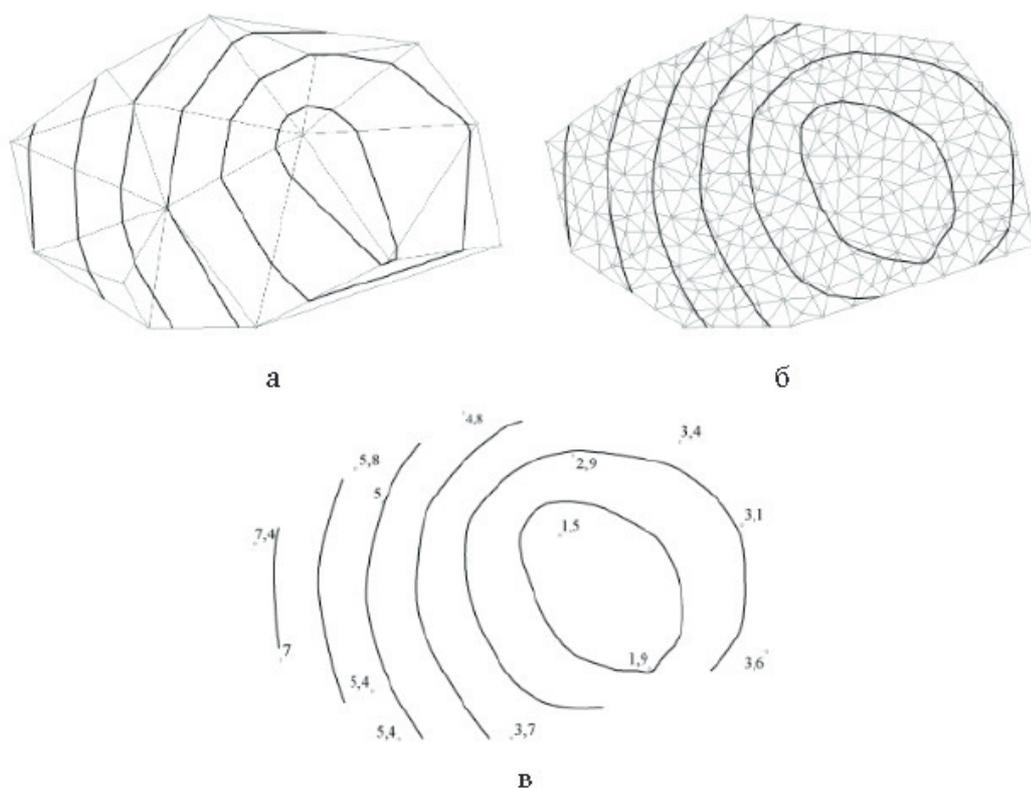


Рисунок 2.6 – Повышение детализации исходной триангуляции Делоне
 а)- триангуляция по исходным точкам; б)- промежуточный этап;
 в)- изолинии на основе повышения детализации

Для построения изолиний нужно реализовать следующие шаги:

- 1) выбор определенного значения изолинии h ;
- 2) проверка присутствия в триангуляции хотя бы одного узла, у которого значение высоты совпадает со значением изолинии h . В случае существования такого узла, значение изолинии уменьшается на некоторое маленькое значение dh и вновь выполняется проверка;
- 3) отметка всех треугольников, через которые проходит изолиния со значением;
- 4) поиск первого отмеченного треугольника, формирование массива для хранения узлов изолинии;
- 5) отслеживание пути изолинии в обе стороны от текущего треугольника (найденные узлы добавляются в массив); данный процесс продолжается до тех пор, пока изолиния не замкнется или не выйдет на границу триангуляции; со всех треугольников, участвующих в обходе, отметка снимается;
- 6) пункты 4 и 5 повторяются до тех пор, пока не закончатся помеченные треугольники.

Построение изоконтуров

Изоконтуром между уровнями высот h_1 и h_2 называют замыкание геометрического места точек на поверхности, имеющих высоту $h \in [h_1, h_2)$

[42]. Изоконтуров строятся на основе изолиний. Замкнутые изолинии уже являются изоконтуром и сразу добавляются в список изоконтуров.

Формируется граф, в качестве узлов которого выступают точки выхода незамкнутых изолиний на границу триангуляции, а в качестве ребер - сами незамкнутые изолинии (ребра первого типа) и фрагменты граничной оболочки (ребра второго типа), на которые граничная оболочка была разделена точками выхода. Причем каждая незамкнутая изолиния входит в граф два раза - выше двух одинаковых ребер, но ориентированных в разные стороны. А ребра, полученные из кусочков граничной оболочки, ориентируются так, чтобы внутренность триангуляции находилась справа по ходу движения при обходе триангуляции по граничной оболочке. В результате в каждом узле графа сходятся два ребра первого типа и два ребра второго типа.

Сборка каждого очередного изоконтура начинается из любого узла, имеющего ребра, и заключается в последовательном обходе ребер графа с учетом их ориентации, и с обязательным чередованием типа ребер. При попадании в узел графа, с которого начинался обход, изоконтур считается собранным, а ребра, использованные в обходе, удаляются из дальнейшего рассмотрения.

Для каждого собранного контура определяется, какому диапазону высот он принадлежит. Для этого используется любое ребро триангуляции, принадлежащее выпуклой оболочке и использованное для построения рассматриваемого изоконтура.

Для того чтобы при графическом отображении набора изоконтуров все они были видны, вначале необходимо рисовать изоконтуров, полученные из незамкнутых изолиний. Остальные изоконтуров перед изображением следует подвергнуть сортировке по их площади в направлении убывания.

Площадь изоконтура может быть вычислена по формуле

$$S = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot (y_{i-1} - y_{i+1}) \quad (2.9)$$

S - вычисляемая площадь изоконтура; n - количество точек, задающих изоконтур; x_i -абцисса i-й точки, y_i -ордината i-й точки.

На рисунке 2.7 показаны скважины, располагающиеся на территории исследуемой промышленной площадки с условной площадью 8 кв.км. Каждая скважина пронумерована, а цифры в скобках отображает значение

$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{in}}$ в данной скважине.

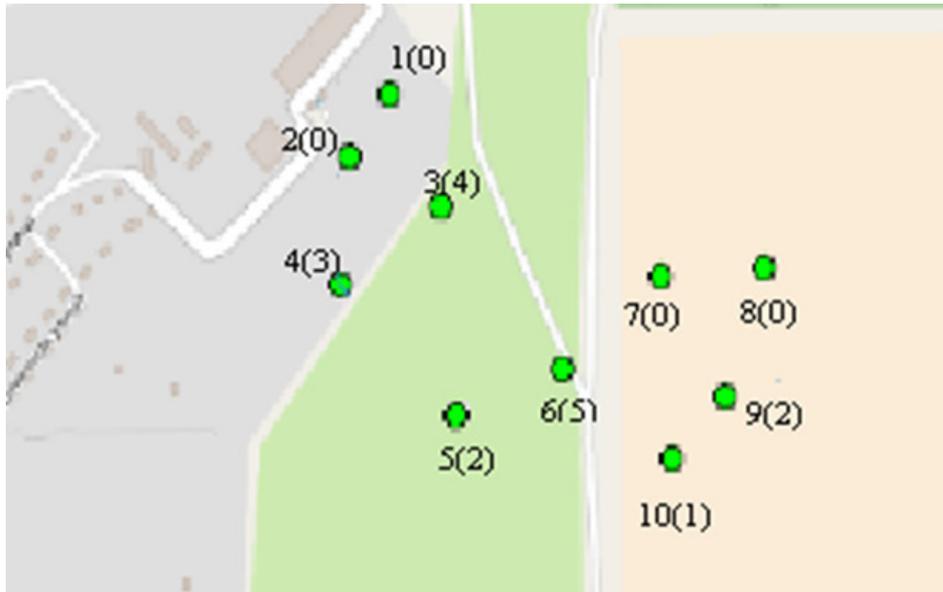


Рисунок 2.7 – Карта со скважинами

Так контур области загрязнения должен проходить через точки, в которых выполняется условие $\sum_1^n \frac{C_i}{C_{in}} = 1$, а в некоторых точках данная величина превышает значение 1, то требуется добавление фиктивных точек, для которых значение $\sum_1^n \frac{C_i}{C_{in}}$ примем равным 0. Фиктивные точки добавляются для точек, в которых наблюдается $\sum_1^n \frac{C_i}{C_{in}} > 1$ по следующим правилам:

- данная точка является крайней;
- в окрестности данной точки не располагается фактическая точка, для которой $\sum_1^n \frac{C_i}{C_{in}} = 0$;
- фиктивную точку следует выбрать на прямой, перпендикулярной ребру треугольника, противоположной точке, для которой добавляется фиктивная точка;
- расстояние между добавляемой фиктивной точкой и фактической устанавливается равной среднему значению всех возможных ребер графа;

На рисунке 2.8 синие точки – добавленные фиктивные точки (скважины).

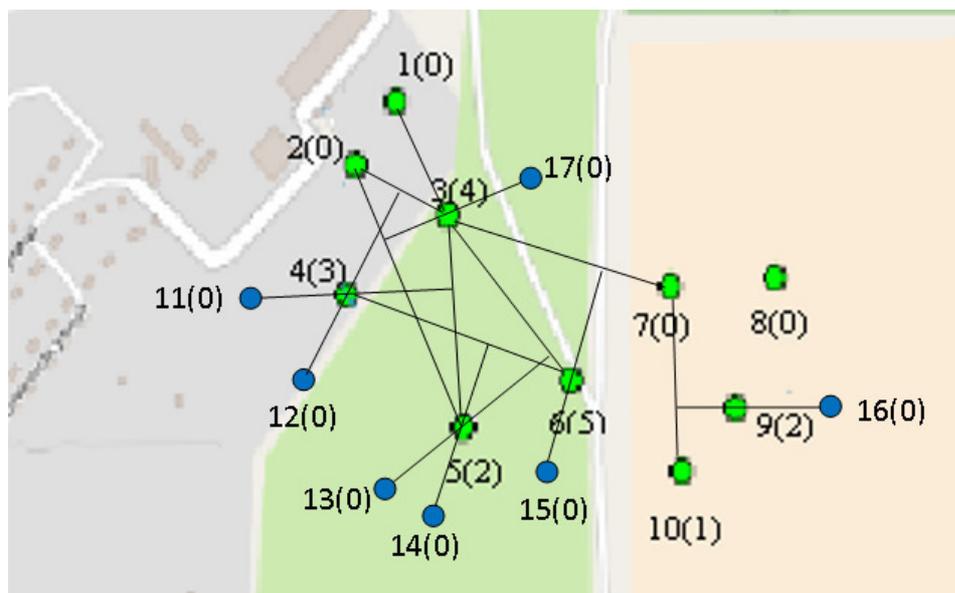


Рисунок 2.8 – Схема скважин с добавленными фиктивными скважинами

При построении контура и вычислении площади области загрязнения, опорными узлами планарного графа триангуляции будут являться точки, для которых выполняется условие $\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{in}} = 1$ (рисунок 2.9). На рисунке опорные точки красного цвета.

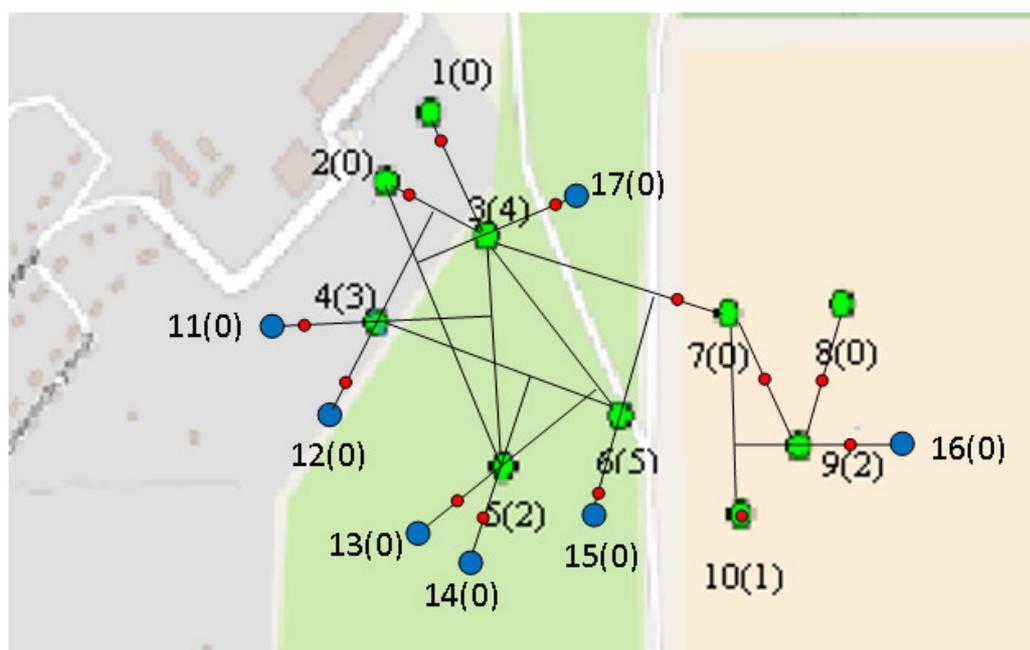


Рисунок 2.9 – Построение опорных узлов планарного графа триангуляции

В результате оконтуривания на основе метода триангуляции была получена следующая область загрязнения ПВ, расчетная площадь которой составила 3,2 кв.км (рис.2.10).

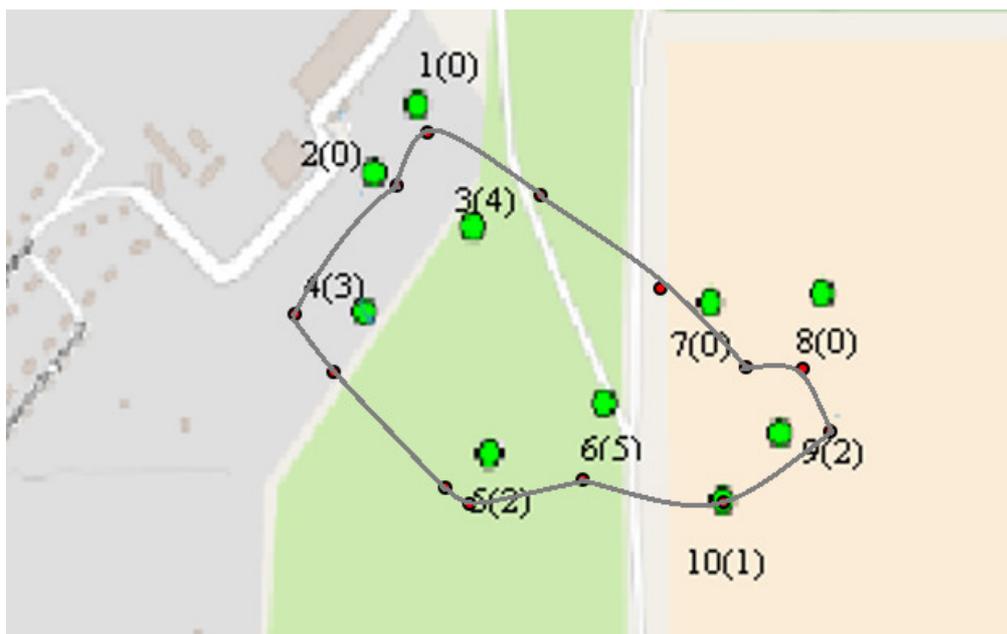


Рисунок 2.10 – Результат оконтуривания области загрязнения

Оценки масштабов загрязнения подземных вод.

Масштабы загрязнения подземных вод, вызванного антропогенными (техногенными) источниками, оцениваются через следующие показатели: размеры (площадь) области загрязнения, интенсивность загрязнения, скорость перемещения границы области загрязнения.

Площадь области загрязнения. Определяется величиной, площади, заключенной внутри границы предельной минерализации 1 г/л. Градации размеров площадей загрязнения представлены в табл.2.2.

Таблица 2.2 - Градации площадей (F) загрязнения подземных вод

Градации	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Площадь F, км ²	<1	1-5	5-10	10-20	20-50	50-100	100-200	>200

Интенсивность загрязнения. Интенсивность загрязнения подземных вод характеризуется следующими относительными величинами:

- средней минерализацией (\bar{M}) внутри области загрязнения, ограниченной контуром 1 г/л (если область загрязнения выделяется по минерализации);
- средними величинами других обобщенных показателей качества воды (общей жесткости, окисляемости перманганатной);
- средними концентрациями отдельных веществ внутри области загрязнения;
- температурой подземных вод внутри области загрязнения.

Относительная средняя величина минерализации воды (или других показателей её качества) определяется как отношение средней минерализации воды (или средних величин других показателей качества воды) к предельно допустимой минерализации воды (к предельно допустимым значениям других показателей качества воды), т.е. $\bar{M} = \frac{M}{M_n}$

Относительная средняя температура воды определяется как отношение средней температуры воды внутри области загрязнения к фоновой температуре воды (за пределами области загрязнения).

Средняя минерализация воды (M) приближенно может быть определена как среднеарифметическая величина отдельных значений минерализации (M_1, M_2, \dots, M_n) по скважинам внутри области загрязнения

$$M = \frac{M_1 + M_2 + \dots + M_n}{n}, \quad (2.10)$$

где, n – количество точек (скважин, колодцев).

Если внутри области загрязнения выделяется n участков с разными минерализациями воды M_1, M_2, \dots, M_n и известны площади F_1, F_2, \dots, F_n этих участков, то средняя минерализация определяется как средневзвешенная по площади:

$$M = \frac{M_1 F_1 + M_2 F_2 + \dots + M_n F_n}{F_1 + F_2 + \dots + F_n} \quad (2.11)$$

В случае группы характеристик загрязняющих веществ (например, три вещества) интенсивность загрязнения равно сумме относительных концентраций этих веществ:

$$C = \frac{C_1}{C_{1n}} + \frac{C_2}{C_{2n}} + \frac{C_3}{C_{3n}} \quad (2.12)$$

Градации интенсивности загрязнения полезных вод характеризуемой величиной относительной минерализации M или величинами относительных значений других показателей качества $\bar{Ж} = \frac{Ж}{Ж_n}$, $\bar{0} = \frac{0}{0_n}$, $\bar{C} = \frac{C}{C_n}$, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3-Градации интенсивности загрязнения

Градации	А	Б	В	Г	Д	Е
Величина \bar{M}	1-5	5-10	10-30	30-50	50-100	>100

Величина относительной средней минерализации совпадает с абсолютной средней минерализацией, так как предельно допустимая минерализация для питьевых вод равна 1 г/л.

Если область загрязнения выделяется не только по минерализации, то кроме величины \bar{M} приводятся значения других показателей качества воды, указанных ранее.

Отдельные показатели могут отсутствовать в подземных водах; в этом случае они не приводятся.

Таким образом, интенсивность загрязнения подземных вод характеризуется относительными средними величинами следующих показателей: $\bar{M}, \bar{Ж}, \bar{0}$.

В этом перечне t - относительная средняя температура; одновременно должна быть указана фоновая температура (t_{ϕ}).

Сверх этого перечня могут быть приведены сведения о других компонентах загрязнения подземных вод, если они содержатся в значительных количествах. При этом должны быть указаны и ПДК этих веществ.

Наряду с указанием относительных средних минерализации (\bar{M}) и средних концентраций веществ (\bar{C}) целесообразно указать относительные максимальные значения \bar{M}_{\max} и \bar{C}_{\max} , и площади \bar{M}_{\max} и \bar{C}_{\max} .

Скорость перемещения границы области загрязнения. Скорость V перемещения границы области загрязнения находится по данным режимных наблюдений и оценивается по формуле

$$V = \frac{x}{t}, \quad (2.13)$$

где x - расстояние, на которое сместилась граница области загрязнения за период времени t . Оценки V следует производить по створам наблюдательных скважин, которые ориентируются по направлению естественного штока подземных вод, а также по направлению к ближайшему водозаборному сооружению.

Запись области загрязнения. На основе используемых показателей качества воды, градаций площади и интенсивности загрязнения подземных вод дается унифицированная запись области загрязнения. Рассмотрим это на примерах.

Пример 1. Область загрязнения подземных вод характеризуется повышенной минерализацией, содержанием $Ск, SO_4 Cr(хрома), F$ и повышенной температурой. Площадь области загрязнения по контуру минерализации 1 г/л равна 17 км². Средние относительные значения минерализации, загрязняющих веществ температуры внутри области загрязнения составляет: $\bar{M} = 16, Cl = 8, SO_4 = 6, \bar{C}_u = 12, \bar{F} = 9, \bar{t} = 1,5$ при $t_{\phi} = 12^{\circ}C$; величина рН варьирует от 6,5 до 6,5.

Область загрязнения записывается следующим образом:

\bar{M} - IV (17) - В (16);

\bar{Cl} -В(8); \bar{SO}_4 -В (6); \bar{Cu} -В(12);

\bar{F} -В (9); \bar{t} (t_{ϕ}) = 1,5 (12°C); рН =6,5-6,5.

Пример 2. Показатели области загрязнения $\bar{M} = 23$, $\bar{Ж} = 2,7$, $\bar{Cl}=17$, $\bar{SO}_4=2$, $\bar{НП}=6$, $\bar{NO}_3=2$. Площадь области загрязнения по контуру минерализации 1 г/л равна 28 км². Температура воды внутри области загрязнения $\bar{t} = 1,3$ при $t_{\phi} = 14^{\circ}\text{C}$. Величина рН изменяется по площади от 6,5 до 5.

Область загрязнения записывается:

\bar{M} - V (28) – В(23);

$\bar{Ж}$ - А (2,7); \bar{Cl} - В (17); \bar{SO}_4 - А (2); $\bar{НП}$ - Б (6);

\bar{NO}_3 - А (2); \bar{t} (t_{ϕ}) = 1,3 (14°C); рН =5-6,5.

Эта унифицированная запись областей загрязнения подземных вод полезна при обобщении материалов по территории деятельности ПГО, республики и страны в целом.

Таким образом, данный метод позволяет:

- выявить и оценить степень загрязнения подземных вод;
- оценить масштабы загрязнения подземных вод;
- оценить скорость движения границы области загрязнения;

Метод комплексной оценки устойчивости подземных вод к антропогенному воздействию на основе системы индексов позволяет осуществить комплексную оценку уязвимости подземных вод к антропогенному воздействию.

При оценке степени загрязнения должны быть выявлены области I-допредельного (начальная степень) и II-запредельного загрязнения. II степень загрязнения, в свою очередь, включает в себя еще 3 градации степени загрязнения (IIa, IIб, IIв), последняя из которых характеризуется как экстремальное загрязнение. Оценка степени загрязнения осуществляется на основе сравнения фонового, предельного допустимого (ПДК) и измеренного качества воды.

Оценка интенсивности загрязнения подземных вод включает в себя оценку средней минерализации внутри области загрязнения, средней величины других обобщенных показателей качества воды, средней концентрации отдельных веществ, температуры подземных вод.

Оценка степени и интенсивности загрязнения осуществляется на основе показателей общих и специальных показателей согласно нормативной документации.

Алгоритм реализации метода приведен на рисунке 1 (Приложение А)

Алгоритм представляет циклический процесс, где внешний цикл организован по i ($i=1,m$), m -количество точек наблюдения (скважины, водозаборы), внешний цикл – по j ($j=1,n$), n -количество загрязняющих веществ ($\bar{}$), на наличие которых осуществляется анализ.

В алгоритме метода используются следующие основные параметры:

C_j -концентрация j -го загрязняющего вещества (ЗВ) в воде (результаты лабораторного анализа проб воды);

C_f -фоновое значение показателя для j -го ЗВ;

C_p - предельно допустимая концентрация (ПДК) j -го ЗВ;

\bar{C} - отношение измеренного значения концентрации ЗВ (C) к ПДК (C_p);

Sum_i – сумма значений \bar{C}_j для m загрязняющих веществ для i -й точки наблюдения. По значению показателя Sum_i определяется будет ли i -й точка включена в контур области загрязнения.

После завершения цикла будут определены все точки контура области загрязнения.

Затем вычисляется площадь (S) оконтуренной области загрязнения.

Масштабы загрязнения определяются по показателю на основе системы критериев, которая включает 7 уровней градации.

В завершении работы алгоритма формируется стандартная отчетность по всем видам показателей.

2.2 Оценки устойчивости системы подземных вод на основе индексов

Устойчивость - внутренне присущая системе способность противостоять изменениям. Устойчивость гидрогеохимического состояния (качества) ПВ заключается в сохранении их природной основы или техногенных фоновых показателей, которые сформировались до интенсивного или глобального воздействия на них (эксплуатация месторождений, оросительных систем или крупных предприятий, природных и техногенных катастроф, кислых дождей и др.). Устойчивое гидрогеохимическое состояние ПВ лимитируется их фоновыми показателями, с одной стороны, а с другой — их предельно-допустимыми показателями, уровнями (ПДК, ПДУ и др.). Отклонения от этих пределов указывает на неустойчивость гидрогеохимического состояния (качества) подземных вод.

Степень устойчивости гидрогеохимического состояния подземной части гидросферы может быть охарактеризована следующими категориями:

- устойчивое состояние;
- слабонеустойчивое состояние;
- средненеустойчивое состояние;
- неустойчивое состояние;
- сильнонеустойчивое состояние;
- очень сильнонеустойчивое (катастрофическое) состояние.

2.2.1 Индексы поражения

I группа - индексы поражения, $I_{\text{п}}$. Индексы этой группы характеризуют площадное распространение загрязнения и выражаются соотношением площади загрязнения (S_3) к общей площади объекта исследований (S_0): $I_{\text{п}}=S_3/S_0$

Значения индекса изменяются от 0 до 1; чем большая площадь подвержена загрязнению, тем ближе значения $I_{п}$ к 1 (таблица 2.4).

Таблица 2.4. Категории и количественная характеристика индексов поражения

Категория гидрогеохимического состояния	Количественная характеристика индекса
Устойчивое	0,0
Слабонеустойчивое	0,0-0,2
Среднеустойчивое	0,2-0,4
Неустойчивое	0,4-0,6
Сильнеустойчивое	0,6-0,8
Катастрофически неустойчивое	0,8-1,0

При наличии нескольких типов загрязнения на изучаемой территории целесообразно проводить специальное гидрогеохимическое районирование с целью выделения участков со специфическим загрязнением. В такой постановке все оценки будут осуществляться в пределах выделенных участков и тогда $I_{п}$ будет равен 1.

2.2.2 Индексы загрязнения

II группа — индексы загрязнения ИЗ. Для оценки степени загрязнения ПВ при поступлении в них ЗВ одного класса опасности (малоопасных) можно использовать формулу 2.14:

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ПДК_n} \quad (2.14)$$

Для оценки степени загрязнения опасными, высокоопасными и чрезвычайно опасными ЗВ необходимо использовать как вышеприведенную формулу, так и следующую формулу:

$$\frac{C_1}{ФК_1} + \frac{C_2}{ФК_2} + \dots + \frac{C_n}{ФК_n} \quad (2.15)$$

где $ФК$ — фоновая концентрация ингредиента.

Для всех случаев значения $R_{п}$ не должны выходить за пределы 6,5-8,5 (таблица 2.5).

Таблица 2.5 Категории и количественная характеристика химических индексов

Категории гидрогеохимического Состояния	рН-индекс	Индекс концентрации	
	рН/рН _ф	C ₁ /C _ф	C ₁ /C _{ПДК}
Устойчивое	1	>+1 <-1	
Слабонеустойчивое	1	+1 + +5 -1 + -5	
Среднеустойчивое	1	+5 + +10 -5 + -10	
Неустойчивое	+1 + +1,06 -1 + -1,08		+1 + +5
Сильнонеустойчивое	+1,06+ +1,1 -1,08+ -2,1		+5 + +10
Катастрофически неустойчивое	>+1,1 >-2,1		>+10

По сумме соотношений концентраций всех ЗВ состояние подземных вод оценить можно следующим образом:

устойчивое	$\Sigma C_i / ПДК_i < 1;$
слабонеустойчивое	$\Sigma C_i / ПДК_i = 1—5;$
среднеустойчивое	$\Sigma C_i / ПДК_i = 5-10;$
неустойчивое	$\Sigma C_i / ПДК_i = 10-20;$
сильнонеустойчивое	$\Sigma C_i / ПДК_i = 20-50;$
очень сильнонеустойчивое (катастрофическое)	$\Sigma C_i / ПДК_i = > 50.$

На рисунке 2 (Приложение А) показан алгоритм реализации метода комплексной оценки устойчивости подземных вод к антропогенному воздействию.

Ввиду того, что алгоритм предполагает многовариантность показателей, проблематичности отображения в рамках данного отчета всех сценариев развития процесса оценки, рассматриваемый метод проиллюстрирован только на основе двух групп индексов.

Циклический характер алгоритма обусловлен тем, что оценка производится для m исследуемых областей. Индекс I_p поражения оценивается как отношение площади загрязнения к площади исследуемой территории. В зависимости от полученного значения индекса определяется коэффициент устойчивости из множества $k_u = \{1, \dots, 6\}$, где каждому значению элемента множества соответствует вид устойчивости ПВ (таблица 2.5).

На этапе оценки по индексу загрязнения, предварительно выбирается вариант оценки по загрязняющим веществам, относящимся к классу а)

малоопасных или б) опасных, высокоопасных и чрезвычайно опасных. После получения количественных оценок по всем группам индексов, все значения усредняются, и определяется общая характеристика устойчивости ПВ.

2.3 Математическое моделирование процесса загрязнения подземных вод

Качество и ресурсы подземных вод могут существенно изменяться во времени и поэтому необходимо прогнозировать их будущее состояние, помимо оценки их текущего состояния. Движение подземных вод в гидrolитосфере происходит в результате взаимодействия динамических полей (давления, температуры, концентрации растворенных в воде компонентов и т.п.) и статических (геологических) полей - водопроницаемости, пористости, водопродовимости и т.д. С математической точки зрения динамические поля - это поля функций, а геологические - поля аргументов, т.е. тех факторов, которые оказывают влияние на функции. Связь параметров может быть описана системой дифференциальных уравнений. Решая эту систему уравнений, можно рассчитывать значения динамических полей на любые моменты времени в любой точке, т.е. решать задачи прогнозирования. Для этого необходимо знать значения статических параметров и исходные значения динамических. Но параметры, характеризующие свойства подземных вод и свойства пород, которые их вмещают, можно измерить только в отдельных точках. С этой целью, например, бурятся скважины, в которых проводятся необходимые измерения. Чтобы выявить закономерности изменения статических и динамических параметров в пространстве для всей исследуемой территории, описать характер взаимосвязи между параметрами, выполняется гидрогеологическая стратификация. Результатом являются специальные графические документы - гидрогеологические карты, сопровождающиеся гидрогеологическими разрезами и пояснительными записками, включающими текстовые описания, расчеты, таблицы, графики параметров и т.п.

Сложность гидрогеологических условий обусловлено:

- фильтрационной неоднородностью водовмещающих отложений;
- характером граничных условий в плане и разрезе;
- напорно-безнапорным режимом фильтрации;
- нарушением сплошности потока (изменением условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод и/или водоносных горизонтов);
- большим количеством взаимодействующих водозаборов подземных вод и других объектов техногенной нагрузки;
- наличием источников загрязнения;
- недостатком необходимой информации и т.п.

Современные методы математического моделирования основаны на численном решении дифференциальных уравнений геофильтрации. Для

такого решения чаще всего используются методы конечных разностей и конечных элементов.

Для математического моделирования геофильтрации создано большое количество программных пакетов. Наиболее распространенные промышленные программные продукты: GMS, Modtech, Visual MODFLOW Flex, ANSDIMAT.

Эти продукты разработаны применительно к схеме плановой фильтрации в слоистых толщах. В основу такой схемы положены две основные гидрогеологические предпосылки:

- Дюпюи о постоянстве напора по вертикали в проницаемых слоях;
- Мятлева-Гиринского о вертикальном характере фильтрации в разделяющих слоях;

В данных программных комплексах используются алгоритмы решения системы алгебраических уравнений. Эти уравнения представляют собой результат аппроксимации дифференциальных уравнений геофильтрации конечными разностями.

Основные этапы математического моделирования (общий случай):

- разработка модели (схематизация гидрогеологических условий);
- пространственно-временная дискретизация;
- калибровка модели (решение обратных и инверсных гидрогеологических задач);
- прогнозное моделирование;
- воспроизведение существующего режима фильтрации;
- воспроизведение ненарушенного режима фильтрации;
- моделирование геомиграции;

Математическое моделирование природных, технологических и других процессов и явлений получило достаточно широкое развитие. Одно из преимуществ такого моделирования состоит в том, что математическая модель, адекватно отражающая изучаемый процесс, дает возможность прогнозировать во времени дальнейшее развитие событий и предвидеть его последствия, в том числе и негативные. В данной диссертационной работе было рассмотрено несколько математических моделей.

2.3.1 Математическая модель для описания распространения химического и радиоактивного загрязнения

Если плотность подземных вод определяется концентрацией гидрокарбонатно-сульфатно-натриевого минерализованного раствора (плотностью до 1.0006 кг/дм^3), который практически не сорбируется вмещающими породами в процессе миграции. То можно описать нестационарную гидродинамику потока с помощью модели двухкомпонентного раствора. Пространственно-временные распределения концентраций или активностей радиоактивных загрязнений описываются линейными уравнениями миграции с учетом равновесной сорбции и

радиоактивного распада в поле скоростей, полученном при решении базовой системы уравнений переноса раствора.

Математическая модель для описания распространения химического загрязнения в потоках большой протяженности включает в себя математическую модель, описывающую гидродинамику геофильтрационного подземного потока, состоящую из уравнения движения и уравнение неразрывности, а также условия однозначности, состоящие из начальных и граничных условий [44].

Уравнение движения фильтрационного потока постоянной плотности представляет собой математическую запись основного закона фильтрации в обобщенной форме закона Дарси:

$$\vec{v} = -k\nabla H, \quad (2.16)$$

где k — коэффициент фильтрации (м/сут), H — гидродинамический напор (м), \vec{v} — скорость фильтрации.

Гидродинамический напор $H(m)$ — это энергетическая характеристика движущейся жидкости. Понятие гидродинамического напора в гидравлике имеет фундаментальное значение.

Гидродинамический напор H определяется по формуле :

$$H = z + h_p + h_v = z + \frac{p_{\text{изб}}}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (2.17)$$

где z — геометрический напор (высота), м;

h_p — пьезометрический напор (высота), м;

$h_v = \frac{v^2}{2g}$ — скоростной напор, м;

v — скорость потока, м/с;

g — ускорение свободного падения, м/с².

p — давление в жидкости

Гидродинамический напор, в отличие от гидростатического, складывается не из двух, а из трёх составляющих, из которых дополнительная третья величина h_v отражает кинетическую энергию, то есть наличие движения жидкости. Первые два члена $z+h_p$, также как и у гидростатического, представляют потенциальную энергию. Таким образом, гидродинамический напор отражает полную энергию в конкретной точке потока жидкости.

Уравнение неразрывности, описывающее материальный баланс потока, имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho p)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = \rho_{\text{ист}} Q_{\text{ист}} - \rho Q_{\text{ст}} \quad (2.18)$$

где $\rho = \rho(\vec{r}, t)$ – плотность раствора, $\vec{v} = \vec{v}(\vec{r}, t)$ – вектор скорости фильтрации, n – пористость вмещающих пород, $Q_{ист}$ – мощность объёмных источников внутри водного тела, $Q_{ист} \geq 0$, $Q_{ст}$ – мощность объёмных стоков, $Q_{ст} \geq 0$, $\rho_{ист}$ – плотность раствора в источниках.

При рассмотрении упругого режима фильтрации зависимость плотности от времени можно представить как

$$g \frac{\partial(\eta\rho)}{\partial t} = \eta \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (2.19)$$

где g – ускорение свободного падения, P – давление раствора, η – коэффициент упругой емкости пласта.

Для песчаных пород обычно $\eta = 0.007/z$, где z – средняя глубина пласта. Для глинистых пород $\eta = 0.0005$ (1/м).

Пренебрегая пространственной изменчивостью свойств водных растворов и полагая $\frac{\partial P}{\partial t} = \rho g \frac{\partial H}{\partial t}$, получаем уравнение неразрывности, описывающее распределение напоров в фильтрационном потоке

$$\eta \frac{\partial H}{\partial t} - \text{div}(k\nabla H) = \frac{\rho_{ист}}{\rho} Q_{ист} - Q_{ст} \quad (2.20)$$

Для потоков большой протяженности, длина которых значительно превышает их мощность, хорошим приближением является предположение Дюпюи о постоянстве напоров по вертикали. Усредняя все величины по вертикали, переходят к плановой модели, где закон Дарси записывают не относительно скорости фильтрации, а относительно удельного расхода планового потока q :

$$q = km\nabla H, \quad (2.21)$$

где km – коэффициент водопроницаемости для водоносного пласта мощностью M .

Для описания динамики потоков переменной плотности переходят к величине приведенного напора $h = \frac{\rho}{\rho_0} H$, где ρ_0 – произвольно выбираемая удельная плотность воды. Распределение приведенной плотности описывается той же системой уравнений, как и в случае постоянной плотности.

Для планового безнапорного потока это уравнение можно записать в виде:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(km \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(km \frac{\partial h}{\partial y} \right) + w, \quad (2.22)$$

где μ – коэффициент водоемкости пласта.

Инфильтрационное питание, поступающее на свободную поверхность водного тела, можно приближенно аппроксимировать линейной функцией:

$$w = -w_0 \left(1 - \frac{z_{гв}}{z_{кр}} \right) = w_0 \frac{H - z^0 - z_{гв}}{z_{кр}}, \quad (2.23)$$

где w - интенсивность инфильтрации,

w_0 - интенсивность испарения на поверхности земли,

$z_{гв} = z^0 - H$ - глубина грунтовых вод,

$z_{кр}$ - условная критическая глубина грунтовых вод,

z^0 - отметка поверхности земли, относительно плоскости сравнения.

Для планового напорного потока (упругий режим) уравнение фильтрации имеет вид:

$$\mu^* \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(km \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(km \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{a_v m}{1+n} \rho g v_n, \quad (2.24)$$

где μ^* - коэффициент упругой емкости пласта, $v_n = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial P_n}{\partial t}$ - скорость изменения внешнего давления P_n на кровлю пласта, a_v - коэффициент уплотнения породы.

Коэффициент упругой емкости пласта представляет собой отношение изменения объема воды в единичном элементе пласта к изменению напора.

$$\mu = \frac{\Delta V_0}{\Delta H} \quad (2.25)$$

После нахождения потоков фильтрации решается уравнение миграции, описывающее распространение нейтральных (нерадиоактивных) примесей в растворе:

$$n \frac{\partial(c)}{\partial t} + \text{div}(C\vec{v}) = \text{div}(D\nabla C) + C_{ист} Q_{ист} - C Q_{ст}, \quad (2.26)$$

где C - концентрация загрязнителя, D - тензор дисперсии, $C_{ист}$ - концентрация в источниках.

Для использования данной модели в численных расчетах необходима следующая информация:

- положения скважин (x_i, y_i) ;
- коэффициенты фильтрации по скважинам k (м/сут); в соответствии с данными по зонам он может быть определен как km/M , где km - средняя водопроницаемость пласта, M - средняя мощность пласта;
- коэффициенты пористости, для них может применяться эмпирическая зависимость $n=Nk_f$, где N - коэффициент пропорциональности (например, для района Кара-Балта - $N=1.6 \cdot 10^{-2}$);

- тензор гидродисперсии D ;
- описания местоположения и геометрической формы каналов, рек и хвостохранилища;
- карта рельефа местности, определяющая значения рельефа $H_p(x,y)$, выше которого уровень воды не может подняться;
- данные временных наблюдений за количеством осадков в районе $W(t)$ с детализацией по годам или месяцам.

Начальное распределение $H(x,y,z,t_0)$ необходимо привязать к моменту начала определения поля $H(x,y,z,t_0)$ в скважинах. Начальное распределение $C(x,y,z,t_0)$ положить равным нулю везде, кроме хвостохранилища.

Граничные условия необходимо задавать:

- а) на верхней границе подземных вод $H=H(t)$, желательно с детализацией по годам или месяцам;
- б) на границе хвостохранилища $C=C(t)$, желательно с детализацией по годам или месяцам;
- в) на границах счетной области для уравнения фильтрации по уровням свободных поверхностей на реках или по гидроизогипсам;
- г) на границах счетной области для уравнения миграции по значениям $C(t)$ с предыдущего шага;
- д) во всех участках счетной области предельный уровень $H(x,y,t)$ ограничен уровнем рельефа: $H \leq H_p$.

Математическая модель для описания распространения радиоактивной компоненты рассчитывается, когда найдены скорости фильтрации раствора в целом. Моделирование процесса миграции радионуклидов описывает четыре физических явления:

- конвективный перенос;
- радиоактивный распад;
- физико-химическое взаимодействие с породами (сорбционные процессы);
- гидродисперсию.

Предположим, что радиоактивный нуклид распределён в растворе и в породе. В качестве неизвестной функции используется полная активность единицы объёма породы с учётом содержащегося в её поровом объёме жидкости C_i :

$$C_i = nA_i + (1 - n)B_i, \quad (2.27)$$

где n - эффективная пористость,

A_i - объёмная активность компонента i в растворе,

B_i - объёмная активность компонента i в породе.

Уравнение локального баланса активности радиоактивной компоненты в растворе имеет вид:

$$n \frac{\partial A_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{v}A_i) - \operatorname{div}(D\nabla A_i) + n\lambda_i A_i + f(A_i, B_i) = 0, \quad (2.28)$$

где \vec{v} - вектор скорости фильтрации,

D - тензор гидродисперсии,

λ_i - постоянная радиоактивного распада, $\lambda_i = \frac{\ln 2}{T_{2,i}}$,

$T_{2,i}$ - период полураспада компонента i ,

$f(A_i, B_i)$ - скорость перехода компонента i из раствора в породу.

Уравнение локального баланса активности для породы не содержит конвективного и дисперсионного членов:

$$(1-n) \frac{\partial B_i}{\partial t} + (1-n)\lambda_i B_i = f(A_i, B_i), \quad (2.29)$$

Суммируя уравнения для A_i и B_i , получаем

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{v}A_i) - \operatorname{div}(D\nabla A_i) + \lambda_i C_i = 0. \quad (2.30)$$

Скорость перехода радионуклида в породу $f(A_i, B_i)$ обусловлена сорбционными процессами. Под сорбционными процессами понимается группа физико-химических процессов, включающих адсорбцию, сорбцию, хемосорбцию, ионный обмен и другие процессы. Для интегральной характеристики этих процессов обычно применяют «линейную изотерму»:

$$f(A_i, B_i) = \frac{(\beta_i A_i - B_i)}{\tau_i}, \quad (2.31)$$

где β_i - безразмерный коэффициент межфазного распределения,

τ_i - постоянная времени.

Время установления равновесия мало по сравнению с характерным временем в моделируемой системе (год). Поэтому, в большинстве моделей принимается предположение о равновесной сорбции:

$$B_i = \beta_i A_i. \quad (2.32)$$

Допущение о равновесности сорбционных процессов является условным, т.к. реально десорбируется только часть ранее сорбированного нуклида, а оставшаяся часть очень медленно переходит в раствор в результате процессов выщелачивания. Во всяком случае, это допущение приводит к завышению миграционной способности радионуклидов, что

обеспечивает определённый “запас надёжности” расчётов. Используя предыдущую формулу, исключим из уравнения миграции величину A_i :

$$(\eta + (1 - \eta)\beta_i) \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} + \lambda_i C_i \right) + \operatorname{div}(\vec{v} C_i) - \operatorname{div}(D \nabla C_i) = 0. \quad (2.33)$$

Тензор гидродисперсии D выражается через скорость фильтрации формулой:

$$D = \delta_L |\vec{v}| I + (\delta_L - \delta_T) \frac{\vec{v} \vec{v}^T}{|\vec{v}|}, \quad (2.34)$$

где δ_L , δ_T - соответственно продольный и поперечный коэффициенты дисперсивности.

Для завершения постановки задачи расчёта миграции радионуклида i к уравнению миграции должны быть присоединены граничные и начальные условия. Граничные условия являются нестационарными и имеют вид:

$$\alpha_i C_i + \gamma_i \vec{n} \vec{J}_i = \varphi_i(t) \quad (2.35)$$

где α_i , γ_i - некоторые параметры для постановки граничных условий,

φ_i - некоторая граничная функция,

\vec{n} - единичный вектор внешней нормали к границе области.

Начальные условия для уравнения миграции имеют вид: $C_i = C_i^0$ при $t=t_0$.

В математическом моделировании было выделено две основные гидрогеологические предпосылки для схемы плановой фильтрации в слоистых толщах, на которой основывается большая часть математических моделей моделирования загрязнения подземных вод.

2.3.6 Практическая реализация математической модели загрязнения подземных вод

Рассматриваемая в диссертационной работе математическая модель, использовалась для описания процесса распространения загрязнения в подземных водах района Кара-Балта где использовалась трёхмерная численная методика МИФ [45], созданная в РФЯЦ-ВНИИТФ. Методика МИФ предназначена для решения трехмерных уравнений миграции и фильтрации на произвольных шестигранных сетках. Методика располагает набором консервативных разностных схем, позволяющих получать монотонные решения для различных классов задач.

В работе [46] на ряде модельных задач производится сравнение методики МИФ с методикой [47], широко используемой в США для решения трехмерного уравнения миграции. Результаты, полученные по различным методикам близки между собой, но методика МИФ дает более монотонное распределение радиоактивности в пространстве при решении трехмерных задач. Основываясь на методе МИФ была создана собственная численная

методика расчета распространения концентрации загрязнения геофильтрационного подземного потока с использованием конечно-разностного метода, метода переменных направлений и методом прогонки.

Для расчета математической модели необходимы следующие исходные данные:

- k – коэффициент фильтрации
- $Q_{\text{ист}}$ – мощность объёмных источников внутри водного тела
- $Q_{\text{ст}}$ – мощность объёмных стоков
- $\rho_{\text{ист}}$ – плотность раствора в источниках
- h – шаг сетки
- τ – шаг по времени
- η – коэффициент упругой емкости пласта
- тип пород (песчаные,...)
- z – средняя глубина пласта от поверхности земли
- μ – коэффициент водоемкости пласта
- λ_i – постоянная радиоактивного распада (какое вещество распространяется)
- β_i – безразмерный коэффициент межфазного распределения
- n – эффективная пористость
- μ – коэффициент водоемкости пласта
- $\rho_{\text{ист}}$ – плотность воды в источнике
- ρ – плотность чистой воды
- δ_L – продольный коэффициент дисперсивности
- δ_T – поперечный коэффициент дисперсивности

На карту накладывается сетка с заданной размерностью, где для каждой ячейки сетки задаются определенные значения для необходимых данных. В расчетах на карту города Усть-Каменогорска накладывалась сетка 10 на 10.

Модель реализована с использованием конечно-разностного метода, метода переменных направлений, система линейных уравнений решена методом прогонки [48,49].

Метод прогонки.

Дана система линейных алгебраических уравнений:

$$a_j y_{j-1} - c_j y_j + b_j y_{j+1} = -f_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n - 1 \quad (2.36)$$

$$y_0 = v_1 y_1 + \mu_1 \quad (2.37)$$

$$y_n = v_2 y_{n-1} + \mu_2 \quad (2.38)$$

Сначала осуществляется прямая прогонка, при которой вычисляются коэффициенты:

$$\alpha_1 = \nu_1, \quad \alpha_{j+1} = \frac{b_j}{c_j - \alpha_j \alpha_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.39)$$

$$\beta_1 = \mu_1, \quad \beta_{j+1} = \frac{\alpha_j \beta_j + f_j}{c_j - \alpha_j \alpha_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.40)$$

После этого осуществляется обратная прогонка, при которой вычисляются искомые значения функции:

$$y_n = \frac{\nu_2 \beta_n + \mu_2}{1 - \nu_2 \alpha_n}, \quad (2.41)$$

$$y_j = \alpha_{j+1} y_{j+1} + \beta_{j+1}, \quad j = n-1, n-2, \dots, 1, 0 \quad (2.42)$$

Достаточные условия сходимости метода прогонки следующие:

$$\alpha_j \neq 0, \quad b_j \neq 0, \quad |c_j| \geq |a_j| + |b_j|, \quad j = 1, 2, \dots, n-1;$$

$$|\nu_1| \leq 1, \quad |\nu_2| < 1$$

Расчет гидродинамического напора

Для тестового расчета мы будем использовать математическую модель, описывающую гидродинамику геофильтрационного подземного потока, включающую в себя уравнение движения и уравнение неразрывности, а также условия однозначности, состоящие из начальных и граничных условий.

Для начал выполним расчет гидродинамического напора, пренебрегая пространственной изменчивостью свойств водных растворов.

Коэффициент фильтрации вычислялся по формулам линейной интерполяции. Интерполяции проводилась как вдоль профильного разреза, так и по глубине.

Интерполяция вдоль оси X:

$$K = K(i, j) = \frac{\overline{K}_n(iM-i) + \overline{K}_n(i-1)}{iM-1}, \quad (2.43)$$

где i, j – индексы разностной ячейки по горизонтали и вертикали (вдоль оси X и Y), $i = 1 \dots, iM, j = 1 \dots, jM, \overline{K}_n, \overline{K}_n$ – коэффициенты фильтрации на левой и правой границах.

Интерполяция вдоль оси Y:

$$\overline{K} = \frac{K^H(jM-j) + K^B(j-1)}{jM-1}, \quad (2.44)$$

где K^H, K^B – коэффициенты фильтрации на нижней и верхней границах.

После этого выполним расчет распределения напоров в фильтрационном потоке по формуле 2.20.

Рассмотрим двухмерный случай, используя метод прогонки.

$$\eta \frac{H_{ij}^{n+1} - H_{ij}^n}{\tau} - k \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) = \frac{\rho_{\text{жст}}}{\rho} Q_{\text{жст}} - Q_{\text{ст}}, \quad (2.45)$$

Отсюда следует

$$\begin{aligned} \eta \frac{H_{ij}^{n+1} - H_{ij}^n}{\tau} - k \left(\frac{H_{i+1,j}^{n+1} - 2H_{i,j}^{n+1} + H_{i-1,j}^{n+1}}{h^2} + \frac{H_{i,j+1}^n - 2H_{i,j}^n + H_{i,j-1}^n}{h^2} \right) \\ = \frac{\rho_{\text{жст}}}{\rho} Q_{\text{жст}} - Q_{\text{ст}} \end{aligned} \quad (2.46)$$

На первом шаге значения $H_{i,j+1}^{n+1}, H_{i,j}^{n+1}, H_{i,j-1}^{n+1}$ равны 0. На втором шаге значения $H_{i,j+1}^n, H_{i,j}^n, H_{i,j-1}^n$ зависят от значений $H_{i+1,j}^{n+1}, H_{i,j}^{n+1}, H_{i-1,j}^{n+1}$, полученных на первом шаге. На первом и последнем шаге по x и y значения f равны 0.

Полученные значения гидродинамического напора по координатам X и Y используются в уравнении движения фильтрационного потока.

Математический алгоритм приведения гидродинамического напора к методу прогонки:

- 1) $\eta \frac{H_{ij}^{n+1} - H_{ij}^n}{\tau} - k \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) = \frac{\rho_{\text{жст}}}{\rho} Q_{\text{жст}} - Q_{\text{ст}}$
- 2) $\eta \frac{H_{ij}^{n+1} - H_{ij}^n}{\tau} - k \left(\frac{H_{i+1,j}^{n+1} - 2H_{i,j}^{n+1} + H_{i-1,j}^{n+1}}{h^2} + \frac{H_{i,j+1}^n - 2H_{i,j}^n + H_{i,j-1}^n}{h^2} \right) = \frac{\rho_{\text{жст}}}{\rho} Q_{\text{жст}} - Q_{\text{ст}}$
- 3) $\frac{\eta h^2}{\tau k} (H_{ij}^{n+1} - H_{ij}^n) - (H_{i+1,j}^{n+1} - 2H_{i,j}^{n+1} + H_{i-1,j}^{n+1} + H_{i,j+1}^n - 2H_{i,j}^n + H_{i,j-1}^n) = \left(\frac{\rho_{\text{жст}}}{\rho} Q_{\text{жст}} - Q_{\text{ст}} \right) * \frac{h^2}{k}$
- 4) $\frac{\eta h^2}{\tau k} * H_{i,j}^{n+1} - H_{i+1,j}^{n+1} + 2H_{i,j}^{n+1} - H_{i-1,j}^{n+1} = \left(\frac{\rho_{\text{жст}}}{\rho} Q_{\text{жст}} - Q_{\text{ст}} \right) * \frac{h^2}{k} + \frac{\eta h^2}{\tau k} * H_{i,j}^n + H_{i,j+1}^n - 2H_{i,j}^n + H_{i,j-1}^n$
- 5) $-H_{i-1,j}^{n+1} + \frac{\eta h^2}{\tau k} * H_{i,j}^{n+1} + 2H_{i,j}^{n+1} - H_{i+1,j}^{n+1} = -f$

$$-H_{i-1,j}^{n+1} + \left(\frac{\eta h^2}{\tau k} + 2\right) * H_{i,j}^{n+1} - H_{i+1,j}^{n+1} = -f \quad (2.47)$$

$$A=-1$$

$$B=-1$$

$$C=-\left(2 + \frac{\eta h^2}{\tau k}\right)$$

$$-F=-\left(\frac{\rho_{\text{всп}}}{\rho} Q_{\text{ист}} - Q_{\text{ст}}\right) * \frac{h^2}{k} - \frac{\eta h^2}{\tau k} * H_{i,j}^n - (H_{i,j+1}^n - 2H_{i,j}^n + H_{i,j-1}^n) \quad (2.48)$$

По Y

$$A=-1$$

$$B=-1$$

$$C=-\left(2 + \frac{\eta h^2}{\tau k}\right)$$

Сначала рассчитываются значения на нулевом слое. На первом и последнем шаге значения $F=0$. Значение α и β задаются на первом шаге равными.

Затем выполняется проверка правильности расчета значений гидродинамического напора на достаточные условия сходимости метода прогонки. Алгоритм расчета гидродинамического напора представлен на рисунке 3 (Приложение А).

На следующем шаге выполняется расчет скорости движения фильтрационного потока по уравнению 2.16.

Используя шаг сетки по x , y равный 10 и шаг сетки по времени равный 365 рассчитываются изменение x и y на 10 шагах по времени.

В таблице 2.6, в качестве примера, представлены рассчитанные значения скорости фильтрации (м/сут), при трех работающих скважинах на предельных мощностях для $t=10$.

Таблица 2.6 – Расчетные значения скорости фильтрации

		x									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
y	0	0.05	0.05	26.22	0.05	72.60	0.05	0.05	0.05	612.87	381.74
	1	0.07	0.07	90.30	0.07	22.83	0.07	0.07	0.07	728.80	645.84
	2	0.09	0.09	8.63	0.09	66.15	0.09	0.09	0.09	593.15	485.50
	3	0.12	0.12	76.41	0.12	79.68	0.12	0.12	0.12	1918.39	828.20
	4	0.15	0.15	20.40	0.15	42.38	0.15	0.15	0.15	609.98	422.86
	5	0.18	0.18	49.96	0.18	70.68	0.18	0.18	0.18	309.43	629.41
	6	0.21	0.21	11.40	0.21	55.77	0.21	0.21	0.21	135.01	155.86
	7	0.25	0.25	63.38	0.25	30.53	0.25	0.25	0.25	717.32	636.66
	8	0.28	0.28	13.15	0.28	35,0	0.28	0.28	0.28	428.07	650.48
	9	0.00	0.00	36.25	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	7119,0	6251,0

Расчет выполняется для потоков постоянной плотности с нулевой мощностью стоков.

Расчет радиоактивного загрязнения

На последнем шаге выполняется расчет распространения радиоактивной компоненты. Распространение загрязнения начинаем рассчитывать с тензора гидродисперсии с помощью формулы 2.26. Сначала рассчитываем транспонированную матрицу и перемножаем ее исходную. После этого делим полученную матрицу на модуль вектора скорости этих матриц. Поперечный коэффициент умножаем на единичный вектор.

После этого полученные значения гидродисперсии подставляются в формулу 2.28 для расчета концентрации загрязнения. Концентрация измеряется в мг/л.

Математическое описание процесса загрязнения подземных вод:

$$1) \quad (n + (1 - n) * \beta) * \left(\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\tau} + \lambda_i C \right) + \left(V_x * \frac{C_{i,j}^{n+1}}{h} + V_y * \frac{C_{i,j}^n}{h} \right) - D * \left(\frac{C_{i+1,j}^{n+1} - 2 * C_{i,j}^{n+1} + C_{i-1,j}^{n+1}}{h^2} + \frac{C_{i,j+1}^n - 2 * C_{i,j}^n + C_{i,j-1}^n}{h^2} \right) = 0$$

$$2) \quad \frac{Gh^2}{D\tau} * C_{i,j}^{n+1} - \frac{Gh^2}{D\tau} * C_{i,j}^n + \frac{Gh^2 \lambda_i}{D} C + \frac{V_x h}{D} * C_{i,j}^{n+1} + \frac{V_y h}{D} * C_{i,j}^n - C_{i+1,j}^{n+1} + 2C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1} - C_{i,j+1}^n + 2C_{i,j}^n - C_{i,j-1}^n = 0$$

$$3) \quad -C_{i+1,j}^{n+1} + \left(2 + \frac{Gh^2}{D\tau} + \frac{V_x h}{D} \right) * C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1} = C_{i,j+1}^n - \left(2 - \frac{Gh^2}{D\tau} + \frac{V_y h}{D} \right) * C_{i,j}^n + C_{i,j-1}^n - \frac{Gh^2 \lambda_i}{D} C$$

По X

$$B = -1$$

$$A = -1$$

$$C = -\left(2 + \frac{Gh^2}{D\tau} + \frac{V_x h}{D} \right)$$

$$F = -C_{i,j+1}^n + \left(2 - \frac{Gh^2}{D\tau} + \frac{V_y h}{D} \right) * C_{i,j}^n - C_{i,j-1}^n + \frac{Gh^2 \lambda_i}{D} C$$

По Y

$$B = -1$$

$$A = -1$$

$$C = -\left(2 - \frac{Gh^2}{D\tau} + \frac{V_y h}{D}\right)$$

$$F = -C_{i,j+1}^n + \left(2 - \frac{Gh^2}{D\tau} + \frac{Gh^2 \lambda_i}{D} + \frac{V_x h}{D}\right) * C_{i,j}^n - C_{i,j-1}^n + \frac{Gh^2 \lambda_i}{D}$$

Алгоритм расчета концентрации загрязнения представлен на рисунке 4 (Приложение А).

Общая модель более подробно представлена в алгоритме на рисунке 5 (Приложение А).

Расчеты были выполнены для точечного источника радиоактивного вещества в виде урана-238 расположенного на территории УМЗ. В расчетах полагалось, что его концентрации будет равняется 20 мг/л, что в 200 раз превышает норму.

Таблица 2.7 - Расчетные значения концентрации загрязнения

		x									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
y	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	2	1.97694	1.98509	0.00000	1.99232	0.00000	2.01715	1.97965	2.03075	0.00000	0.00000
	3	1.84767	1.85671	0.00000	1.86285	0.00000	1.88898	1.84740	1.90280	0.00000	0.00000
	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.71803	0.00000	0.00000
	5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	6	0.00000	0.00000	20.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	7	0.23290	0.23559	0.00000	0.23527	0.00082	0.25141	0.23084	0.26166	0.00004	0.00000
	8	0.93684	0.93928	0.00000	0.93899	0.72845	0.95362	0.93496	0.96292	0.74693	0.11176
	9	1.64316	1.64535	0.79830	1.64509	1.45561	1.65826	1.64147	1.66662	1.47224	0.90058

Расчет выполняется для потоков постоянной плотности с нулевой мощностью стоков.

На рисунке 2.11 представлено распространение радиоактивного загрязнения с промплощадки УМЗ, наложенного на карту города Усть-Каменогорска.

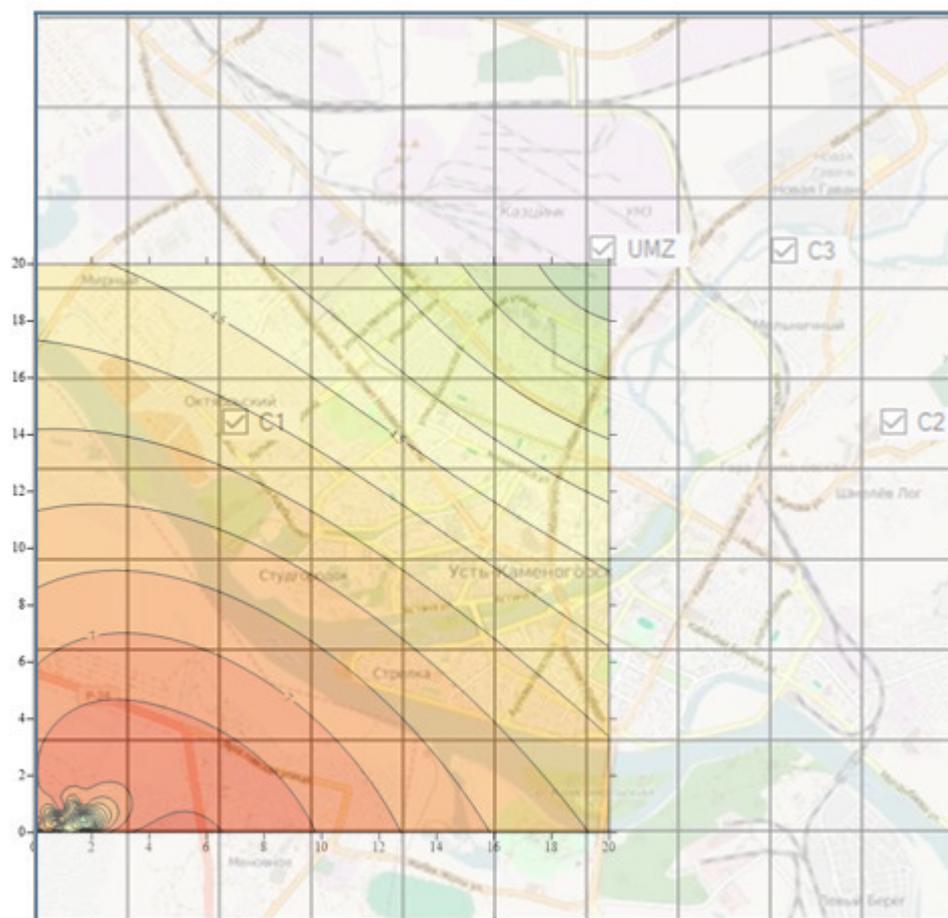


Рисунок 2.11 – Визуализация загрязнения ураном из точечного источника

Также был рассмотрен вариант моделирования загрязнения скважин, при попадании радиоактивного вещества в виде урана. Расчеты были выполнены для трех водозаборов в городе Усть-Каменогорске.

Данные для визуализации представляют собой три столбца со значениями концентрации по X , по Y и по времени t . Шаг по времени равен 1 суткам. На шкале справа видно изменение распространения загрязнения в течении 10 суток.

На следующих рисунках можно увидеть визуализацию загрязнения по отдельности на каждой из трех скважин входящих в состав одного из водозаборов: Северо-Атамановский, Пионерский, Октябрьский. Также представлено наложение этих загрязнений на карту города Усть-Каменогорска.

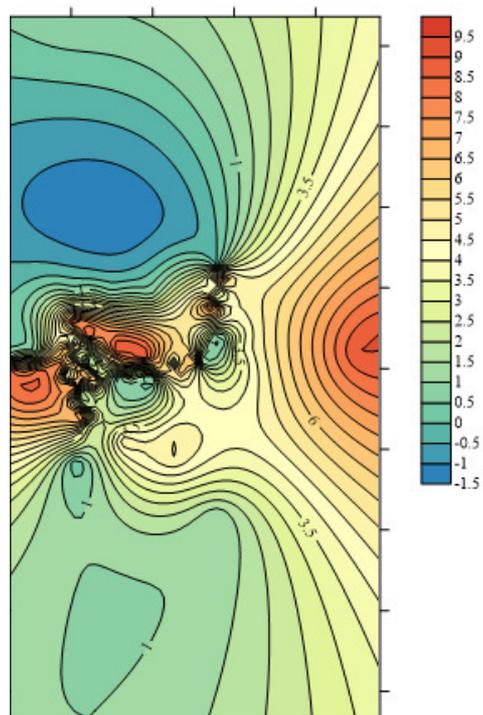


Рисунок 2.12 – Визуализация загрязнения со скважины из Октябрьского водозабора

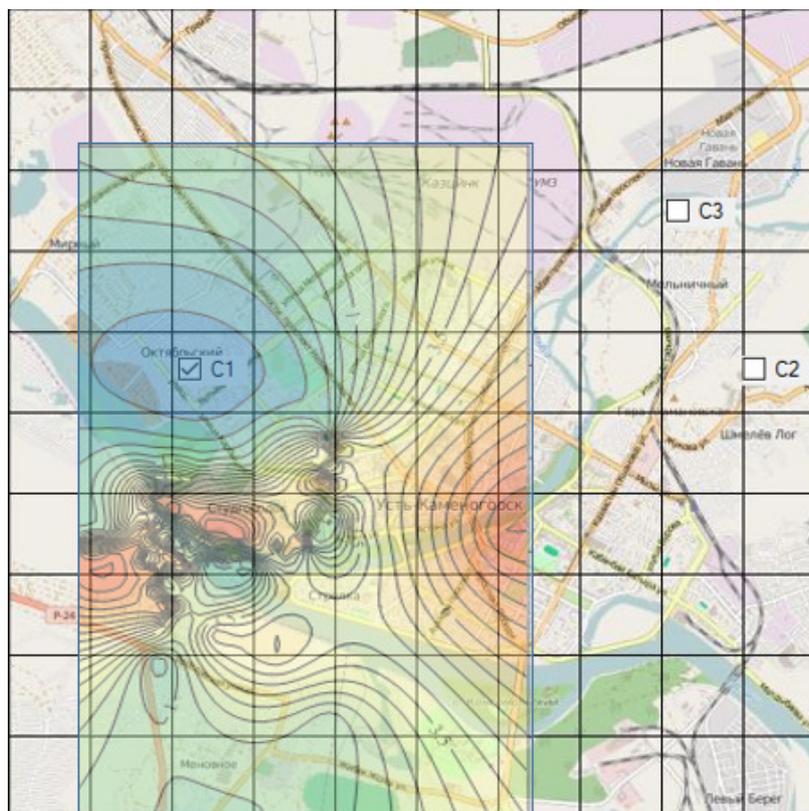


Рисунок 2.13 – Наложение на карту загрязнения со скважины из Октябрьского водозабора

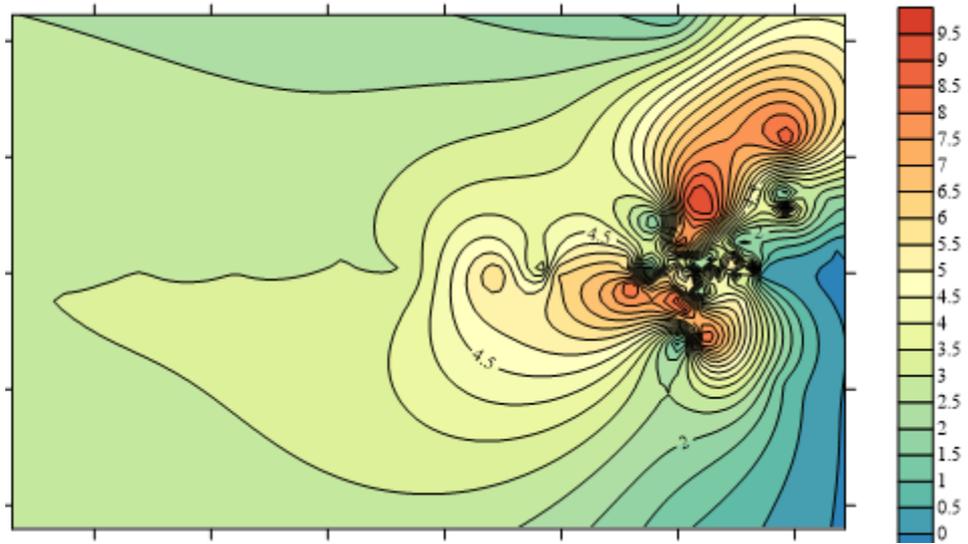


Рисунок 2.14 – Визуализация загрязнения со скважины из Северо-Атаманского водозабора

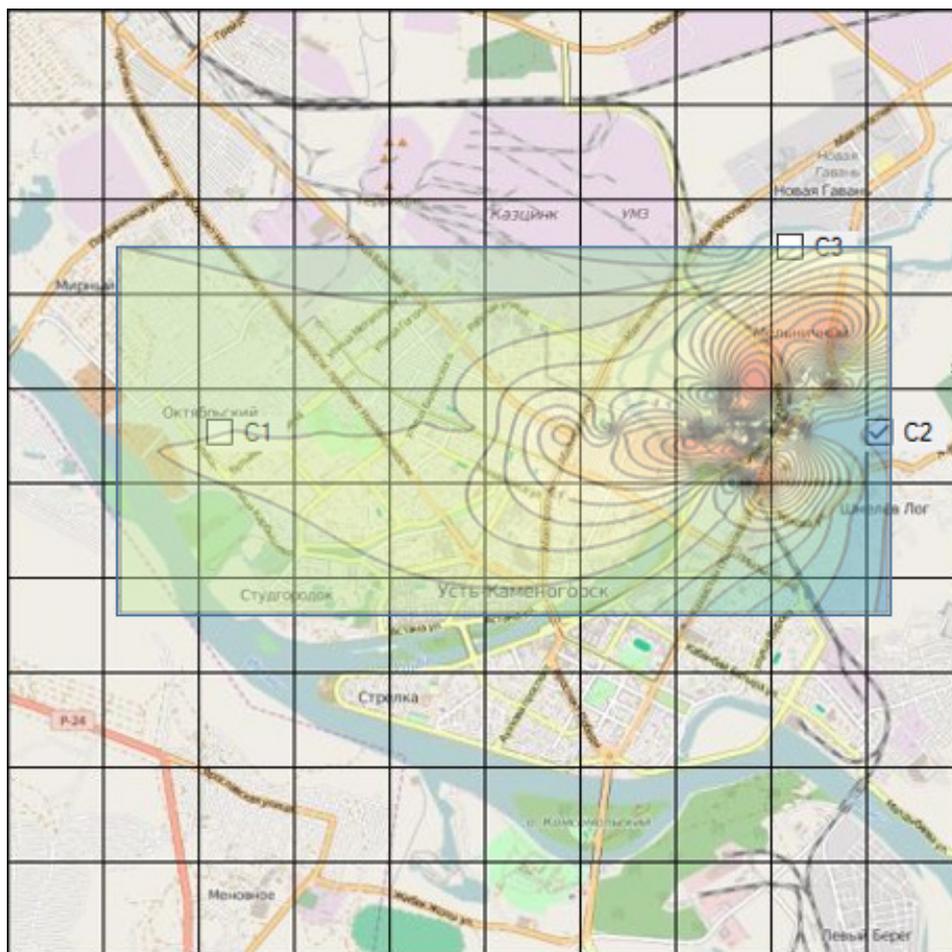


Рисунок 2.15 – Наложение на карту загрязнения со скважины из Северо-Атаманского водозабора

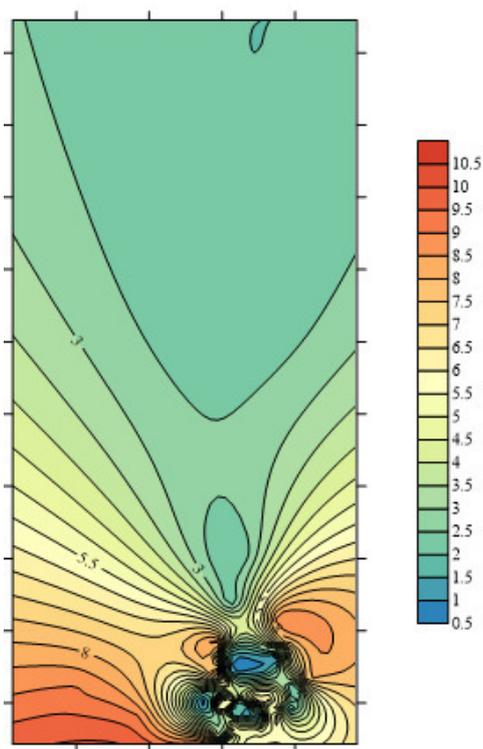


Рисунок 2.16 – Визуализация загрязнения со скважины из Пионерского водозабора

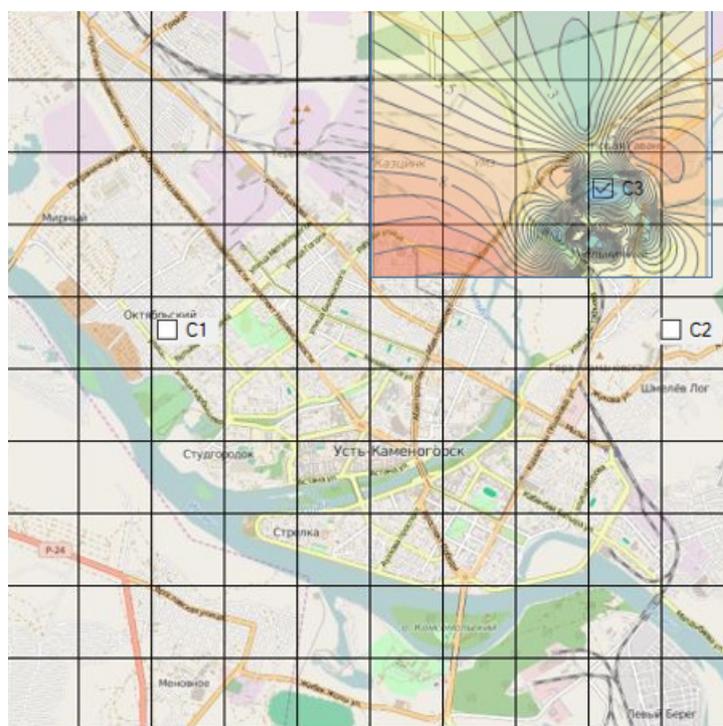


Рисунок 2.17 – Наложение на карту загрязнения из Пионерского водозабора

Данные, необходимые для расчета, были сгруппированы в базу данных, состоящую из пяти таблиц. Эта база данных является составной частью базы данных, разработанной в рамках научно-исследовательской работы «Разработка информационно-аналитической системы мониторинга запасов и качества подземных вод Республики Казахстан» [50].

Таким образом, разработаны численная схема и алгоритм расчета гидродинамического напора и расчета радиоактивного загрязнения, смоделирован процесс распространения радиоактивного вещества урана – 238 из точечного источника и процесс распространения урана при попадании в водозаборную скважину.

2.4 Метод локализации источников загрязнения подземных вод

Очистка подземных вод от загрязнения является очень дорогостоящим мероприятием, поэтому основным методом их защиты является профилактика, т.е. выявление источников и мощности загрязнения, а также разработка мер по предотвращению поступления загрязнений в подземные воды. Особенно это относится к загрязнению подземных вод промышленными предприятиями и городскими поселениями, которые имеют более или менее локальный характер. Загрязнение подземных вод может происходить как от точечных, так и распределенных источников. В математическом моделировании подземных вод различают два подхода: прямой и обратный. В прямом подходе путем решения управляющих уравнений рассчитывается поведение неизвестных параметров, таких как скорость, давление, концентрация примесей и т.д. после начального момента времени, в который они считаются известными. При обратном подходе рассчитываются значения физических параметров, которые неизвестны в начальный момент времени или на границе области движения.

Обратные задачи для подземных вод рассматривались в работах [51,52,53,54,55,56,57,58,59,60]. В частности в работе [57] рассмотрена одномерная обратная задача о нахождении функции источника загрязнения, зависящей от времени и координаты. Авторы сводят задачу к одномерному параболическому уравнению с коэффициентом, зависящим от времени и сепарабельной функции источника, решается обратная задача о нахождении параметров источника загрязнений по данным измерений.

Необходимо отметить, что обратные задачи, сформулированные для грунтовых вод, являются параболическими. В этой связи необходимо отметить работу [61], авторы которой внесли заметный вклад в теорию и численные методы решения параболических обратных задач.

2.4.1 Постановка задачи

Распространение загрязнения грунтовых вод описывается следующим уравнением:

$$RC_t = DC_{xx} - vC_x, \quad (2.49)$$

где $C(x,t) = \tilde{C}(x,t) - C_0$, \tilde{C} – концентрация вещества, попавшего в грунтовые воды, C_0 – среднее фоновое значение концентрации данного вещества, D – коэффициент диффузии, R – коэффициент замедления (retardation factor) ($R \geq 1$), v – скорость движения грунтовых вод.

Положим, что в начальный момент времени концентрация вредной примеси в грунтовых водах не превышало C_0 , т.е.

$$C(x,0) = 0. \quad (2.50)$$

Положим, что в точке $x = 0$ процесс воздействия на грунтовые воды описывается граничным условием:

$$-(DC_x - vC)|_{x=0} = v f(t). \quad (2.51)$$

Положим, что на достаточно большом расстоянии от точки наблюдений концентрация вещества не меняется

$$C_x \rightarrow 0 \quad (x \rightarrow \infty). \quad (2.52)$$

При известной функции $f(t)$ и значений величин D , R и v нетрудно вычислить функцию $C(x,t)$, удовлетворяющей прямой задаче (2.49)-(2.52).

В случае, если функция $f(t)$ неизвестна, будем считать, что нам доступны измерения концентрации загрязнения в некоторой удалённой точке $x = x_0$:

$$C(x_0,t) = g(t). \quad (2.53)$$

Таким образом, можно сформулировать обратную задачу: По данным измерений (2.53) определить неизвестную функцию $f(t)$, если известно, что приведённая концентрация $C(x,t)$ удовлетворяет прямой задаче (2.49)-(2.52) и параметры D , R и v известны.

2.4.2 Эквивалентные постановки, существование и единственность решения обратной задачи

Применим преобразование Лапласа по переменной t , тогда уравнение (2.49) преобразуется к виду:

$$\hat{C}_{xx} - \frac{\nu}{D} \hat{C}_x - \frac{R}{D} p \hat{C} = 0, \quad (2.54)$$

где $\hat{C}(p) = L[C(t)]$ и p – параметр преобразования Лапласа. Краевые условия могут быть получены в виде:

$$-(D\hat{C}_x - \nu\hat{C})|_{x=0} = \nu\hat{f}(p), \hat{C}_x \rightarrow 0 \quad (x \rightarrow \infty). \quad (2.56)$$

Дополнительная информация

$$\hat{C}(x_0, p) = \hat{g}(p). \quad (2.57)$$

Решение уравнения () в общем виде:

$$\hat{C}(x, p) = A_1 e^{\lambda_1 x} + A_2 e^{\lambda_2 x}, \quad \text{где } \lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\frac{\nu}{D} \pm \sqrt{\frac{\nu^2}{D^2} + 4 \frac{R}{D}} \right].$$

В силу второго краевого условия (2.541) $A_1 = 0$. Из (2.56) следует соотношение

$$\hat{C}(x, p) = \hat{g}(p) e^{\lambda_2(x-x_0)}.$$

Подставляя данное выражение в первое краевое условие (2.55) получаем связь между образами Лапласа функций $f(t)$ и $g(t)$:

$$\hat{g}(p) = 2ae^{ab} \frac{e^{-b\sqrt{a^2+p}}}{a + \sqrt{a^2+p}} \hat{f}(p), \quad \text{где } a = \frac{\nu}{\sqrt{RD}}, \quad b = x_0 \sqrt{\frac{R}{D}}. \quad (2.57)$$

Обратное преобразование Лапласа [62] приводит к соотношению

$$g(t) = \int_0^t K(t-s) f(s) ds, \quad (2.60)$$

где

$$K(t) = 2ac^{ab} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{b^2}{4t}} - ac^{ab+a^2t} \operatorname{erfc} \left(\frac{b}{2\sqrt{t}} + a\sqrt{t} \right) \right] e^{-a^2t}.$$

Получаем, что решение обратной задачи (2.49)-(2.53) эквивалентно решению интегрального уравнения Вольтерра 1-го рода (2.58).

Необходимо отметить, что уравнение Вольтерра 1-го рода (2.58) известными способами [63] к уравнению Вольтерра 2-го рода не может быть приведено, потому что $K(0) = 0$ и любая производная ядра так же равно нулю в точке $t = 0$. Таким образом, численное решение (2.58) является некорректной задачей [64].

Рассмотрим функцию $K(t)$. Очевидно, что существует некоторая выколота окрестность точки $t = 0$, где $K(t) = 0$. В этом случае по теореме Тичмарша [64,65] если решение уравнения (2.58) существует, то оно единственно. В силу эквивалентности постановки обратной задачи (2.49)-(2.53) решению интегрального уравнения (2.58) получаем: если решение обратной задачи (2.49)-(2.53) существует, то оно единственно. Теорема о существовании решения интегрального уравнения (2.58) в общем виде не известна.

Для практических приложений факт загрязнения может быть хорошо приближен функцией (2.53)

$$f(t) = \beta e^{-\alpha t}. \quad (2.59)$$

Параметры α (1/d) и β (m³/d) характеризуют интенсивность загрязнения грунтовых вод в точке $x = 0$.

Пусть функция $g(t)$ на интервале $[0, T]$ удовлетворяет равенствам:

$$g'(t) + \alpha g(t) = \beta K(t), \quad g(0) = 0, \quad (2.60)$$

где α и β – некоторые постоянные, тогда решение обратной задачи (2.49)-(2.53) на интервале $[0, T]$ существует и даётся выражением (2.63).

Действительно, для решения задачи Коши (2.60) имеет место выражение

$$g(t) = \int_0^t K(s) \beta e^{-\alpha(t-s)} ds,$$

что совпадает с (2.58) после замены переменных $\tau = t - s$.

Очевидно, что задача определения постоянных α и β может быть сформулирована так: найти постоянные α и β , если известна функция $g(t)$ и известно, что она удовлетворяет задаче (2.60).

2.4.3 Численное решение обратной задачи

Предложенные ниже варианты численного решения обратной задачи опробовались на симулированных данных, т.е. выбирались некоторые значения постоянных α и β возможные на практике, по функции $f(t)$ вида (2.55) вычислялась функция $g(t)$, после чего к ней добавлялась мультипликативная случайная ошибка

$$g_\delta(t_k) = g(t_k) \left(1 + \xi_k \frac{P}{100} \right),$$

где ξ_k – случайная величина, нормально распределённая на интервале $[-1, 1]$, и P – величина ошибки в процентах.

Поскольку в реальных данных присутствует ошибка, целесообразно применение процедуры сглаживания данных. Исходя из свойств процедур сглаживания (хорошее удаление высокочастотных составляющих [66,67]), для численных экспериментов были выбраны две: 1) скользящее среднее

$$\tilde{g}(t_i) = \frac{1}{2N+1} \sum_{l=-N}^N g_\delta(t_{i+l})$$

и 2) сглаживание с Гаусовым ядром:

$$\tilde{g}(t_i) = \frac{1}{2N+1} \sum_{l=-N}^N G\left(\frac{g\delta(t_i) - g\delta(t_{i+l})}{b}\right) g\delta(t_{i+l}) / \sum_{l=-N}^N G\left(\frac{g\delta(t_i) - g\delta(t_{i+l})}{b}\right),$$

где

$$G(t) = \frac{1}{0.37\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2(0.37)^2}}$$

и b – параметр, определяемый шириной окна сглаживания.

В работе везде было выбрано $N = 5$, $b = (2N + 1)\tau$, где $\tau = 1$ сутки — шаг по времени, с которым нам известна функция $g(t)$.

Было проведено большое количество численных экспериментов. Ниже результаты и выводы из них будут сделаны на примере, когда точным решением обратной задачи являлась пара: $\alpha = 3.0 \cdot 10^{-2}$, $\beta = 5.0$.

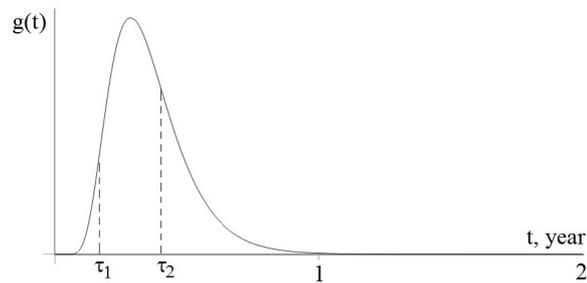


Рисунок 2.18- Функция $g(t)$.

Ошибка в данных обратной задачи составляла $P = 3\%$. $D = 10$ (m²/d), $R = 1$, $\nu = 1$ (m/d), $x_0 = 100$ (m).

Для вычисления функции $K(t)$ необходимо вычислять функцию $\text{erfc}(t)$. Для этого используется выражение [68]:

$$\text{erfc}(t) = e^{-t^2} \epsilon(t), \quad (2.61)$$

Где

$$\epsilon(t) = \tau e^{\eta(\tau)}, \quad \tau = 1/(1 + 0.5t),$$

$$\eta(\tau) = -1.26551223 + 1.00002368\tau + 0.37409196\tau^2 + 0.09678418\tau^3 - 0.18628806\tau^4 + 0.27886807\tau^5 - 1.13520398\tau^6 + 1.48851587\tau^7 - 0.82215223\tau^8 + 0.17087277\tau^9.$$

С учётом (2.61) выражение для $K(t)$ может быть переписано:

$$K(t) = 2a \cdot e^{-\left(\frac{b}{2\sqrt{t}} - a\sqrt{t}\right)^2} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi t}} - a\epsilon\left(\frac{b}{2\sqrt{t}} + a\sqrt{t}\right) \right].$$

2.4.4 Первый численный метод решения

Поскольку, данные $g(t)$ должны удовлетворять (2.60), то может быть предложен следующий алгоритм:

- Шаг 1: Выбор интервала $[\tau_1, \tau_2]$ (см. Рис. 2.19), откуда будут взяты данные для восстановления параметров α и β ;
- Шаг 2: Выбор моментов времени $t_{1,i} < t_{2,i}$ ($i = \overline{0, N}$) из интервала $[\tau_1, \tau_2]$;
- Шаг 3: Решение системы уравнений

$$\begin{aligned} \tilde{g}_\delta(t_{1,i})\alpha - K(t_{1,i})\beta &= -\frac{1}{2\tau} [\tilde{g}_\delta(t_{1,i} + \tau) - \tilde{g}_\delta(t_{1,i} - \tau)] \\ \tilde{g}_\delta(t_{2,i})\alpha - K(t_{2,i})\beta &= -\frac{1}{2\tau} [\tilde{g}_\delta(t_{2,i} + \tau) - \tilde{g}_\delta(t_{2,i} - \tau)]. \end{aligned} \quad (2.62)$$

и получаем набор значений $\{\alpha_i, \beta_i\}$ ($i = \overline{0, N}$);

- Шаг 4: Вычисление средние значения α_e и β_e , которые принимаем за решение обратной задачи.

В численных экспериментах $t_{1,0} = \tau_1$, $t_{2,0} = \tau_{1,0} + 20\tau$, далее каждая последующая пара $(t_{1,i}, t_{2,i})$ получалась из предыдущей сдвигом на один шаг $\tau = 1$ (сутки) вправо, $N = 150$. Результаты восстановления:

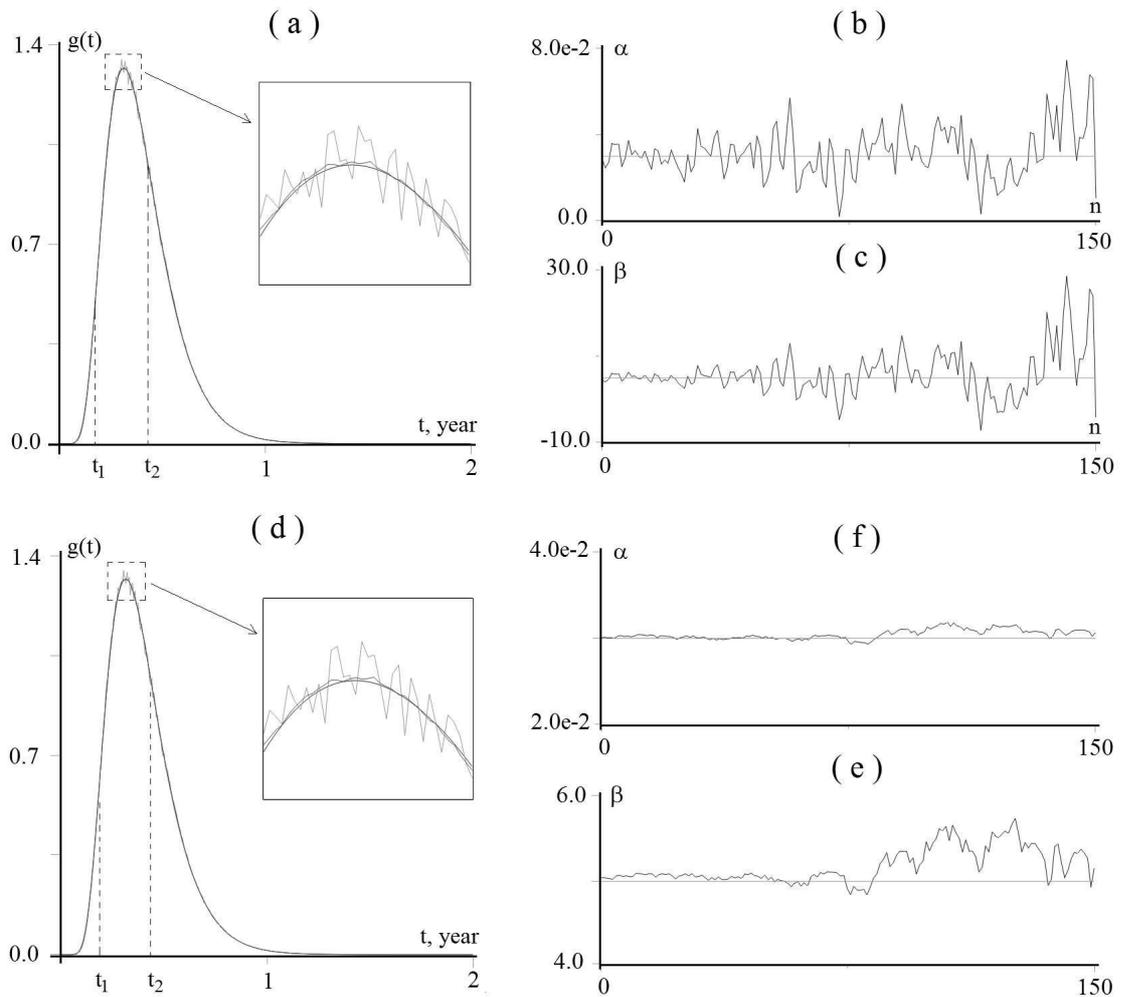


Рисунок 2.19 - Функции $g(t)$, $g_\delta(t)$ и $\tilde{g}_\delta(t)$, результаты восстановления α_i и β_i ($i = \overline{0, N}$).

a) и d) $g(t)$ – синяя линия; $g_\delta(t)$ – зелёная линия;

a) $\tilde{g}_\delta(t)$ – красная линия, сглаживание скользящим средним;

d) $\tilde{g}_\delta(t)$ – красная линия, сглаживание с Гауссовым ядром.

b,c) результаты восстановления значений α_i и β_i для различных времён $t_{1,i}$ и $t_{2,i}$ ($i = \overline{0, N}$) из интервала $[\tau_1, \tau_2]$, когда использовалось сглаживание данных скользящим средним восстановленные значения показаны синей линией, точные значения – зелёной. e,f) результаты восстановления значений α_i и β_i для

различных времён $t_{1,i}$ и $t_{2,i}$ ($i = \overline{0, N}$) из интервала $[\tau_1, \tau_2]$, когда использовалось сглаживание данных с Гауссовым ядром, восстановленные значения показаны синей линией, точные значения – зелёной.

Сглаживание скользящим средним, восстановленные значения – $\alpha_e = 3.18 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_e = 5.86$, относительная ошибка – 6 и 17 % соответственно;

Сглаживание с Гауссовым ядром, восстановленные значения – $\alpha_e = 3.18 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_e = 5.86$, относительная ошибка – 6 и 17 % соответственно.

На Рис. 2.19 представлены функции $g(t)$, $g_\delta(t)$ и $\tilde{g}_\delta(t)$ и результаты восстановления α_i и β_i ($i = \overline{0, N}$), когда были использованы различные варианты сглаживания.

Сглаживание с Гауссовым ядром даёт значительно меньший разброс величин α_i и β_i относительно точных значений. Однако в обоих случаях средние значения α_e и β_e оказались одинаковыми.

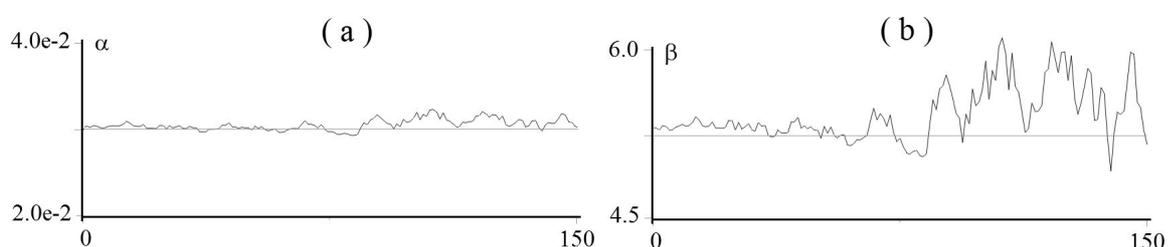


Рисунок 2.20 - Результаты восстановления α_i и β_i ($i = \overline{0, N}$).

Восстановленные значения показаны синей линией, точное значение – зелёной.

Недостаток предложенного метода в том, что в его реализации присутствует численное дифференцирование данных, что является некорректной задачей [69].

2.4.5 Второй численный метод решения

Чтобы уменьшить влияние ошибок, содержащихся в $\tilde{g}_\delta(t)$, модифицируем вышеприведённый алгоритм:

- Шаг 1: Выбор интервала $[\tau_1, \tau_2]$ (рис. 2.18), откуда будут взяты данные для восстановления параметров α и β ;
- Шаг 2: Выбор моментов времени $t_{1,i} < t_{2,i}$ и $t_{3,i} < t_{4,i}$, $t_{1,i} < t_{3,i}$, $t_{2,i} < t_{4,i}$, ($i = \overline{0, N}$) из интервала $[\tau_1, \tau_2]$;
- Шаг 3: Решение системы уравнений

$$\begin{aligned}
\int_{t_{1,i}}^{t_{2,i}} \tilde{g}_\delta(t) dt \cdot \alpha - \int_{t_{1,i}}^{t_{2,i}} K(t) dt \cdot \beta &= \tilde{g}_\delta(t_{1,i}) - \tilde{g}_\delta(t_{2,i}), \\
\int_{t_{3,i}}^{t_{4,i}} \tilde{g}_\delta(t) dt \cdot \alpha - \int_{t_{3,i}}^{t_{4,i}} K(t) dt \cdot \beta &= \tilde{g}_\delta(t_{3,i}) - \tilde{g}_\delta(t_{4,i}).
\end{aligned}
\tag{2.63}$$

и получаем набор значений $\{\alpha_i, \beta_i\}$ ($i = \overline{0, N}$);

• Шаг 4: Вычисление средних значений α_e и β_e , которые принимаются за решение обратной задачи.

В системе (2.63) интегралы вычисляются по формуле трапеций. В численных экспериментах $t_{1,0} = \tau_1$, $t_{2,0} = t_{1,0} + 70\tau$, $t_{3,0} = \tau_1 + 50\tau$, $t_{4,0} = t_{3,0} + 70\tau$, далее каждые последующие пары $(t_{1,i}, t_{2,i})$ и $(t_{3,i}, t_{4,i})$ получались из предыдущих сдвигом на один шаг $\tau = 1$ (сутки) вправо, $N = 150$. Поскольку сглаживание с Гауссовым ядром дало меньший разброс получаемых величин, то для сглаживания функции $g_\delta(t)$ использовался только эта процедура. Результаты восстановления: $\alpha_e = 3.07 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_e = 5.22$, относительная ошибка – 2.36 и 4.36 % соответственно.

На рис. 2.16 представлены результаты восстановления величин α_i и β_i . Видно, что ошибка восстановления уменьшилась. Необходимо отметить, что вычисления для каждой из пар $(t_{1,i}, t_{2,i})$ и $(t_{3,i}, t_{4,i})$ могут вестись параллельно.

2.4.6 Третий численный метод решения

Ниже приведённый метод решения можно считать традиционным. Запишем функцию невязки:

$$J(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^N n^2(t_i), \quad n(t_i) = g(t_i) - \tilde{g}_\delta(t_i).
\tag{2.64}$$

Для поиска минимума можем воспользоваться методом Ньютона (см., например, здесь [70]):

$$\begin{bmatrix} \alpha^{k+1} \\ \beta^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha^k \\ \beta^k \end{bmatrix} - H^{-1}(\alpha^k, \beta^k) \nabla J(\alpha^k, \beta^k).$$

Для этого необходимо знать выражение для градиента и матрицы вторых производных функции J , которые могут быть получены в следующем виде:

$$\nabla J(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} J_\alpha \\ J_\beta \end{bmatrix}, \quad H(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} J_{\alpha\alpha} & J_{\alpha\beta} \\ J_{\alpha\beta} & J_{\beta\beta} \end{bmatrix},$$

где

$$\begin{aligned}
J_\alpha &= \sum_{i=1}^N 2n(t_i)g_\alpha(t_i), & J_\beta &= \sum_{i=1}^N 2n(t_i)g_\beta(t_i), \\
g_\alpha(t) &= -\int_0^t g(s)e^{-\alpha(t-s)} ds, & g_\beta(t) &= -\int_0^t K(s)e^{-\alpha(t-s)} ds, \\
J_{\alpha\alpha} &= \sum_{i=1}^N 2(g_\alpha^2(t_i) + n(t_i)g_{\alpha\alpha}(t_i)), & J_{\beta\beta} &= \sum_{i=1}^N 2g_\alpha^2(t_i), \\
J_{\alpha\beta} &= \sum_{i=1}^N 2(g_\alpha(t_i)g_\beta(t_i) + n(t_i)g_{\alpha\beta}(t_i)), \\
g_{\alpha\alpha}(t) &= -2\int_0^t g_\alpha(s)e^{-\alpha(t-s)} ds, & g_{\alpha\beta}(t) &= -\int_0^t g_\beta(s)e^{-\alpha(t-s)} ds.
\end{aligned}$$

Нетрудно видеть, что выше введённые функции удовлетворяют следующим задачам:

$$\begin{aligned}
\begin{cases} g'_\alpha(t) + \alpha g_\alpha(t) = -g(t) \\ g_\alpha(0) = 0. \end{cases}, & \begin{cases} g'_\beta(t) + \alpha g_\beta(t) = K(t), \\ g_\beta(0) = 0. \end{cases} \\
\begin{cases} g'_{\alpha\alpha}(t) + \alpha g_{\alpha\alpha}(t) = -2g_\alpha(t) \\ g_{\alpha\alpha}(0) = 0. \end{cases}, & \begin{cases} g'_{\alpha\beta}(t) + \alpha g_{\alpha\beta}(t) = -g_\beta(t) \\ g_{\alpha\beta}(0) = 0. \end{cases}
\end{aligned}$$

Зависимость J от аргументов α и β является нелинейной. Вообще говоря, такая функция может иметь локальные минимумы и максимумы, следовательно, минимизационный процесс может привести в локальный минимум. Также известно, что метод Ньютона нуждается в том, чтобы начальное приближение было достаточно близко к точке минимума. Однако, известно, как решить данную проблему: сначала делается несколько шагов, например, методом сопряжённых градиентов [70] а затем применяют метод Ньютона. Поскольку это хорошо известно, ниже это не будет оговариваться специально.

На Рис. 2.21 приведена функция $J(\alpha, \beta)$. Видно, что она имеет выпуклый и овражный характер. Отдельно на Рис. 4а отображена зона, где $J[\alpha, \beta] \leq 0.1$, на Рис. 4б – $J[\alpha, \beta] \leq 0.01$.

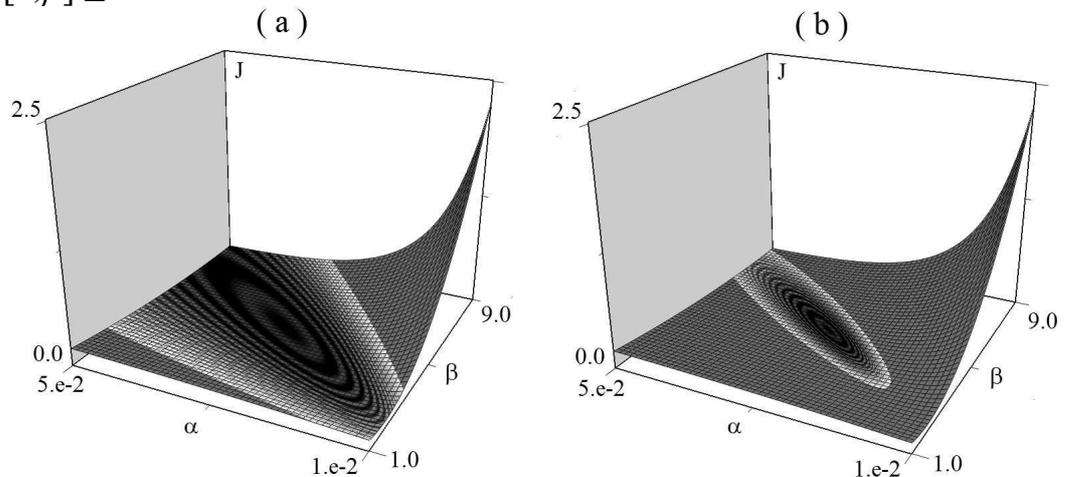


Рисунок 2.21 - Вид функции $J(\alpha, \beta)$. Минимум в точке $(\alpha, \beta) = (3.0 \cdot 10^{-2}, 5)$. а) отдельно выделена область $J(\alpha, \beta) < 0.1$, б) отдельно выделена область $J(\alpha, \beta) < 0.01$

Как видно из графика, с одной стороны, у функции отсутствуют локальные минимумы и максимумы, с другой стороны, функция имеет овраг (линии уровня вытянуты в одном направлении) и пологий вид (область, где значения функции J меньше некоторого ε , является достаточно большой). При наличии ошибок в данных обратной задачи область значений функции, где она меньше некоторого ε , увеличивается [71, 72, 73], что приводит к ошибке при поиске глобального минимума. Из вышеизложенного следует, что результат минимизации функции $J(\alpha, \beta)$ может зависеть от местоположения начального приближения.

Для численного решения обратной задачи методом Ньютона выберем четыре различных начальных приближения и осуществим минимизацию функции (2.60). Результаты восстановления:

- начальное приближение – $\alpha^0 = 1.0 \cdot 10^{-2}$ и $\beta^0 = 1.0$; результат минимизации – $\alpha^* = 2.91 \cdot 10^{-2}$ и $\beta^* = 4.72$; относительная ошибка – 3.0 и 5.6 % соответственно;

- начальное приближение – $\alpha^0 = 5.0 \cdot 10^{-2}$ и $\beta^0 = 9.0$; результат минимизации – $\alpha^* = 3.34 \cdot 10^{-2}$ и $\beta^* = 5.48$; относительная ошибка – 6.8 и 9.6 % соответственно;

- начальное приближение – $\alpha^0 = 1.0 \cdot 10^{-2}$ и $\beta^0 = 9.0$; результат минимизации – $\alpha^* = 3.07 \cdot 10^{-2}$ и $\beta^* = 5.18$; относительная ошибка – 2.33 и 3.6 % соответственно;

- начальное приближение – $\alpha^0 = 5.0 \cdot 10^{-2}$ и $\beta^0 = 1.0$; результат минимизации – $\alpha^* = 3.08 \cdot 10^{-2}$ и $\beta^* = 4.81$; относительная ошибка – 2.67 и 3.8 % соответственно.

Предложено три метода решения обратной задачи. Первый метод наименее устойчив к наличию ошибок в данных обратной задачи. Причиной этого в том, что задача численного дифференцирования является некорректной. Второй и третий метод с надлежащим выбором начального приближения дают сравнимые по точности результаты восстановления. С точки зрения простоты реализации, скорости вычислений и возможности распараллеливания предпочтителен второй метод численного решения обратной задачи.

2.4.7 Численное решение обратной задачи, случай нескольких “горбов”

Все вышеприведённые расчёты были осуществлены, когда данные обратной задачи имели один “горб”, т.е. факт загрязнения имел место, и можно было выделить временной отрезок, когда приведённая концентрация $C(x_0, t)$ имеет вид как, например, на рис. 2.18. Однако, возможен случай, когда с некоторыми интервалами времени в точке $x = 0$ случается несколько фактов загрязнения грунтовых вод. В этом случае кривая $g(t)$ может иметь два и более “горбов” (рисунок 2.22)

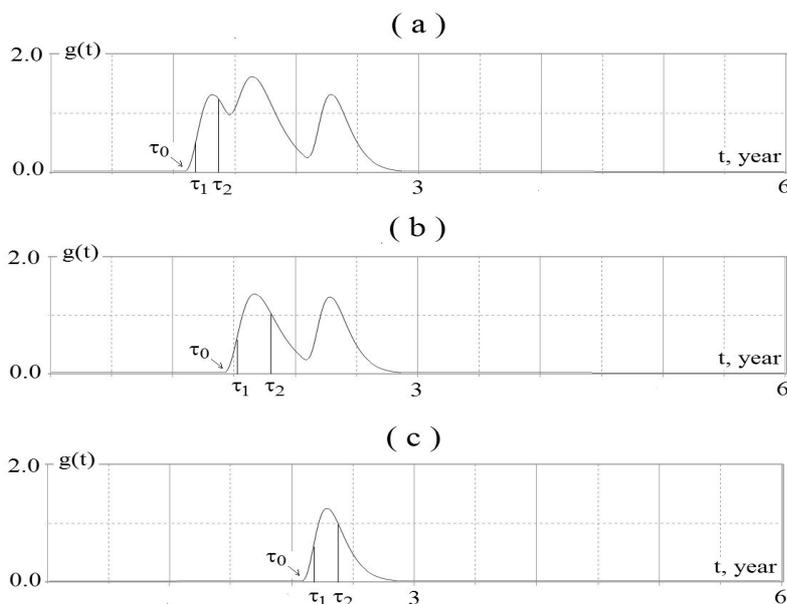


Рисунок 2.22- Возможный пример многолетних наблюдений за концентрацией загрязняющей примеси в грунтовых водах. а)-с) – этапы восстановления параметров, отвечающих за каждый отдельный “горб”.

Воспользуемся линейностью обратной задачи. Будем последовательно определять параметры α_k и β_k ($k = 1,2,3$), отвечающие за каждый “горб” по следующему плану:

- производим сглаживание данных многолетних наблюдений;
- определяем начальный момент времени τ_0 (рис. 2.22а), который будет принят за начальный;
- выделяем временной отрезок $[\tau_1, \tau_2]$ на котором будет проводиться восстановление параметров α_1 и β_1 для первого “горба”;
- используя найденные α и β , решаем прямую задачу, получаем функцию $g(t)$ и вычитаем её из данных многолетних наблюдений (рис. 2.22а);
- определяем новый начальный момент времени τ_0 (рис. 2.22б), который будет принят за новый начальный отсчёт времени;
- выделяем новый временной отрезок $[\tau_1, \tau_2]$ на котором будет проводиться восстановление параметров α_2 и β_2 для второго “горба”;
- используя найденные α и β , решаем прямую задачу, получаем функцию $g(t)$ и вычитаем её из данных многолетних наблюдений (рис. 2.22с);
- вновь определяем начальный момент времени τ_0 (рис. 2.22с), который будет принят за новый начальный отсчёт времени;
- выделяем новый временной отрезок $[\tau_1, \tau_2]$ на котором будет проводиться восстановление параметров α_3 и β_3 для третьего “горба”;

Для решения обратных задач по определению параметров α_k и β_k использовался второй метод. Результаты восстановления:

- точные значения – $\alpha_1 = 3.0 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_1 = 5.0$; восстановленные значения – $\alpha_{1e} = 2.93 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_{1e} = 5.28$; относительная ошибка – 2.33 и 5.6 % соответственно;

- точные значения – $\alpha_2 = 2.0 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_2 = 4.0$; восстановленные значения – $\alpha_{2e} = 2.09 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_{2e} = 4.28$; относительная ошибка – 4.5 и 7.0 % соответственно;

- точные значения – $\alpha_3 = 5.0 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_3 = 7.0$; восстановленные значения – $\alpha_{3e} = 5.15 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_{3e} = 7.31$; относительная ошибка – 3.0 и 4.43 % соответственно.

Как видно из вышеизложенного мы имеем вполне удовлетворительные результаты восстановления. Однако, в вышеприведённом примере можно явно видеть наличие трёх “горбов”, т.е. было три факта загрязнений грунтовых вод разнесённых, разнесённых по времени. В рассмотренном примере второе загрязнение было через 120 суток после первого, а третье – через год.

На Рис. 6а представлен пример функции $g(t)$, когда второе загрязнение было через 10 суток после первого, а третье – 25. Видно, что все “горбы” слились воедино. Применим к данным на рисунке 2.23 метод восстановления, считая, что у нас был один факт загрязнения, т.е. действует модель загрязнения (2.55). Логично предположить, что в этом случае восстановленный параметр α будет близок к наименьшему из трёх α_k , а β – к сумме трёх β_k , но несколько меньше, поскольку факты загрязнения разнесены по времени.

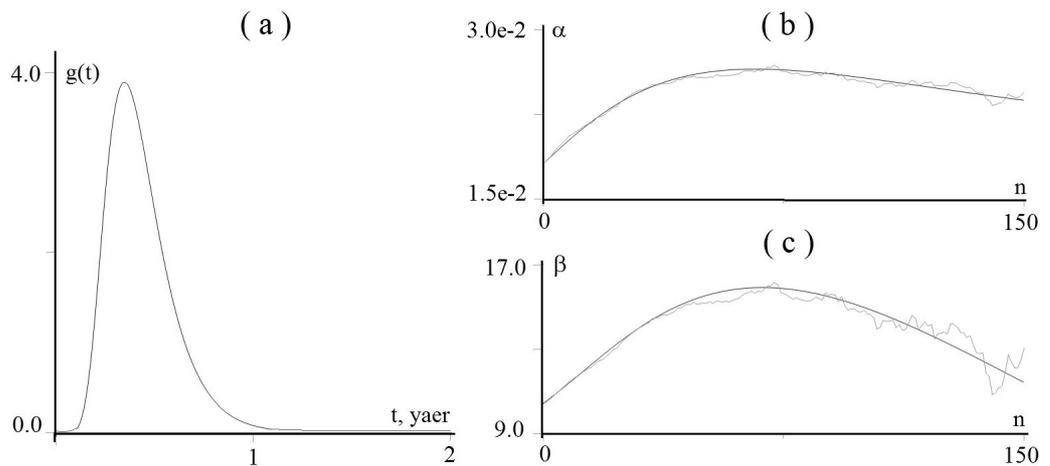


Рисунок 2.23 - а) Возможный пример наблюдений за концентрацией загрязняющей примеси в грунтовых водах, когда “горбы” от трёх различных фактов загрязнения слились воедино; б,с) результаты восстановления значений α_i и β_i , синяя линия – восстановление по точным данным, зеленая линия – восстановление по данным с шумом.

Результат восстановления – $\alpha_e = 2.48 \cdot 10^{-2}$ и $\beta_e = 14.11$. На рис. 2.9 а и б представлены результаты вычисления α_i и β_i , когда данные обратной задачи были без шума и с шумом $P = 3\%$. О том, что “горб”, представленный на рис. 2.9а, является суммой нескольких “горбов” нам говорит наличие выгнутой трендовой составляющей на рис. 2.9 а и б. Наличие трендовой составляющей говорит нам, что принятая нами модель (2.55) загрязнения не “работает” и должна быть заменена другой.

Если применить для восстановления параметров α и β третий метод – метод минимизации целевого функционала, то мы получим кривую $g(t)$ весьма близкую к кривой на рис. 2.9а и некоторые значения α^* и β^* , которые будут приняты нами за решение обратной задачи (в численном эксперименте было получено: $\alpha^* = 2.38 \cdot 10^{-2}$ и $\beta^* = 14.03$). Однако у нас не будет никакой информации о том, что принятая нами модель загрязнения (2.55) не подходит для интерпретации.

Таким образом, рассмотрена обратная задача определения параметров источника загрязнения грунтовых вод. Предложены и апробированы на симулированных данных три метода решения. Показано, что при наличии шума в данных обратной задачи первый даёт неудовлетворительный результат восстановления, а второй и третий сравнимы по точности восстановления искомых параметров. Обратную задачу предлагается решать вторым методом, поскольку с точки зрения простоты реализации, скорости вычислений и возможности распараллеливания является предпочтительным.

Предложенный алгоритм позволяет определять параметры источника загрязнения, когда факты загрязнения достаточно разнесены по времени друг от друга и проявляются в наблюдаемой функции $g(t)$ в виде отдельных “горбов”. Когда же факты загрязнения разнесены по времени недостаточно и сливаются в один “горб” функции $g(t)$, предложенный метод даёт нам некоторые интегральные характеристики параметров загрязнения и индикатор того, что выбранная нами модель загрязнения не подходит.

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

Анализ методов анализа состояния загрязнения подземных вод и моделирования процессов загрязнения позволил определить состав математического обеспечения разрабатываемой информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод.

Для оценки состояния загрязнения подземных вод выбран комплексный метод позволяющий:

- определить степень загрязнения подземных вод;
- масштаб загрязнения подземных вод;
- определить устойчивость системы подземных вод к антропогенному воздействию внешней среды;
- прогнозировать состояние загрязнения подземных вод на основе моделей переноса загрязняющих веществ;
- локализовать источник загрязнения на основе метода решения обратной задачи.

3 РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

3.1 Концепция разработки информационно-аналитической системы мониторинга подземных вод

Обследование процесса загрязнения подземных вод, обзор предшествующих исследований показали, что основные этапы оценки запасов и качества, прогнозирования состояния подземных вод это:

- получение данных из системы удаленного доступа «Подземные воды»;
- получение дополнительной информации об источниках, геоданных;
- обработка полученных данных с помощью алгоритмов оценки запасов и качества подземных вод;
- визуализация данных.

Первые два этапа усвоения данных осуществляются на основе информационного обеспечения системы удаленного доступа «Подземные воды» и базы геоданных. Полученные данные служат входными параметрами для методики расчета индексов качества подземных вод и моделей динамики геофильтрационных процессов, моделей переноса загрязняющих веществ. Анализ состояния подземных вод осуществляется на основе данных режимных партий. Визуализация результатов моделирования осуществляется на основе модуля визуализации информационно-аналитической системы.

На основе анализа состояния проблемы качественного мониторинга системы подземных вод региона и опыта других исследований разработана концепция разработки информационно-аналитической системы экологического мониторинга подземных вод (рис 3.1).

Информационно-аналитическая система должна осуществлять следующие функции (рис.3.2) [74]:

- анализ и прогнозирование загрязнения системы подземных вод;
- автоматически формировать стандартную отчетность, позволяющую отобразить результаты анализа и прогнозирования в виде таблиц, схем, графиков и пояснительных текстов;
- визуализировать результаты анализа и прогнозирования для обеспечения более удобного и качественного восприятия материала пользователями системы.

На стадии анализа загрязнения подземных вод осуществляется оценка степени, интенсивности и масштаба загрязнения. Оценка интенсивности загрязнения подземных вод включает в себя оценку средней минерализации внутри области загрязнения, средней величины других обобщенных показателей качества воды, средней концентрации отдельных веществ, температуры подземных вод.



Рисунок 3.1 - Концепция разработки информационно-аналитической системы экологического мониторинга подземных вод

Результаты анализа и прогнозирования предоставляются пользователям системы, в первую очередь, в виде стандартной отчетности специалистов-гидрогеологов и гидроэкологов. Также формируется отчетность по специальным запросам пользователей.

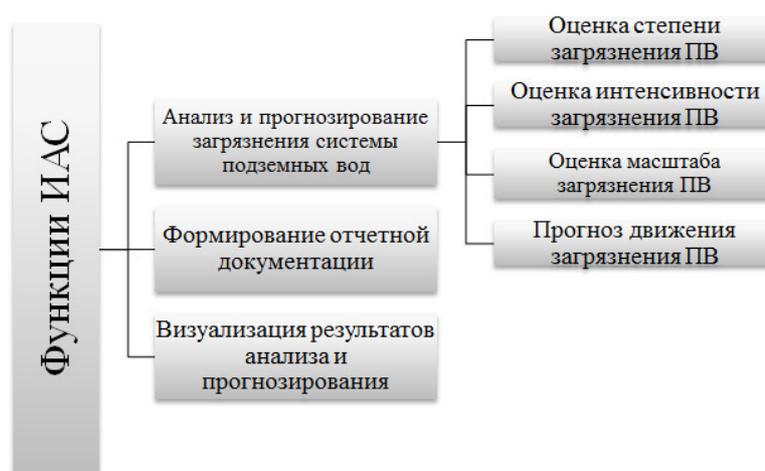


Рисунок 3.2 - Основные функции информационно-аналитической системы «Подземные воды»

Прогнозирование осуществляется на основе оценки состояния системы подземных вод на данный момент с учетом факторов, влияющих на изменение степени, интенсивности, масштаба загрязнения в будущем (климатические условия, антропогенное влияние и т.д.).

Одним из важных модулей информационно-аналитической системы является модуль визуализации результатов анализа и прогнозирования, так как это, во-первых, отвечает требованиям к современным информационным системам, во-вторых, позволит существенно повысить информативность материалов системы. Модуль визуализации должен позволять формировать статичные изображения, иллюстрирующие состояние системы на данное время и динамичные кадры, отображающие ретроспективу изменения системы подземных вод в прошлом или прогнозируемое изменение состояния системы в будущем.

3.2 Архитектура информационно-аналитической системы экологического мониторинга подземных вод

Информационно-аналитическая система мониторинга состояния загрязнения подземных вод (ИАС МПВ) предназначена для автоматизации процесса сбора, хранения, обработки и представления информации об экологическом состоянии подземных вод. ИАСЗПВ является одним из важных компонентов системы управления экологической ситуацией в регионе (городе). Система позволяет осуществить комплексную оценку состояния загрязнения подземных вод, прогноз процесса загрязнения, локализацию источников загрязнения. Полученные результаты позволяют обосновать управленческие решения по охране окружающей среды, а именно подземной гидросферы.

Специалистами Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д.Серикбаева в период 2008-2010 гг. по заказу Министерства индустрии и новых технологий РК для Комитета геологии и недропользования в рамках научного проекта осуществлялась работа, основной целью которой являлось повышение эффективности формирования и использования информационных ресурсов мониторинга подземных вод РК.

Информационная система «Подземные воды» была разработана для реализации основных функций:

- ввод данных;
- контроль корректности и достоверности введенных данных;
- анализ введенных данных;
- построение прогнозов баланса подземных вод на основе введенных данных.

Ввод данных осуществляется посредством документов, представляющих собой паспорта объектов мониторинга, сгруппированные по тематическим разделам (каталогам). При заполнении паспортов объектов пользователям для упрощения ввода предоставлены справочники тематических понятий.

Однако, информационная система, разработанная в результате реализации научного проекта, не содержит подсистемы анализа состояния

загрязнения подземных вод. Поэтому появилась необходимость расширить данную информационную систему путем разработки подсистемы, основной функцией которой являлась бы комплексная оценка степени уязвимости подземных вод, основанная на современных научных моделях и методах. Разработка подобной подсистемы направлено на повышение эффективности функционирования системы на основе богатого эмпирического материала и расширение аналитической составляющей ИС «Подземные воды». На рисунке 3.3 представлена расширенная схема основных функций ИС путем добавления подсистемы оценки.

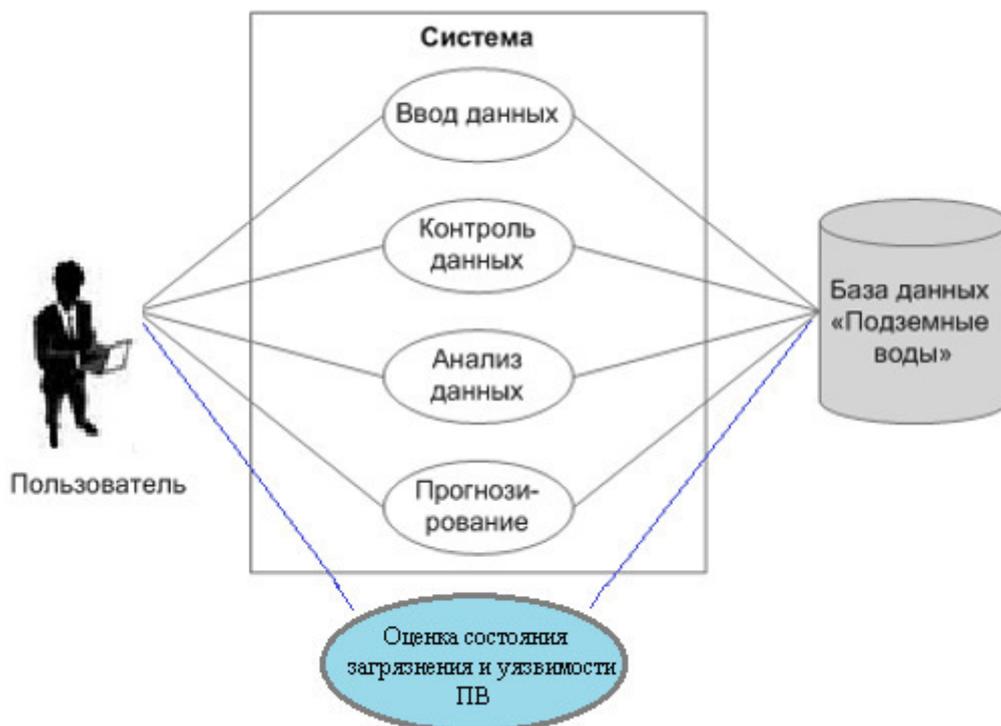


Рисунок 3.3 - Расширение функций ИС «Подземные воды»

Важным фактором эффективности функционирования информационно-аналитической системы является комплекс научных моделей и методов, положенных в основу программных модулей, автоматизирующих процедуры количественных оценок различных параметров моделирования состояния подземных вод и процедур системы принятия решений.

ИАС — это современный высокоэффективный инструмент поддержки принятия тактических, стратегических и оперативных управленческих решений на основе оперативного и наглядного предоставления всей необходимой совокупности данных пользователям, ответственным за анализ состояния дел и принятие управленческих решений [75].

Согласно современным стандартам ISO 15288 и ISO 12207, описывающих процессы жизненного цикла создания информационных и программных систем, в основе всех технических решений по созданию функциональной структуры и

обеспечивающей части подобных систем находится понятие «архитектура системы» [76, 77].

В результате проведенного анализа были установлены характеристики проектируемой системы.

1) Информационные ресурсы мониторинга подземных вод формируются путем импорта данных режимных наблюдений в регионах из Республиканской БД в ИАСМПВ, ввода других данных при помощи интерфейса ИАСМПВ.

2) В каждом входном документе (паспорте объекта) информация систематизируется по смысловому признаку по разделам, в которых отражаются следующие данные:

- идентификационная информация;
- общая информация (общие сведения об объекте);
- информация о территориальной привязке (область, район, населенный пункт);
- информация о пространственной привязке (географические координаты);
- информация о геологической привязке (геологическая структура, горизонт, подземный объект, поверхностный объект и т. д.);
- информация о количественных и качественных показателях по геологическому содержанию объекта (режимные данные).

3) Часть информации в паспортах объектов мониторинга заполняется при помощи классификаторов (справочников), которые также относятся к входным документам (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Структура метаданных паспортов объектов мониторинга

4) К выходным документам относятся отчеты и прогнозы, которые представляют собой аналитические документы, составленные по заранее заданным формам и алгоритмам.

5) Кроме того, к выходным документам относятся запросы, которые представляют собой различные выборки данных по заранее неизвестным (динамически формируемым) критериям.

Территориально-распределенный характер ИАС МПВ определяет схему ее организации как централизованную БД с функционированием в глобальной сети Интернет [78].

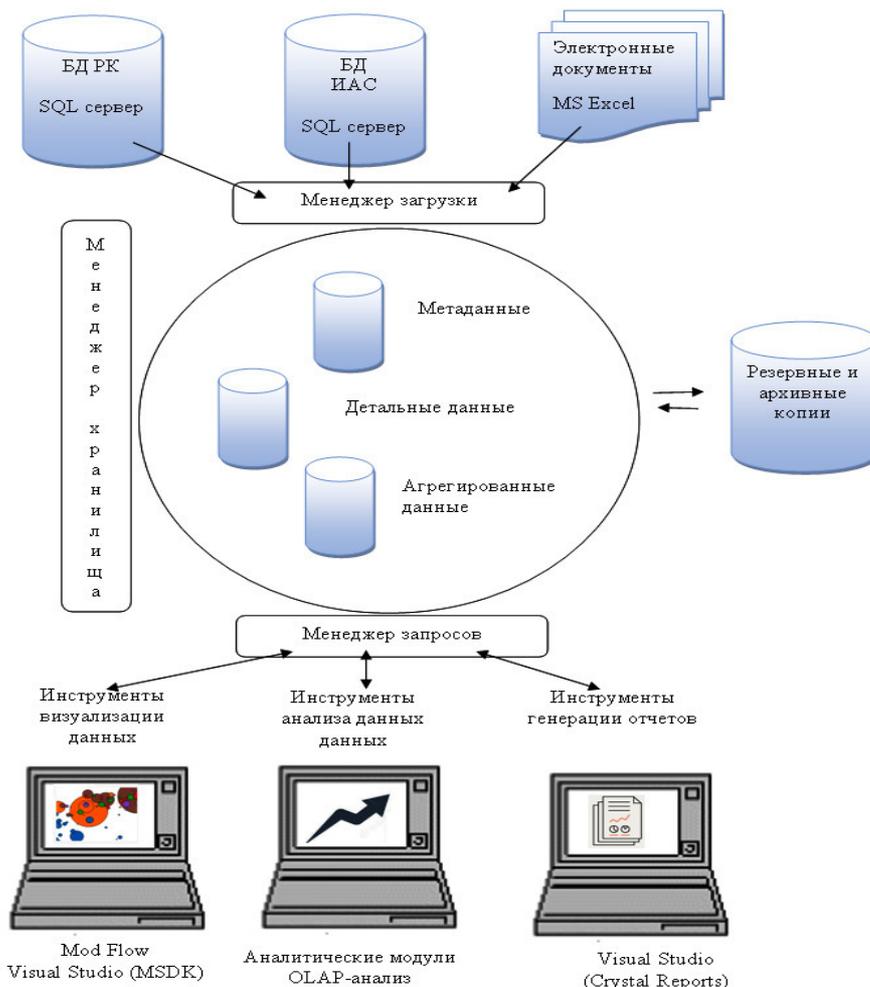


Рисунок 3.5 – Структурная схема информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод

При разработке архитектуры ИАС были учтены основные задачи, которые система должна решать:

- сбор, предобработка и хранение данных;
- построение хранилища данных;
- анализ данных с использованием аналитического инструментария;
- визуализация результатов анализа;

- генерация отчетов.

На рис 3.5 представлена структурная схема информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод.

Информационно-аналитическая система имеет трехзвенную архитектуру (рис.3.6).

База данных в виде набора файлов, СУБД находятся на жестком диске специально выделенного компьютера. На специально выделенном сервере приложений располагается программное обеспечение (ПО) анализа данных по состоянию подземных вод.

С других компьютеров, на которых установлены клиентские приложения, реализующие интерфейс пользователя. Доступ к функционалу серверного приложения осуществляется через защищенные каналы связи.

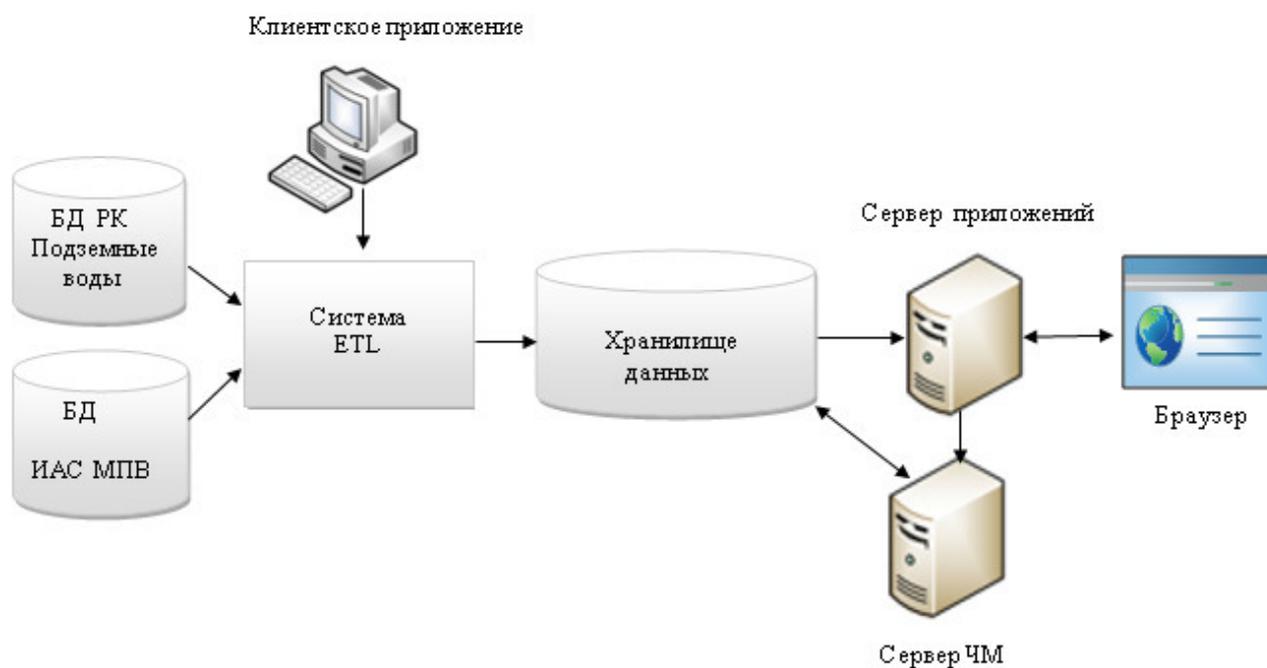


Рисунок 3.6– Архитектура ИАС МПВ

Серверное приложение анализирует запросы пользователей ИАС МПВ, получающих доступ к ИАС МПВ через web-браузер и формирует, в свою очередь, запрос к вычислительному серверу, который, в свою очередь, инициирует запрос к хранилищу данных. Для этого используется язык запросов SQL. Хранилище данных содержит данные, извлеченные и преобразованные системой ETL из Республиканской БД, содержащей режимные данные и из БД ИАС МПВ.

Результат обработки запроса пользователя отображается с помощью интерфейса клиентского приложения в виде экранных сообщений, графических объектов, файлов отчетов.

Конечными пользователями информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод являются лица, принимающие управленческие решения, связанные с природопользованием (гидрологи, геоэкологи).

Этапу проектирования и разработки информационно-аналитической системы оценки состояния загрязнения подземных вод предшествовал этап анализа и выбора математических методов и моделей, используемых в математическом обеспечении системы для решения поставленных задач. Предварительно была реализована задача адаптации данных моделей к условиям региона. Для этих целей были разработаны алгоритмы и протестированы на данных по г. Усть-Каменогорск. Результаты были отображены в предыдущей главе.

3.3 Функциональная модель информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод

Функциональная модель ИАС МПВ обусловлена составом функций системы:

- ввод, редактирование и хранение справочных данных, характеризующих объекты загрязнения, источники загрязнения;
- ввод и редактирование параметров индикаторов, которым присваиваются уникальные имена, используемое при расчете их значений. Описание параметров содержит также единицу измерения, диапазон возможных значений. В описание индикаторов входят критерии, на основе которых осуществляется оценка подземных вод по данному индикатору;
- ведение нормативной базы (предельно-допустимые концентрации загрязняющих веществ и др.);
- ведение журнала результатов лабораторного анализа проб воды из скважин и водозаборов, входящих в наблюдательную сеть;
- подготовку данных для использования в решении задач информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод;
- реализацию задачи оценки состояния подземных вод, включающую комплексную оценку на основе системы индексов. Расчет осуществляется на основе алгоритмов, разработанных соответственно описанию индикаторов и значению параметров, агрегированных во времени и точкам наблюдения.
- реализацию задачи прогнозирования загрязнения подземных вод, решаемой с помощью методов моделирования;
- реализацию задачи локализации источников загрязнения подземных вод, решаемой с помощью метода решения обратной задачи;
- ведение журнала рассчитанных значений параметров в результате решения задач анализа и прогнозирования;
- многомерный анализ данных (Olap-анализ), позволяющий отображать данные экологического мониторинга подземных вод в различных

разрезах Олар-куба (по осям куба). Информация отображается как в табличном, так и в графическом виде. В качестве осей куба могут быть выбраны: индикаторы, объекты наблюдения, объекты-источники загрязнения, временные периоды и др;

- формирование стандартных отчетов и отчетов, формируемых по индивидуальному запросу пользователей;
- визуализацию результатов решения задачи анализа и прогнозирования.

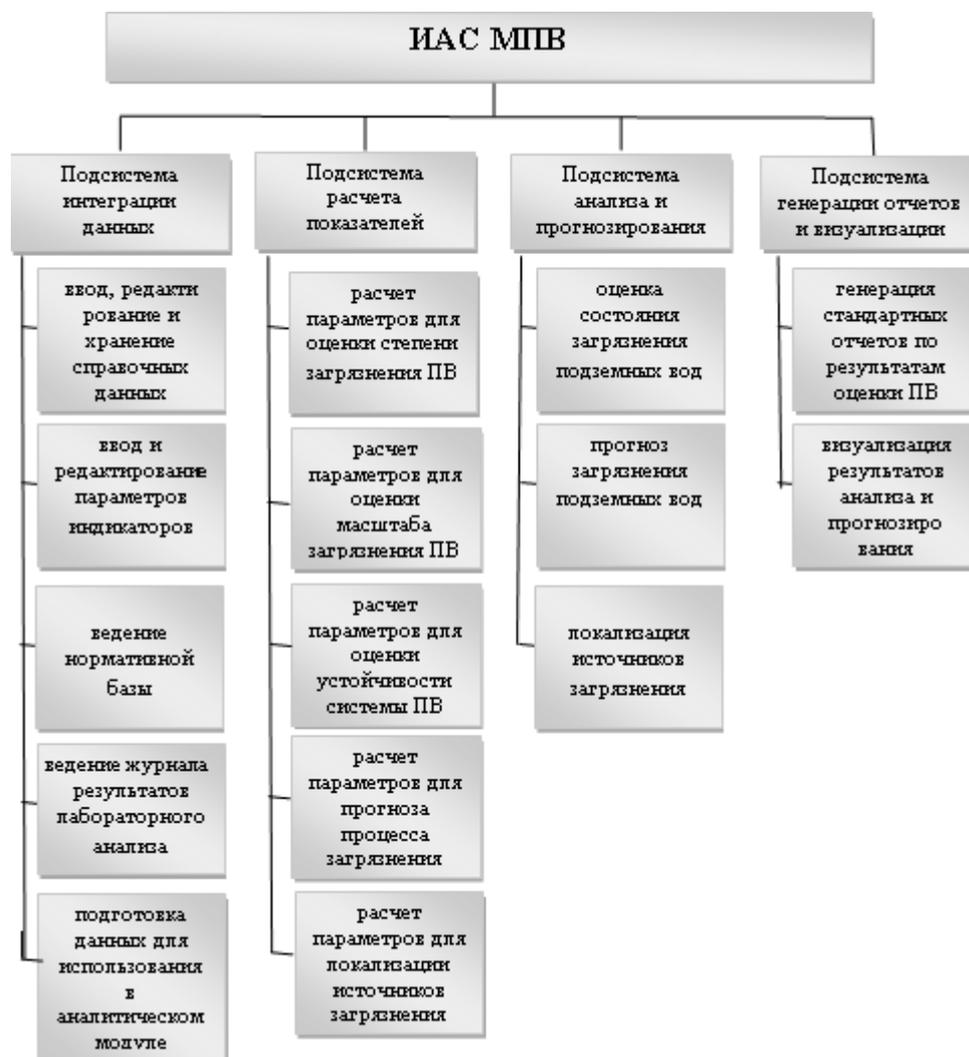


Рисунок 3.7 – Функциональный состав информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод

В соответствии с методикой оценки и прогноза состояния загрязнения подземных вод, в состав функционального обеспечения системы входят (рисунок 3.7):

- подсистема интеграции данных, в которой формируется информационное обеспечение, включающая информацию по объектам мониторинга, концентрациям загрязняющих веществ, по источникам загрязняющих веществ, гидрогеологическую и картографическую информацию;

- подсистема расчета показателей, необходимых для решения задач анализа и прогнозирования;
- подсистема анализа и прогнозирования состояния загрязнения подземных вод;
- подсистема генерации отчетов и визуализации результатов оценки и прогнозирования с использованием.

ИАС МПВ предоставляет специалистам в области гидрологии, гидроэкологии оперативную информацию по оценке состояния состояния загрязнения подземных вод (степень, масштаб), по прогнозу загрязнения для принятия решений и управления системой подземных вод. ИАС МПВ не генерирует правильные решения, а обеспечивает информацией, выполняя функции поддержки принятия решений.

Контекстная диаграмма функциональной модели ИАС МПВ представлена ниже (рисунок 3.8).

Контекстная диаграмма представляет верхний уровень иерархии функций системы, то есть отображает деятельность системы в обобщенном виде.

На следующем этапе осуществляется декомпозиция контекстной диаграммы. Декомпозиция позволяет рассмотреть отдельные блоки контекстной диаграммы, то есть более детально отобразить функции системы.



Рисунок 3.8 – Общая функциональная модель информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод

3.2.1 Функциональная модель подсистемы интеграции данных

Сбор, обработка и хранение данных являются одной из важных задач любой информационно-аналитической системы.

Эффективное хранение информации достигается наличием в составе информационно-аналитической системы целого ряда источников данных.

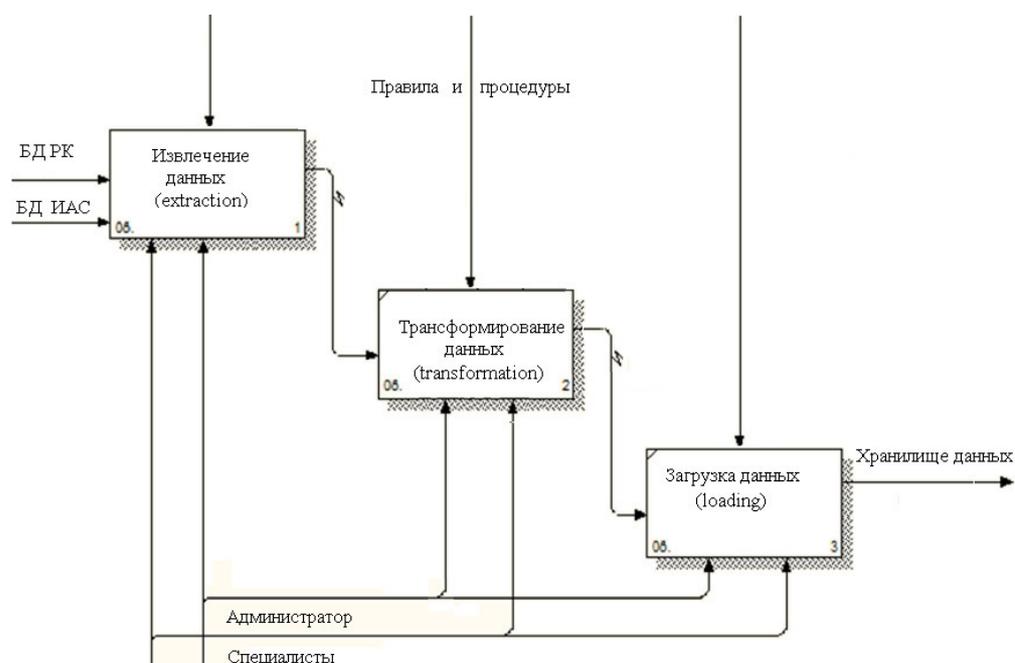
ИАС мониторинга оценки состояния загрязнения подземных вод должна обеспечивать пользователям доступ к аналитической информации, защищенной от несанкционированного использования и открытой как через внутреннюю сеть организации, так и пользователям сети интранет и Интернет.

Разнообразие источников данных обусловлено тем, что часть данных (по объектам мониторинга, химическому составу проб воды и т.д.) импортируется из республиканской БД «Подземные воды», данные по нормативным показателям, параметры моделирования процессов загрязнения подземных вод и др. вводятся непосредственно в ИАС, либо формируются путем вычислений на основе определенных алгоритмов (например, фоновые показатели). Другим фактором разнообразия источников данных является и необходимость использования данных разного формата (картографические данные, свод правил). В целом, источники данных представляют транзакционные источники данных, хранилища данных, витрины данных.

Сбор, обработка, передача в хранилище данных обеспечивается подсистемой интеграции данных. Задача технологий интеграции данных состоит в преодолении многочисленных проявлений неоднородности, присущей информационным системам, которые создавались и создаются, руководствуясь чем угодно, но не унифицированным отношением к данным. Системы имеют разную функциональность, используют различные типы данных (алфавитно-цифровые и медийные, структурированные и неструктурированные), их компоненты различаются по автономности, имеют различную производительность. Системы строятся на разных аппаратных платформах, имеют разные средства управления данными, разное ПО промежуточного слоя, модели данных, пользовательские интерфейсы и многое другое [79].

Интеграция данных на уровне общих данных может быть реализована с помощью хранилищ, в которых данные, поступающие из разных систем оперативной обработки транзакций (OLTP), извлекаются, трансформируются и загружаются (Extraction– Transformation – Loading, ETL) в хранилище данных, а затем используются в аналитической подсистеме. Традиционно ETL-системы использовались для переноса информации из устаревших версий информационных систем в новые. В настоящее время ETL-процесс находит все большее применение для переноса данных из ОИД в ХД и ВД [80].

На рисунке 3.9 отображена функциональная модель подсистемы интеграции данных.



3.9 – Функциональная модель подсистемы интеграции данных

3.2.2 Информационная модель ИАС МПВ

Информационная модель ИАС МПВ представляет собой формализованное описание и документирование информационных процессов, на основании которых разрабатываются и принимаются решения процесса мониторинга состояния загрязнения подземных вод. Основой информационной модели является концептуальная модель базы данных [81-84].

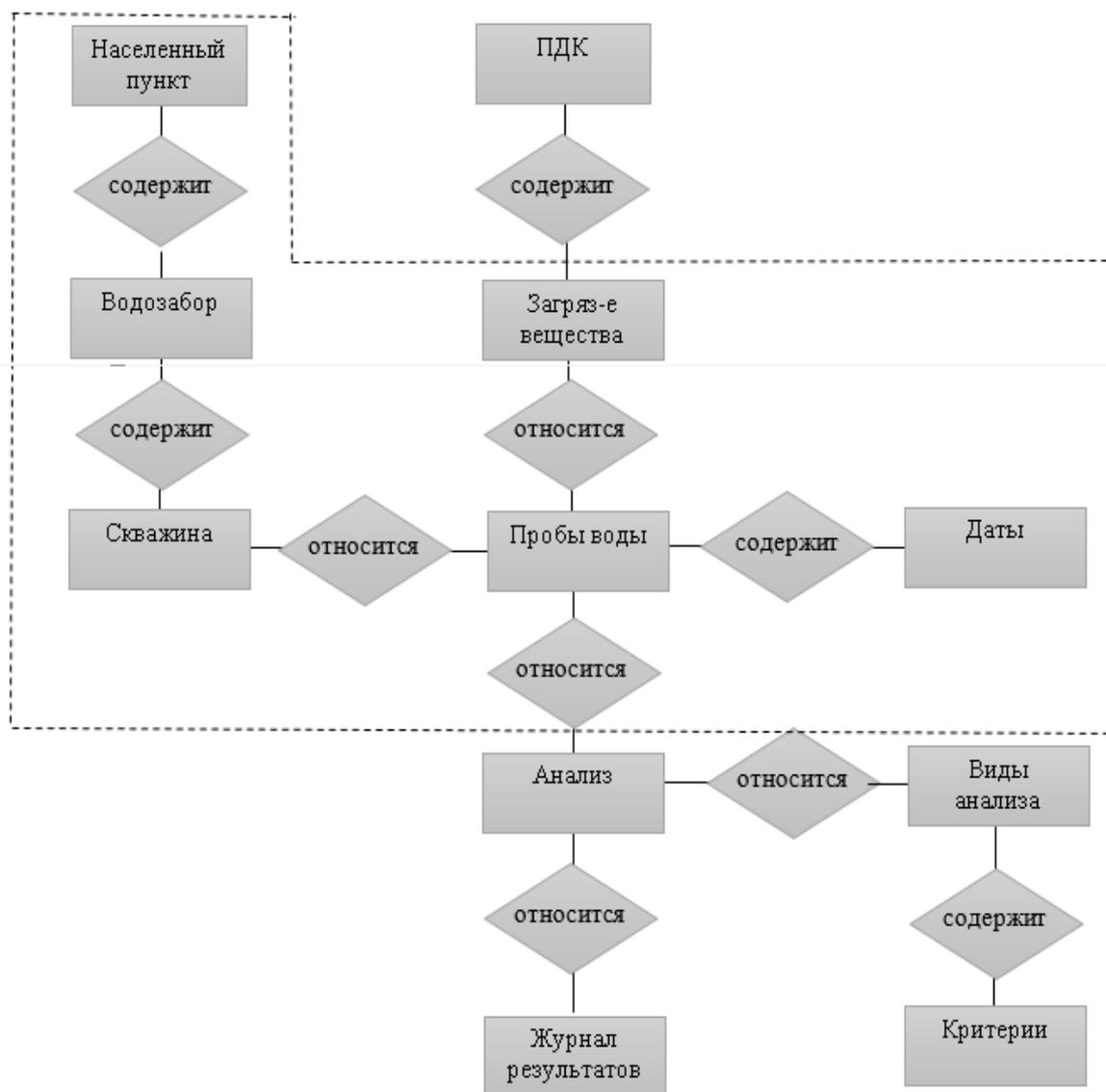


Рисунок 3.10 - Инфологическая модель информационно-аналитической системы мониторинга состояния загрязнения подземных вод

На рисунке 3.10 представлена обобщенная схема концептуальной модели информационно-аналитической системы мониторинга подземных вод, которая дает общее описание системы анализа состояния загрязнения подземных вод, не раскрывая сущности каждого информационного процесса.

Значения атрибутов сущностей, находящихся в контуре импортируются из Республиканской БД «Подземные воды». Данные по ПДК загрязняющих веществ и значения атрибутов инфологической модели, касающиеся аналитических процессов, формируются непосредственно через интерфейс ИАС МПВ.

- каждому загрязняющему веществу должны соответствовать свои нормативные показатели;
- ряд скважин относится к определенному водозабору, а водозаборы – к населенным пунктам или географическим районам;

- каждой пробе воды должна соответствовать фиксированная дата;
- каждому виду анализа соответствует система критериев;
- дата анализа должна быть равна или позже даты проб воды.

Организация информационного обеспечения ИАС МПВ реализована на базе реляционной СУБД Microsoft SQL Server 2012 [85-88]. Данная СУБД является платформой управления данными, позволяющая создать распределенную систему с единой централизованной БД, осуществлять ускоренный доступ к данным на WEB-сервере и быстрое выполнение команд, поддерживать неограниченное количество пользователей, одновременно работающих с базой данных. Microsoft SQL Server 2012 предоставляет обширный набор интегрированных служб, которые позволят значительно расширить стандартные возможности использования данных. Вся информация при этом хранится на основных серверах, подключённых к центру обработки данных.

Рассмотрим базу данных ИАС МПВ. Каждая реляционная таблица базы данных имеет структуру, определяемую атрибутивным составом одного из информационных объектов.

Эмпирические данные, импортируемые из Республиканской БД в ИАС МПВ, данные формируемые при помощи средств самой ИАС, подвергаются анализу с целью извлечения полезной информации для методов и моделей, составляющих аналитический инструментарий ИАС МПВ. Извлечение полезной информации из геохимических данных по подземным водам осуществляется при помощи современных методов анализа данных.

Транзакционные базы данных формируются путем сбора и обработки данных, полученных путем импорта или ручного ввода.

Входные данные представляют собой данные различного формата, поступающих из множества систем оперативной обработки данных (OLTP). Эти данные представляют группу данных, характеризующих:

- свод документов, регламентирующих работу системы мониторинга состояния подземных вод (законодательная и нормативная документация);
- объекты мониторинга (сеть скважин и водозаборов);
- качественную и количественную оценку состояния подземных вод (результаты лабораторного анализа химического состава проб воды);

Часть данных извлекается путем импорта из республиканской БД «Подземные воды», часть – формируется непосредственно в ИАС.

Поступившие данные извлекаются, преобразуются. Осуществляется процесс «очистки», проверки на соответствие нормативно-справочной информации и далее данные загружаются в централизованное хранилище данных.

Ядром системы является интегрированная база данных (ИБД), размещаемая на сервере. На этапе реализации и внедрения ИАС в ИБД консолидируются импортированные данные из республиканской БД «Подземные воды» и данные, формируемые непосредственно через интерфейс ИАС.

Интегрированная база данных (рисунок 3.10) включает:

- базу библиографических описаний документов (паспортные данные объектов мониторинга, нормативная и отчетная документация).
- базу математических моделей (математические методы и модели по оценке уровня загрязнения подземных вод и прогнозу их состояния);
- базу графических данных (картографические данные, графики, диаграммы и др.);

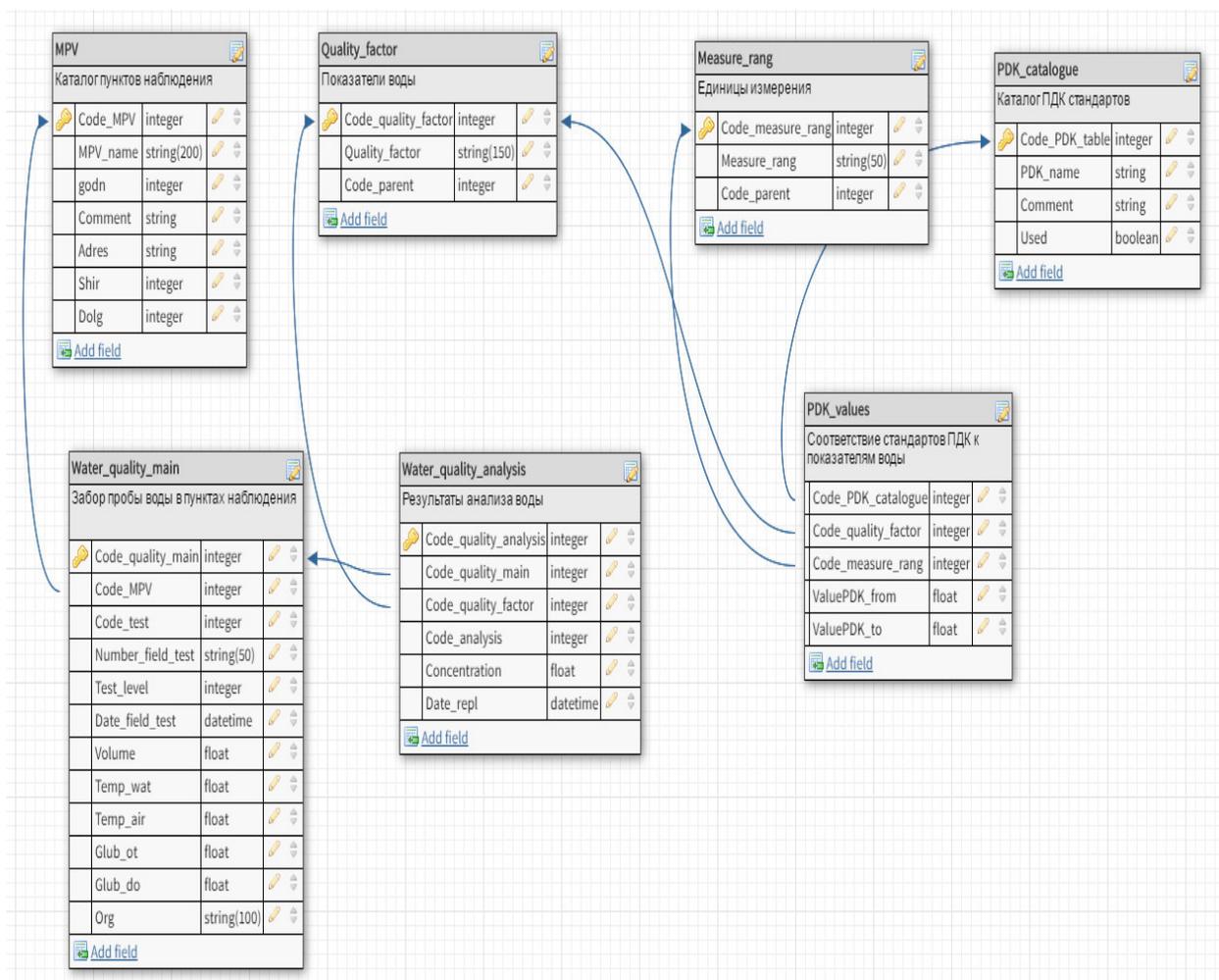


Рисунок 3.11 – Схема данных реляционной базы

Данные, полученные из различных источников данных, как правило, не согласованы друг с другом, поэтому на следующем этапе осуществляется их консолидация, в результате чего формируется аналитические базы данных (хранилища данных, витрины данных). Аналитические базы данных являются источником данных для решения задач анализа состояния ПВ.

Данные по объектам наблюдения: код и наименование скважины, водозабора, дата сооружения, местоположение, геолокационные параметры пункта наблюдения (координаты), глубина, кровля, подошва фильтра, количество и высота слоев, вид грунта каждого слоя.

Данные по объектам-источникам загрязнения: код и наименование объекта, местоположение, геолокационные параметры объекта-источника загрязнения, загрязняющие вещества, сбрасываемые в окружающую среду.

Данные по загрязняющим веществам: группы загрязняющих веществ (металлы, неорганика, фенолы), наименование загрязняющих веществ, единицы измерения загрязняющих веществ.

Нормативные показатели представляют предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ согласно санитарным нормам, принятым в РК и предъявляемым к качеству воды.

Данные по осуществляемым мероприятиям по контролю качества воды представляют собой даты забора воды, данные специалиста, код пункта наблюдения из которого был осуществлен забор пробы воды, данные специалиста осуществившего забор пробы воды.

Данные по результатам лабораторного анализа воды представляют собой информацию об уровне содержания загрязняющего вещества в данной пробе.

Анализ и очистка данных. Процесс извлечения и преобразования данных должен обеспечить необходимый и достаточный объем данных, загружаемых в хранилище данных. Перед загрузкой данные должны быть проанализированы на наличие ошибок.

Существует множество видов ошибок, которые не зависят от предметной области. Таких ошибок выделяют шесть типов:

- противоречивость информации;
- аномальные значения (шум);
- пропуски данных;
- несоответствие форматов данных;
- ошибки ввода данных или опечатки;
- дублирование данных (таб. 3.1).

Таблица 3.1- Примеры проблем отдельного источника данных (нарушение ограничения целостности)

Область/Проблема		Загрязненные данные	Причины
1	2	3	4
Атрибут	Аномальные значения	ind=«Кальций Ca+», concent=1420	Аномальное превышение ПДК значения концентрации кальция в пробе ПВ
	Ошибки ввода данных или опечатки	ind=«Магний Mg2+», date_analysis=20.15.17	Опечатка в дате анализа (номер месяца превышает диапазон 1-12)

1	2	3	4
Запись	Противоречивость информации	ind=«Кальций Ca+», date_analysis=20.15.17 concent=52 ind=«Кальций Ca+», date_analysis=20.15.17 concent=64	Разные значения концентрации кальция в одной пробе воды на одну и ту же дату
	Пропуски данных	ind=«Нитрат NO3», concent=NULL	Отсутствие значения концентрации нитрата (обязательный анализ) в пробе воды
Тип записи	Дублирование	Code_OP=« MW-1-1/1»,X=14613861,416 Code_OP=« MW-1-1/1»,X=14614865,842	Нарушение уникальности кода пункта наблюдения
Источник	Несоответствие форматов данных	Code_OP=« 1-5 - MW»	Нарушение формата кода пункта наблюдения

Очистку данных делят на следующие этапы:

- анализ данных.
- определение порядка и правил преобразования данных;
- тестирование и оценка;
- преобразование;
- противоток очищенных данных.

На первом этапе подробно анализируют данные, чтобы выявить подлежащие удалению виды ошибок и неточностей. Используется два вида проверок данных: вручную или специальными программами. На этом этапе получают метаданные о свойствах и качествах данных.

На втором этапе определяется порядок и правила преобразования данных. Для хранилищ в процессе работы по определению ETL (Extract, Transform, Load - дословно «извлечение, преобразование, загрузка») должны быть определены методы контроля и поток данных, подлежащий преобразованию и очистке.

На третьем этапе определяются две вещи: правильность и эффективность процесса и определение преобразования. Это осуществляется путем тестирования и оценивания. При анализе, проектировании и подтверждении может потребоваться множество итераций.

На четвертом осуществляется выполнение преобразований либо в процессе ETL для загрузки и обновления хранилища данных, или же при ответе на запросы по множеству источников [89].

На пятом этапе происходит замена загрязненных данных в исходных источниках на очищенные. Данный этап мы не можем осуществить, так как источником является единая база данных, в которой ввод данных осуществляется территориальными пользователями, обладающими специальными правами доступа.

На сегодняшний день существуют огромное количество методов по очистке данных от ошибок и неточностей. Никто из специалистов не скажет, какой из них является самым эффективным, потому что каждый метод совершенно по-разному подходит к этой проблеме.

Выделяют такие методы очистки данных:

1. Вычисление средних значений. Если данные содержат большой разброс значений, то метод средних применяется не к отдельному объекту, а к целой группе. Все данные в этом случае разбиваются на группы, содержащие приблизительно однородные элементы с похожими признаками. Внутри каждой из них рассчитывается средняя величина, которая будет типична именно для тех объектов, которые входят в эту группу.

Применим изложенный метод к ошибке пропусков данных. Согласно табл. 3.1, было упущено значение нитрата NO₃— при заполнении результатов концентрации вещества в пробе воды из скважины MW 1-1/1 20.09.2017 г. Сделаем выборку значений концентрации нитрата NO₃— за предыдущие 10 месяцев (табл.3.2).

Таблица 3.2-Значения концентрации нитрата NO₃- за предыдущие 10 месяцев

Показатель	Концентрация	Дата
нитрат NO ₃	24,5	21.08.2017
нитрат NO ₃	89,8	17.07.2017
нитрат NO ₃	21,72	15.06.2017
нитрат NO ₃	24,12	24.05.2017
нитрат NO ₃	23,6	10.03.2017
нитрат NO ₃	43,76	16.02.2017
нитрат NO ₃	53,87	19.12.2016
нитрат NO ₃	54,7	20.11.2016
нитрат NO ₃	23,76	15.10.2016
нитрат NO ₃	30,04	26.08.2016

Разброс значений концентрации текущего показателя в пробе воды из скважины незначительный. Следовательно, разбиение на группы, содержащие приблизительно однородные элементы с похожими признаками, не требуется.

Поэтому целесообразно вычислить среднеарифметическое значение:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

где x_i - значение концентрации нитрата N03 в пробе воды из скважины MW 1-1/1 20.09.2017 г., $\sum_{i=1}^n x_i$ - сумма значений концентрации нитрата за выбранный период, n – объем выборки (количество месяцев):

$$\bar{x} = \frac{24,5 + 89,8 + 21,72 + 24,12 + 23,6 + 43,76 + 53,87 + 54,7 + 23,76 + 30,04}{10} = 38,9$$

2. Интервальный метод. Данный метод позволяет вычислить границы интервала, в котором находится истинное значение оцениваемого параметра. Доверительный интервал определяется следующим образом:

$$\bar{x} - \Delta < x_i < \bar{x} + \Delta, \quad \Delta = t\mu, \quad \mu = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Где Δ - предельная ошибка выборки, μ – средняя ошибка выборки, t -коэффициент доверия, определяемый в зависимости от уровня вероятности p , σ - среднее квадратическое отклонение признака, вычисляемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Ниже в таблице 3.3 приведены некоторые значения t .

Таблица 3.3 – Таблица соответствия вероятностей и коэффициентов доверия

Вероятность, p	0,683	0,866	0,954	0,988	0,997	0,999
Значение t	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

Расчитаем доверительный интервал для значения концентрации нитрата N03 с вероятностью 95,4 % (0,954).

Среднее значение признака, вычисленное ранее, составило $\bar{x} = 38,9$, коэффициент доверия при заданной вероятности равен 2,0.

На первом шаге необходимо вычислить среднее квадратическое значение признака (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Расчет значения среднеквадратического отклонения признака

№	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$	№	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	24,5	$(24,5-38,9)^2=207,36$	7	53,87	$(53,87-38,9)^2=224,1$
2	89,8	$(89,8-38,9)^2=2590,81$	8	54,7	$(54,7-38,9)^2=249,64$
3	21,72	$(21,72-38,9)^2=295,15$	9	23,76	$(23,76-38,9)^2=229,21$
4	24,12	$(24,12-38,9)^2=218,45$	10	30,04	$(30,04-38,9)^2=78,49$
5	23,6	$(23,6-38,9)^2=234,09$		Σ	4350,94
6	43,76	$(43,76-38,9)^2=23,62$			

$$\sigma = \sqrt{\frac{4350,94}{10}} = 20,86$$

Теперь нужно вычислить значения средней ошибки выборки, затем вычислить предельную ошибку и интервал доверия для значения концентрации нитрата N03

$$\mu = \frac{20,86}{\sqrt{10}} = 6,59 \quad \Delta = 2 \cdot 6,59 = 13,18$$

$$38,9 - 13,18 < x_i < 38,9 + 13,18$$

$$25,72 < x_i < 52,08$$

Таким образом, значения концентрации нитрата N03 в пробе воды из скважины MW 1-1/1 20.09.2017 г находится в интервале от 25,72 до 52,08 мг/л.

Значения, не попавшие в этот интервал, отмечаются как потенциальные ошибки, их заменяют уже подобранными значениями (например, средней арифметической величиной).

Для автоматизации процесса очистки данных существует комплекс методов, реализующих процесс переноса исходных данных из различных источников в аналитическое приложение или поддерживающих его хранилище данных - ETL (от англ. *Extract, Transform, Load* - дословно «извлечение, преобразование, загрузка»). ETL-средства включают в себя три основных процесса:

- извлечение данных из внешних источников;
- преобразование данных и их очистка;
- загрузка в хранилище данных.

Независимо от особенностей построения и функционирования ETL-система должна обеспечивать выполнение трех основных этапов процесса переноса данных (ETL-процесса) [89]. Перемещение данных в процессе ETL можно разбить на последовательность процедур, представленных следующей функциональной схемой.

В настоящее время ETL-системы все более широко применяются именно для консолидации данных с целью их дальнейшего анализа.

OLAP - анализ данных. Построение систем анализа данных является важным направлением развития информационных технологий. В последнее время в связи с ростом числа накопленных данных в организациях и необходимостью принятия обоснованных управленческих решений интерес к этому направлению растёт. С помощью систем анализа данных могут быть решены следующие задачи: сбор всех необходимых для анализа данных в одном месте с согласованием форматов и удалением ошибок, интерактивный просмотр этих данных аналитиком, автоматическое извлечение закономерностей из данных. Всё это позволяет иметь полную информацию об организации и эффективно принимать управляющие решения. В настоящее время принято различать четыре основных вида аналитической деятельности: стандартная отчетность, нерегламентированные запросы, многомерный анализ (OLAP) и извлечение знаний (data mining).

На данное время этот инструментарий OLAP –анализ является наиболее эффективным и популярным. OLAP –анализ позволяет получать доступ к статистическим и организованным данным из источников данных. Технологии OLAP позволяют на основе оперативной базы данных комплекса производить построение многомерных хранилищ данных с целью их экспресс-обработки для принятия управленческих решений [90].

Для анализа информации и формирования отчетности наиболее удобным способом представления является многомерная модель или гиперкуб, ребрами которого являются измерения. Это позволяет анализировать данные сразу по нескольким измерениям, т.е. выполнять многомерный анализ средствами OLAP-систем. OLAP-технология оперативной аналитической обработки данных, использует методы и средства для сбора, хранения и анализа многомерных данных в целях поддержки процессов принятия решений [91].

Оперативный анализ осуществляется при помощи инструментов OLAP – анализа. Для обеспечения работы аналитических приложений исторические и агрегированные данные консолидируются в ИБД и могут быть выгружены в многомерные базы данных, с которыми взаимодействуют OLAP-приложения.

Для описания многомерного пространства используются следующие термины:

- измерение (dimension), описывающее элемент данных для анализа;
- элемент (member): соответствует одной точке на измерении;
- значение элемента (member value): уникальная характеристика элемента;
- атрибут (attribute): полная коллекция элементов одного типа;
- размер (size) или кардинальность (cardinality) измерения: количество элементов, которое содержит измерение.

На рисунке 3.12 приведено пространство данных с тремя измерениями.

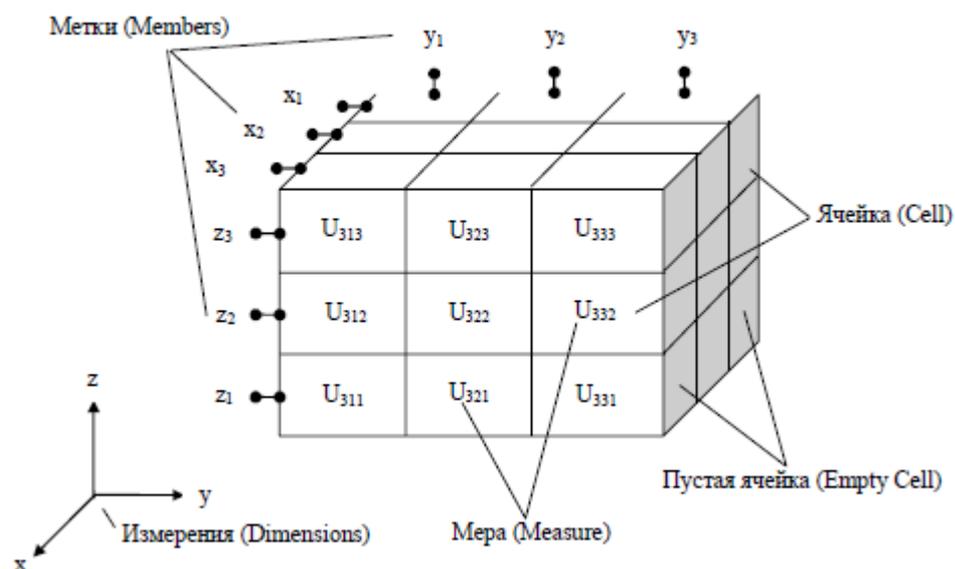


Рисунок 3.12 – Трехмерное пространство данных

Количество точек в пространстве данных образует теоретическое пространство данных. Размерность теоретического пространства математически определяется перемножением размеров всех измерений. Поскольку каждое измерение дискретно, то пространство является ограниченным (конечным). При описании многомерного пространства дополнительно используются следующие понятия:

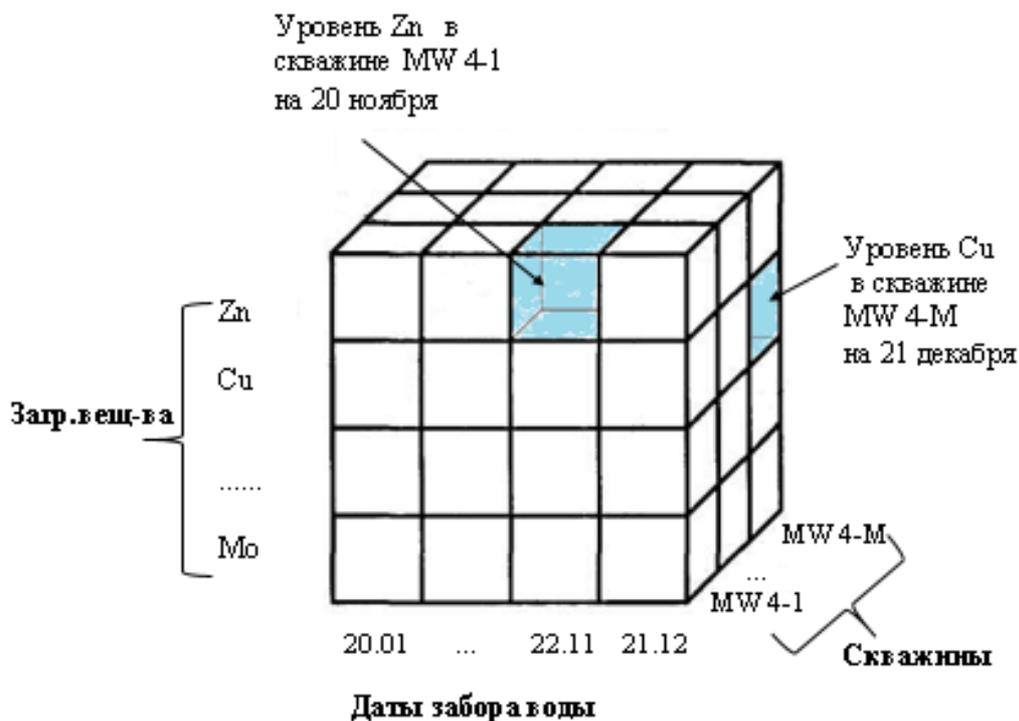
- кортеж (tuple), определяющий координату в многомерном модельном пространстве;
- срез (slice), определяющий секцию многомерного модельного пространства, которая определяется кортежем.

Таким образом, каждая точка пространства данных определяется набором координат, который называется кортежем. Например, любая точка пространства на рисунке 3.7 определяется кортежем (x_i, y_j, z_k) , $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,3}$, $k = \overline{1,2}$

Если зафиксировать элемент одного измерения, то получится срез в пространстве данных.

Метод многомерного моделирования базируется на следующих основных понятиях: факты, атрибуты, измерения, параметры (метрики), иерархия, гранулированность.

Например, при анализе данных процесса загрязнения подземных вод, такими измерениями обычно выступают время, показатели, объекты (рисунок 3.13).



MW 4-1

	20.01.2017	...	21.12.2017
Zn	0,949	...	0,762
Cu	0,012	...	0,043
...
Mo	0,002	...	0,005

Рисунок 3.13 – Куб данных о состоянии подземных вод

Измерения задаются перечислением своих элементов (members). Элемент измерения (dimensional member) — уникальное имя или идентификатор (лингвистическая переменная), используемая для определения позиции элемента.

Для обеспечения работы аналитических приложений исторические и агрегированные данные консолидируются в ИБД и могут быть выгружены в многомерные базы данных, с которыми взаимодействуют OLAP-приложения.

ИАС МПВ относится к классу многопользовательских сетевых программ, поддерживающих технологию «клиент-сервер». Все данные хранятся на SQL-сервере, работающем на выделенном сервере под управлением операционной системы Windows Server 2016. На рабочих местах может быть установлена операционная система Windows 2010.

При запуске программы на экране отображается главная форма программы (рисунок 3.14 а). Работа в среде доступна авторизованным

пользователям-специалистам в области гидрогеологии, охраны окружающей среды (рисунок 3.14 б).

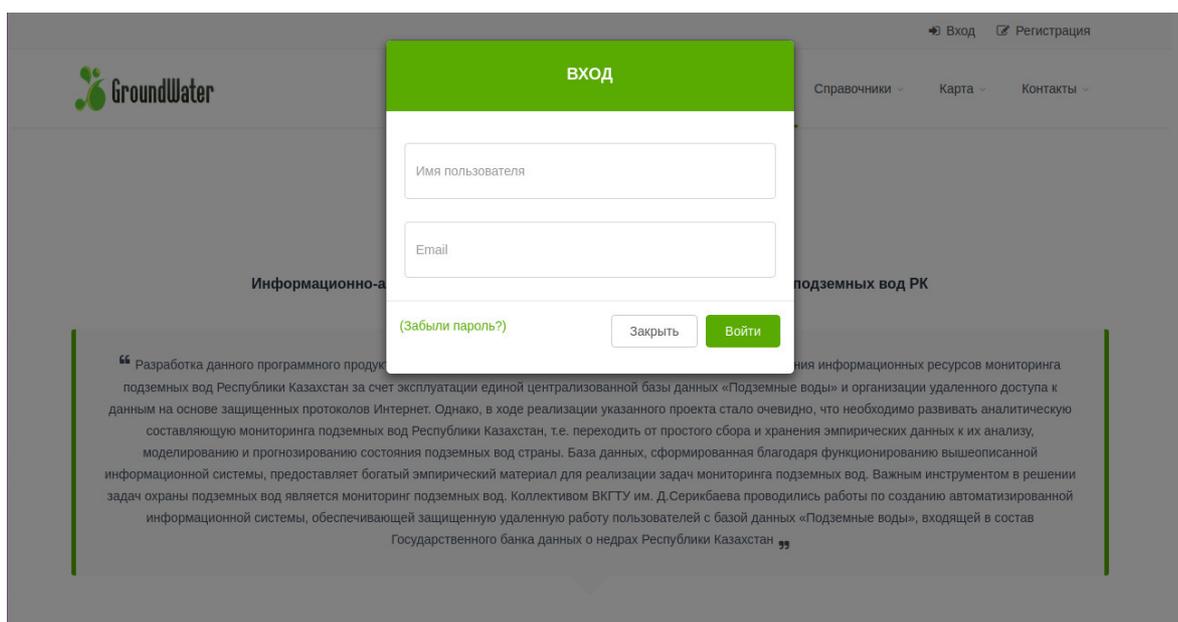
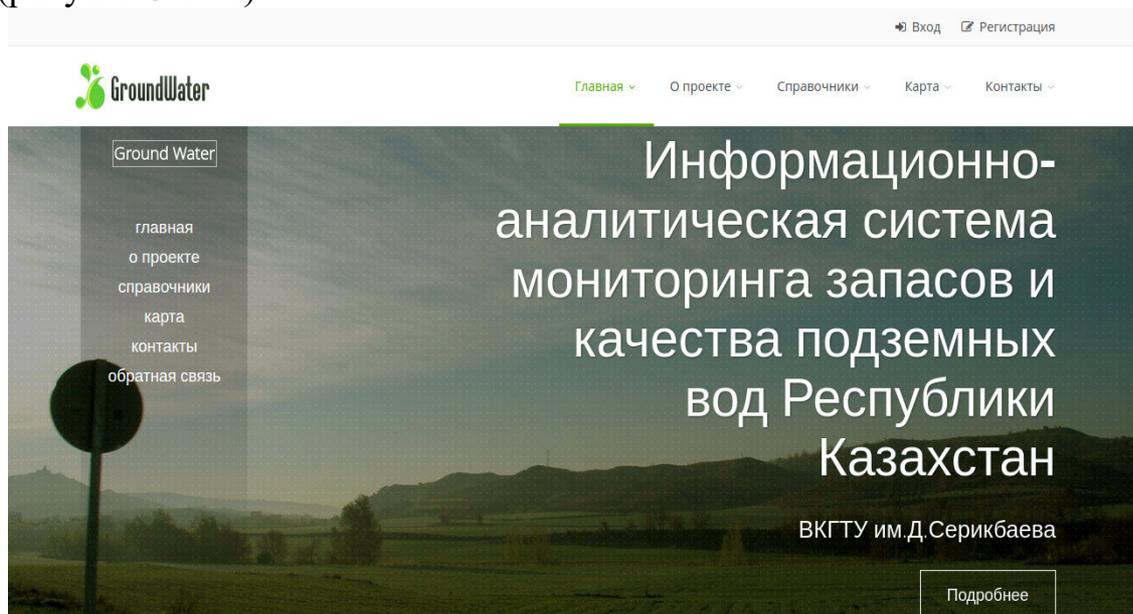


Рисунок 3.14, а) главная форма и б) окно аутентификации и авторизации пользователя

Для доступа к таблицам-справочникам, содержащим данные по объектам исследования, нормативным показателям, данным процедур регистрации и учета, используется опция меню СПРАВОЧНИКИ. В качестве примера ниже показаны справочники Значения ПДК, Скважины (рисунок 3.15).

Значения ПДК

Сохранить изменения

Загрязняющее вещество	Значение (min)	Значение (max)	Единица измерения	
Fe	0	0.3	Содержание железа (мг/куб дм)	-
Cu	0	1	Содержание меди (мг/куб дм)	-
SO	0	500	Содержание сульфатов (мг/куб дм)	-
Mn	0	0.1	Содержание марганца (мг/куб дм)	-
Zn	0	5	Содержание марганца (мг/куб дм)	-
Cl	0	350	Содержание хлоридов (мг/куб дм)	-

Скважины

Сохранить изменения

Наименование	Регион	Широта	Долгота	
Северо-Атамановский 14	Усть-Каменогорск, Северо-Атамановск	49.9867277174786	82.5607159020428	-
Октябрьский 7	Усть-Каменогорск, Октябрьский	50.0139689147448	82.5628202136535	-
Северо-Атамановский 10	Усть-Каменогорск, Северо-Атамановск	49.9868380896166	82.5573685051923	-
Нике-Согринский 1	Усть-Каменогорск, Нике-Согринский	50.0080414888652	82.5566254829622	-
Элеваторный 4	Усть-Каменогорск, Элеваторный	50.00024124647	82.5550422312699	-
Лесозаводской 4	Усть-Каменогорск, Лесозаводской	49.9876060136292	82.5664599071023	-
Лесозаводской 2	Усть-Каменогорск, Лесозаводской	49.9867506365922	82.5695784221169	-
Элеваторный 7	Усть-Каменогорск, Элеваторный	50.000986044155	82.5688764852168	-

Рисунок 3.15 – Справочники Значения ПДК, Скважины

Аналитический инструментарий доступен в меню ГЛАВНАЯ. Карты различного характера (топографические, геологические и др., расположения точек наблюдения) доступны в меню КАРТЫ (рисунок 3.16).

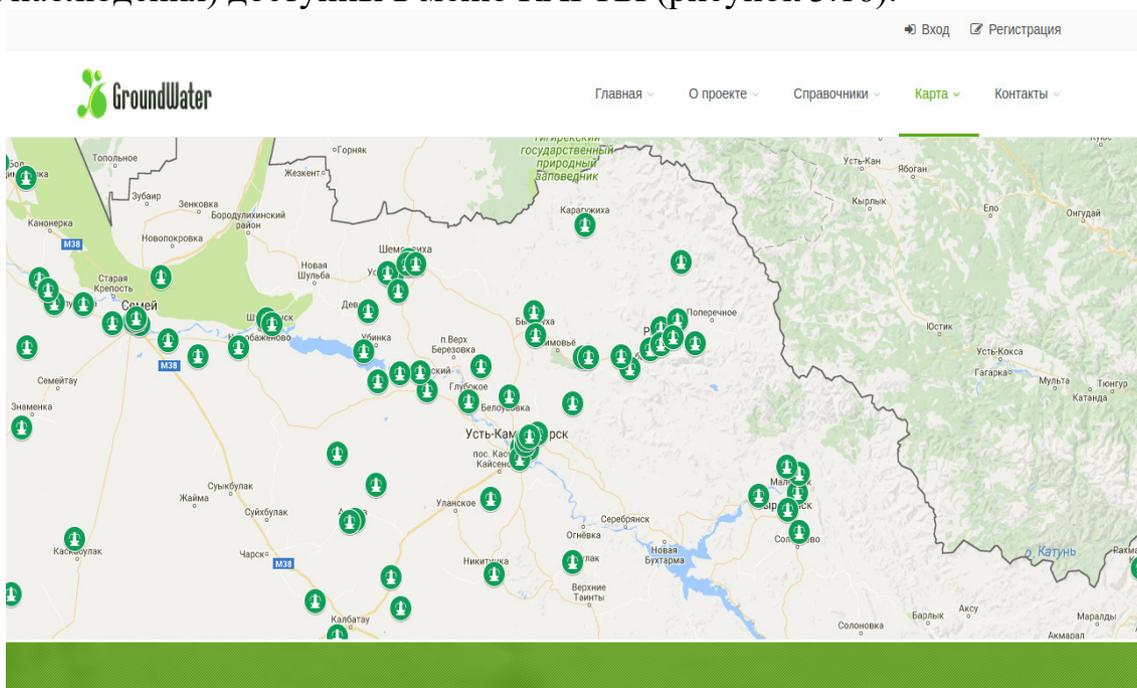


Рисунок 3.16 – Карта расположения точек наблюдения на территории Восточно-Казахстанской области

Система позволяет отобразить визуализацию данных об уровне концентрации ЗВ в подземных водах (3.17).

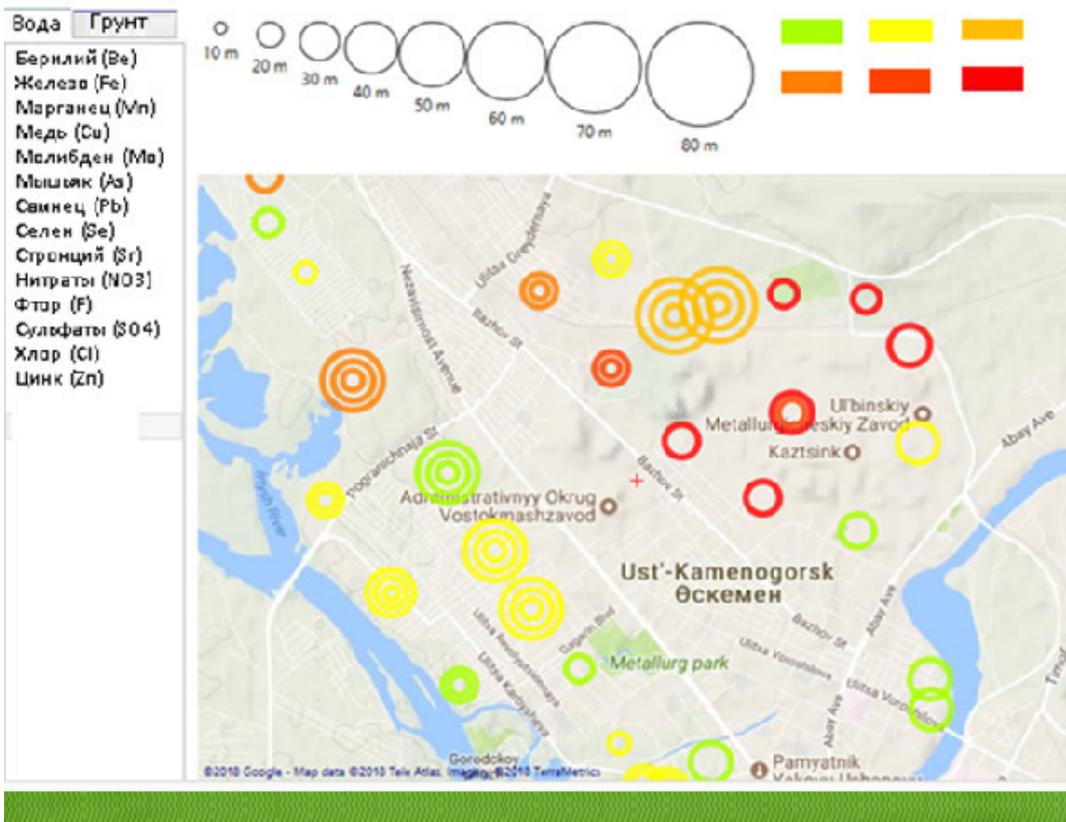


Рисунок 3.17 – Визуализация концентрации загрязнения

В качестве примера рассмотрим тестирование системы на примере решения задач построения контура области загрязнения и моделирования радиоактивного загрязнения.

На следующем рисунке проиллюстрирована визуализация результата решения задачи по определению области загрязнения (рисунок 3.18).

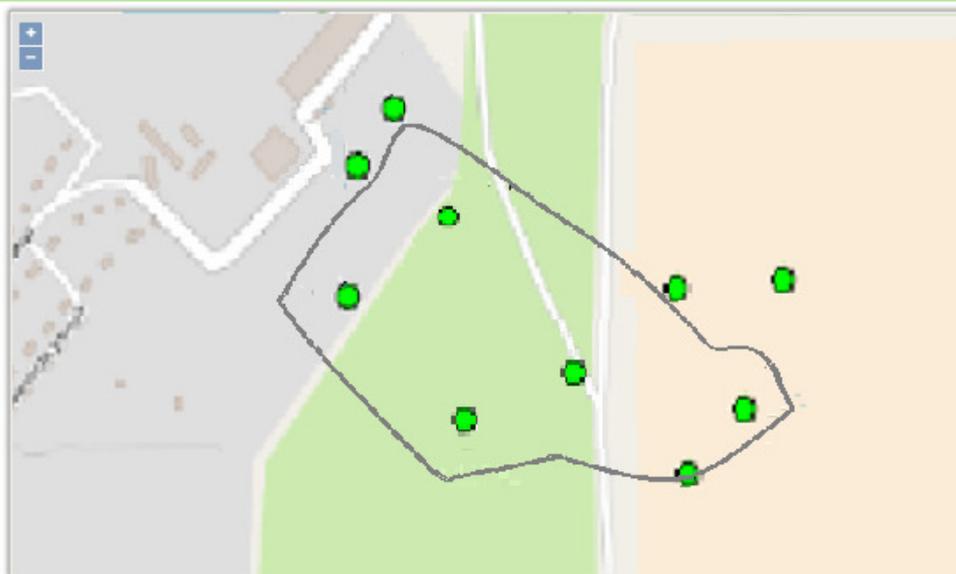


Рисунок 3.18 – Результат определения области загрязнения

На рисунке 3.19 представлен результат процесса моделирования распространения радиоактивного загрязнения с промплощадки УМЗ, наложенного на карту города Усть-Каменогорска.

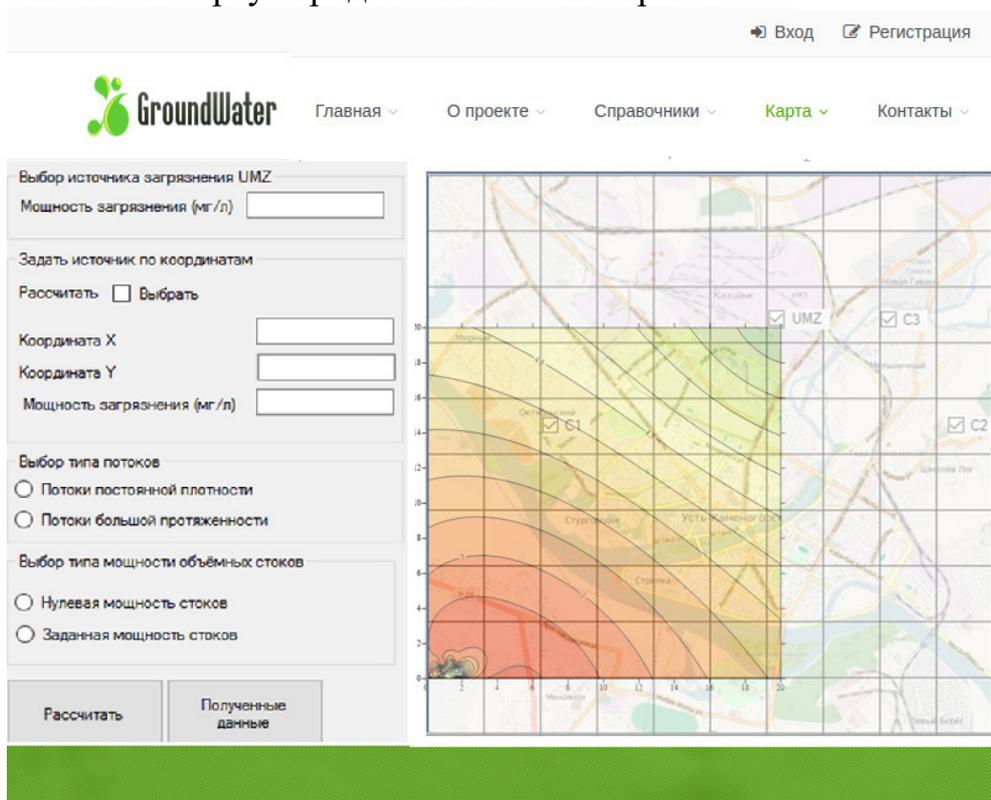


Рисунок 3.19– Визуализация загрязнения ураном из точечного источника

Также были рассмотрен вариант моделирования загрязнения скважин, при попадании в систему подземных вод радиоактивного вещества в виде урана. Был выполнен расчет для трех водозаборов в городе Усть-Каменогорске.

Данные для визуализации представляют собой три столбца со значениями концентрации по X, по Y и по времени Z. Шаг по времени равен суткам.

Тестирование программных модулей моделирующих алгоритмов было осуществлено на примере трех скважин, входящих в состав одного из водозаборов: Северо-Атамановский, Пионерский. Также представлено наложение этих загрязнений на карту города Усть-Каменогорска.

Результат реализации процесса моделирования загрязнения подземных вод радиоактивным веществом отображен на рисунках 3.20

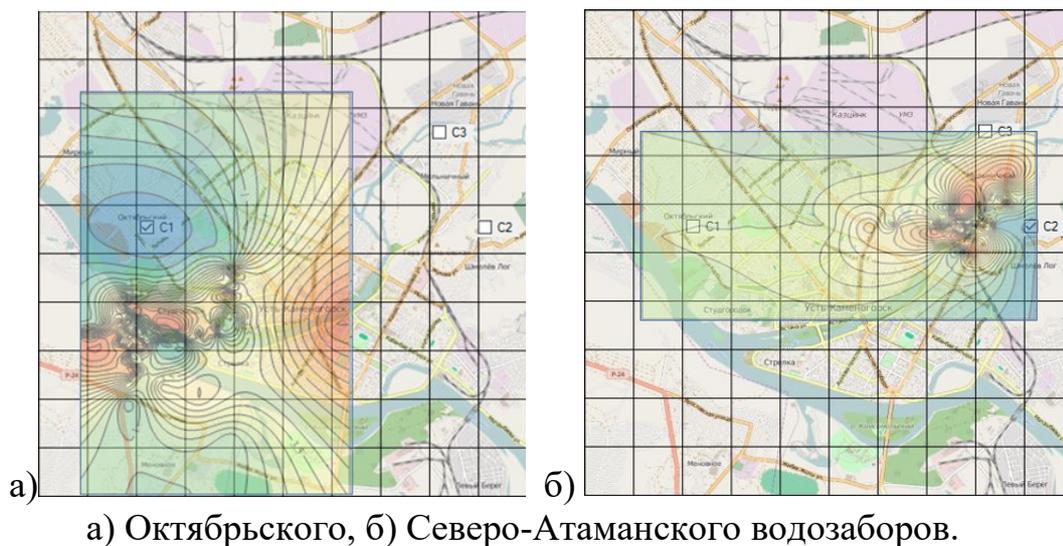


Рисунок 3.20 – Визуализация загрязнения подземных вод радиоактивным веществом на примере данных со скважины г. Усть-Каменогорска

Выводы по разделу

Информационно-аналитическая система мониторинга состояния загрязнения подземных вод обеспечивает субъектов экологического мониторинга актуальной, достоверной и объективной информацией, а также выполняет анализ состояния загрязнения ПВ (степень, масштаб, интенсивность загрязнения), оценку устойчивости системы ПВ, прогноз загрязнения ПВ и локализацию источника загрязнения ПВ. Данная система позволяет получить данные о состоянии загрязнения ПВ, оценить степень загрязненности ПВ, получить прогноз загрязнения, а также визуализировать результаты с использованием современных геоинформационных технологий.

В состав функционального обеспечения системы входят:

– подсистема интеграции данных, позволяющая осуществить извлечение данных по объектам наблюдения, по источникам загрязняющих веществ,

картографическую информацию и др. данные из различных источников, преобразование этих данных и загрузку в хранилище данных;

- подсистема расчета параметров, необходимых для реализации функциональных возможностей ИАС МПВ;

- подсистема аналитического инструментария, применяемого к режимным данным по подземным водам, полученным в виде результатов анализа проб подземных вод из скважин и водозаборов с целью на содержание загрязняющих веществ;

- подсистема вывода, включающая генерацию стандартной отчетности, входящей в периодическую документацию процесса мониторинга, отдельных отчетов по индивидуальным запросам пользователей, визуализации результатов оценки и прогнозирования.

Работоспособность информационно-аналитической системы была проверена на данных о состоянии подземных вод, расположенных на территории г. Усть-Каменогорска. Результаты оценки прогноза концентрации загрязняющих веществ, полученные в процессе опытной эксплуатации, согласуются с реальными данными измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная информационно-аналитическая система мониторинга состояния загрязнения подземных вод предназначена для повышения эффективности системы мониторинга подземных вод и направлена на решение одной из актуальных экологических проблем современности.

В ходе работ по разработке ИАС МПВ, осуществлено предпроектное обследование и анализ состояния проблемы загрязнения подземных вод. Выполнен обзор предшествующих исследований, посвященных решению экологических проблем в гидрологии. На основе обследования сформированы основные этапы оценки запасов и качества, прогнозирования состояния подземных вод. Выработана концепция информационно-аналитической системы экологического мониторинга подземных вод.

Осуществлен анализ и выбор математических моделей для выполнения мониторинга качества подземных вод.

Выполнена адаптация этих моделей к условиям г. Усть-Каменогорска, процесс проведения адаптации позволил определить ключевые параметры, отвечающие за отдельный регион, что позволит при разработке информационно-аналитической системы вынести функции ввода характеристик регионов в отдельную подсистему.

Спроектирована и разработана информационно-аналитическая система мониторинга подземных вод. Программный продукт, имеет клиент-серверную архитектуру с централизованным доступом к данным, расположенным на сервере. ИАС МПВ предоставляет возможность поддерживать данные в справочниках в актуальном состоянии, осуществлять оперативный и комплексный анализ состояния подземных вод в регионах РК, формировать стандартную отчетность по результатам анализа данных наблюдений, визуализацию результатов моделирования процесса загрязнения подземных вод различными загрязняющими веществами.

Научная новизна исследования заключается в разработке информационно-аналитической системы, основанной на современных методах моделирования процессов загрязнения подземных вод и информационных технологиях и позволяющей осуществлять мониторинг состояния загрязнения подземных вод.

Применяемые в работе методы, построенные на совместном использовании методики расчета индексов качества и моделей динамики геофильтрации и загрязнения подземных вод, алгоритмы их реализации, основанные на эффективных численных алгоритмах соответствуют современному уровню вычислительных технологий по качеству и эффективности реализации, что подтверждено публикациями в области исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 «Послание Президента Республики Казахстан – Лидера нации народу Казахстана «Стратегия «Казахстан-2050»: новый политический курс состоявшегося государства».
- 2 Осипова М.А. Водные ресурсы Восточно - Казахстанской области и их экологическое состояние // Актуальные проблемы современной науки. - г. Горно-Алтайск: ГАГУ. -2012. - том 1, №3.
- 3 Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2008. –С. 463 с.
- 4 Бочеввер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1979. – С. 254.
- 5 Javandel I., Doughty C., Tsang C.-F. Groundwater Transport: Handbook of Mathematical Models (Water Resources Monograph). Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1984.- P. 218.
- 6 Горшков М.В. Экологический мониторинг. Учеб. Пособие // Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010.- С. 313 р.
- 7 Dzjuba S.M. et al. The application of Information technologies for ecological monitoring of megalopolis air pollution // Gerald of the National Technical University “KhPi”. Subject issue: Information Science and Modelling.-Kharkov: NTU “KhPi”.- 2010. -№ 21.- P. 58–65.
- 8 Кочетков М.В., Черемисина Е.Н., Любимова А.В. Моделирование состояния природных экосистем для экологического мониторинга территорий // Геоинформатика.- 2001.- № 3. - С. 89–93.
- 9 Гольдберг В.М. Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод. М.: Недра, 1976. – С. 153.
- 10 Vrba J., Zaporozec A. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability // International Contributions to Hydrogeology, International Association of Hydrogeology. Heise, Hanover, 1994.- Vol. 16.- P. 131.
- 11 Белоусова А.П. Качество подземных вод: современные подходы. М.: Научный мир, 2001. - С. 339.
- 12 Зекцер И.С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М.: Научный мир, 2001.- С. 313.
- 13 Тихомиров В.В. Содержание терминов уязвимость, защищенность и чувствительность подземных вод // Вестник СПбУ. Сер.7. Геология, География. 2000. - № 1. - С. 92–96.
- 14 Потапов А.А. Общая защищенность водоносных горизонтов от загрязнения. Диссертация на соискание степени к.г.-м.н. СПб., 1996.
- 15 Госк Э.М. Исследование экологической безопасности подземных вод с позиции принципов динамической уязвимости (на примере Центральной части МАБ)» Диссертация на соискание степени к.г.-м.н. п.Зеленый, 2001.
- 16 Bekesi G., McConchie J. Groundwater protection through vulnerability assessment // Cotbus, ICHE 98. - 2002. - P. 155.

17 Foster S. Fundamental conception aquifer vulnerability, pollution risk and ground water protection // TNO Committee of Hydrogeological Research, The Hange, Proceeding and Information. 1987.- № 38. - P. 69–86.

18 Гранкин Ю.Я., Боровиков Е. Потенциальные источники загрязнения подземных вод и их характеристики // Бюллетень Казахского научно-исследовательского института водного хозяйства РК.- 2012.- С. 52–61.

19 Карибаева М.К. Обоснование выбора способа очистки подземных вод г. Усть-Каменогорска и прилегающих территорий // Мир науки, культуры, образования. - Барнаул, АлтГПУ. - 2012. - Vol. 3, № 34. - С. 57–64.

20 Панин М.С., Торопов А., Каримов А.В. Экологическая оценка питьевых вод г. Семей // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Управление водными ресурсами в контексте устойчивого развития Республики Казахстан». Усть-Каменогорск, 2009. - С. 165–169.

21 Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Методика структурного моделирования процессов загрязнения подземных вод в Казахстане // Материалы Международного симпозиума «Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы». Санкт-Петербургский государственный университет, 2007. - С. 111–113.

22 Паничкин В.Ю. Математическая модель загрязнения подземных вод ртутью северной части Павлодарского промышленного района (Республика Казахстан) // Материалы Международного симпозиума (Россия, Москва, ГЕОХИ РАН, 7-9 сентября 2010 г.), Сборник «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты, М.:ГЕОХИ РАН, 2010.- С. 440–445.

23 Паничкин В.Ю., Мирошниченко О.Л. Теоретические концепции создания автоматизированной информационной системы “Подземные воды Казахстана” // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук, 2013. - № 2.- P. 98–101.

24 Schreiber R.P. The National Ground Water Monitoring Network Data Portal: From Pilot to Production // NGWA Summit. The National and International Conference on Groundwater, NGWA. - 2013. P. 212–219.

25 Van Dijk A., Renzullo L.J. Water resource monitoring systems and the role of satellite observations // Hydrology and Earth System Sciences. - 2011. - Vol. 15, № 1. - P. 39–55.

26 Feng W. et al. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements // Water Resources Research. - 2013. - Vol. 49, № 4. - P. 2110–2118.

27 Auken E. et al. Large Scale Mapping Of Groundwater Resources In India With Results From Test Sites In Different Geological Terrain // 13th SAGA Biennial Conference & Exhibition. - 2013. - P. 415–421.

28 Turganbayev Y.M., Nugumanova A.B. Design of the remote access to the «Ground Water of the Republic of Kazakhstan» Database // Proceedings of the International Scientific Practical Conference “Green Economy - the Future of Humanity”, May 24-25, 2014. Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan: East Kazakhstan State Technical University, 2014. - P. 1665–1677.

29 Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер // http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/watercourses_lakes.shtml

30 Закон Республики Казахстан от 23 октября 2000 г. № 94-III О присоединении Республики Казахстан к Конвенции об охране и использовании трансграничных водотоков и международных озер // https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=1019116

31 Оттенс Я.Я., Арнольд Г.Е. и др. Руководящие принципы по мониторингу и оценке трансграничных подземных вод // Лелистад. - 2010 г.

32 Интегрированное управление водными ресурсами . Лекционный курс. Центр СУР, 2015 // <http://docplayer.ru/29433919-Тема-7-monitoring-vodnyh-resursov.html>

33 Сергейко Ю.А. и др. Мониторинг природных и сточных вод реки Иртыш: Отчет о НИР. - Усть-Каменогорск, 2001.

34 Санитарные правила и нормы СанПиН РК 3.01.067.97. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.

35 Линева Л.А. Физико-географические условия / Л.А. Линева, С.В. Андропова // Экология Восточного Казахстана. Проблемы и решения: Сб. науч. работ. - Усть-Каменогорск: ВКГУ. - 1999.

36 Гольдберг В.М., Гавда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984, - 262 с.

37 Мелькановицкая С.Г., Горячева Н.В. Определение нефтепродуктов в подземных водах методом газовой хроматографии. Экспресс-информация. ВИЭМС. Гидрогеол. и инж. геология, 1977, № 2, с. 1-11

38 Мелькановицкая С.Г., Козлова Д.Н. Газохроматографический анализ нефтепродуктов в подземных водах. Гидрохимические материалы, 1962, т. 81, с. 60-91.

39 Узников А.А., Куликовская Е.А., Соколов И.Ю. Методы химического анализа природных вод. М.: Недра, 1970, - 480 с.

40 Мироненко В.А., Румынии В.Г. Опыт-миграционные работы в водоносных пластах. М.: Недра, 1966. - 240 с.

41 Методические указания по производству наблюдений за режимом температуры подземных вод. М.: ВСЕГИНГЕО), 1962, - 44 с.

42 Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение. - Томск: Изд-ю Томского университета, 2002. - 128 с.

43 Костюк Ю.Л., Фукс А. Л. Визуально гладкая аппроксимация однозначной поверхности, заданной нерегулярным набором точек // Труды Международной научно-практической конференции. Информатика. — Томск: Изд-ю Томского университета, 2000. С. 41-45

44 Чалов П.И., Васильев И.А., Комоско В.В., Кондаков И.А., Пестов И.И., Селезнев В.Н., Симоненко В.А., Соколов Л.В., Стародумов О.И., Чернов В.В., Шестаков А.А. Численное моделирование радиационной и иной опасности от

хвостохранилища Карабалтинского гидрометаллургического завода по переработке ураносодержащих руд. - М.:ИКЦ «Академкнига». -2009.- С. 115.

45 Соколов Л.В., Симонова К.И., Шестаков А.А., Широковская О.С. Методические исследования для одномерных численных расчетов распространения загрязнения в пористой среде // Препринт №92, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск.- 1996.

46 Голубкина О.В., Соколов Л.В., Филимонцев Г.А., Шестаков А.А. Численное сравнение методики МИФ и методики МТ3D при решении трехмерного уравнения миграции // Препринт №118, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск. - 1997.

47 Zheng C., Papadopoulos S.S. A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reaction of Contaminants in Groundwater Systems, Inc. Rockville, Maryland. - 1990.

48 Zh.Beldeubayeva S.Rakhmetullina, E.Turganbayev, V. Krivykh Information system of groundwater monitoring // Материалы 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2015. -Bulgaria. -2015. - V.1. - P. 139-146.

49 Кривых В.С., Рахметуллина С.Ж., Компьютерное моделирование загрязнения подземных вод, II Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана». -Усть-Каменогорск, Казахстан. -2016. - С. 118-120.

50 Zh.Beldeubayeva S.Rakhmetullina, E.Turganbayev, V. Krivykh Information system of efficient data management of groundwater monitoring the Republic of Kazakhstan // Материалы 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies AICT 2015 Russia (Scopus), Октябрь, Ростов-на-Дону, Россия. -2015. – P. 195-201.

51 Atmadja, J., Bagtzoglou, A.C.. State of the Art Report on Mathematical Methods for Groundwater Pollution Source Identification. Environmental Forensics, 2001 - N. 2, - P. 205- 214.

52 R.K. Bhattacharjya, Solving Groundwater Flow Inverse Problem Using Spreadsheet Solver. J. Hydrol. Eng., 2011.- V. 16, N. 5.- P. 472-477.

53 Криксин Ю.А., Плющев С.Н., Самарская Е.А., Тишкин В.Ф., Обратная задача восстановления источника для уравнения конвективной диффузии. Матем. моделирование, 1995.- V. 7, N. 11.- P. 95–108.

54 Kuiper L.K., A Comparison of Several Methods for the Solution of the Inverse Problem in Two-Dimensional Steady State Groundwater Flow Modeling. Water Resources Research, 1986. - V. 22, N. 5.- P. 705-714.

55 McLaughlin D.B., Investigation of alternative procedures for estimating ground-water basin parameters, Water Resour. Eng. Office of Water Research and Technology, U.S. Dept. Int., Walnut Creek, California.- 1975.

56 McLaughlin D.B., Townley L.R., A reassessment of the groundwater inverse problem. Water resources research, 1996.- V. 32, N. 5.- P. 1131–1161.

57 Nguen V.T., Nguen H.T., Tran T.B., Vo A.K., On an inverse problem in the parabolic equation arising from groundwater pollution problem. *Boundary Value Problems*. - 2015.- V. 67.- P. 1-23.

58 Sun N.-Zh., *Inverse Problems in Groundwater Modeling Series: Theory and Applications of Transport in Porous Media*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994.- Vol. 6. - P. 67.

59 Sun N.-Zh., Yeh W.W.-G., *Coupled Inverse Problems in Groundwater Modeling 1. Sensitivity Analysis and Parameter Identification*. *Water Resources Research*, 1990.- V. 26, N. 10.- P. 2507-2525.

60 Woodbury A.D., A full-Bayesian approach to the groundwater inverse problem for steady state flow. *Water resources research*, 2000.- V. 36, N. 8.- P. 2081–2093.

61 Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В., Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена. М.: Наука, 1996.

62 Bateman H., Erdelyi A., *Tables of Integral Transforms*. Vol. 1, McGraw-Hill Book Co., New York, 1954.

63 Манжиров А.В., Полянин А.В., *Справочник по интегральным уравнениям: методы решения*.- М.: Факториал пресс, 2000.

64 Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., *Методы решения некорректных задач* // Москва, Наука, 1979.

65 Титчмарш Е.К., *Теория функций*. - М. Гостехиздат, 1951.

66 Бухгейм А.Л., *Уравнения Вольтерра и обратные задачи*. - Новосибирск, Наука.- 1983.

67 Дудкин В.А., Акимова Ю.С., Исследование методов сглаживания сейсмического сигнала // *Труды Международного симпозиума .Надежность и качество*. -2005.- № 1. - С. 367-370.

68 *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 1992.

69 Лаврентьев М.М., Романов В.Г., Шишатский С.П., *Некорректные задачи математической физики и анализа*. – М.:Наука. - 1980.

70 Васильев Ф.П., *Численные методы решения экстремальных задач*. – М.:Наука. -1988.

71 Karchevsky A.L., Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*. – 2009. - V. 17, N. 4. - P. 385-402.

72 Nazarova, L.A., Nazarov, L.A., Karchevsky, A.L., Vandamme, M., Estimating diffusioncapacity parameters of a coal bed using the gas pressure measured in a hole and the solution of an inverse problem. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. – 2014. - V. 8, N. 2.- P. 267-273.

73 Duchkov A.A., Karchevsky A.L., Determination of Terrestrial Heat Flow from Temperature Measurements in Bottom Sediments. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. -2013. -V.7, N.4. -P. 480-502.

74 Бельдеубаева Ж.Т., Рахметуллина С.Ж., Турганбаев Е.М., Концепция разработки информационно-аналитической системы экологического мониторинга подземных вод. Вестник ВКГТУ им.Д.Серикбаева. - Усть-Каменогорск, 2014. - № 3. - С. 145-149.

75 Алексеева Т. В., Лужецкий М. Г., Курганова Е. В. Информационно-аналитические системы // Московская финансово-промышленная академия, 2015. - С. 175.

76 СТ РК ИСО/МЭК 15288-2011 «Системотехника. Процессы жизненного цикла системы»

77 СТ РК 34.019 - 2005 (ISO/IEC 12207:1995, MOD) «Информационная технология. Процессы жизненного цикла программных средств»

78 Асратян Р. Э. Распределённые аналитические системы на основе средств информационного взаимодействия в гетерогенной глобально-сетевой среде. - М.: ЛЕНАНД, 2010. - С. 120.

78 Устенко А.С. Основы математического моделирования и алгоритмизации процессов функционирования сложных систем. Москва: БИНОМ, 2000. 96 р.

79 Митракова О.В. Формализация описания процесса мониторинга состояния сложных систем // Геоинформатика. 2011. № 2. Р. 102.

80 Аракчеев Д.Б., Любимова А.В., Митракова О.В. Информационно-аналитическое обеспечение мониторинга состояния и использования недр // Тезисы докладов 5-ой Международной конференции «Геоинформационные системы в науках о Земле. Использование достижений фундаментальной науки в практической деятельности». Дубна, 2008. Р. 256.

81 Кулешов А.П. Информационная модель как основа проектирования корпоративных информационных систем // Приложение к журналу «Информационные технологии». -2006. - №3. - С. 26-30.

82 Гилуа М.М. Множественная модель данных в информационных системах. - М.: Наука, 1992. -255 с.

83 Вендров А.М., Практикум по проектированию программного обеспечения экономических информационных систем: учеб. пособие. - М.: Финансы и статистика, 2002. -134 с.

84 Орлов С. А. Технологии разработки программного обеспечения. 2-е издание. - Спб.: Питер, 2003. -513 с.

85 Гарсиа-Молина Г., Ульман Дж., Ундом Дж. Системы баз данных. Полный курс. - М.: Вильямс, 2003. - 10SS с.

86 Мамаев Е В. Microsoft SQL Server 2000. - СПб.: БХВ-Петербург. 2004. -1280 с.

87 Боуман Д. Эмерсон С, Дарновскн М. Практическое руководство по SQL. - Киев: Диалектика. 2003. -233 с.

88 Прошкина Е.П., Афонин А.Ю. Администрирование и анализ данных средствами SQL Server // Новые информационные технологии и системы: Труды VII Междунар. научно-технич. конф. - Пенза: ПГУ, 2006. - 4.1. -С .207-210.

89 Барсегян, А. А. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод, М. Д. Тесс, С. И. Елизаров. - 3-е изд., перераб. и доп. - СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – С.512.

90 Вахитов А.Р., Новосельцев В.Б. OLAP-технология как способ обработки данных 7 Современные техника и технологии СТТ 2007: Материалы XIП Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых. - Томск. 2007. - С. 342-344.

91 Барсегян А.А., Куприянов М.С. и др. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. - СПб.: БХВ-Петербург, 2004. -336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

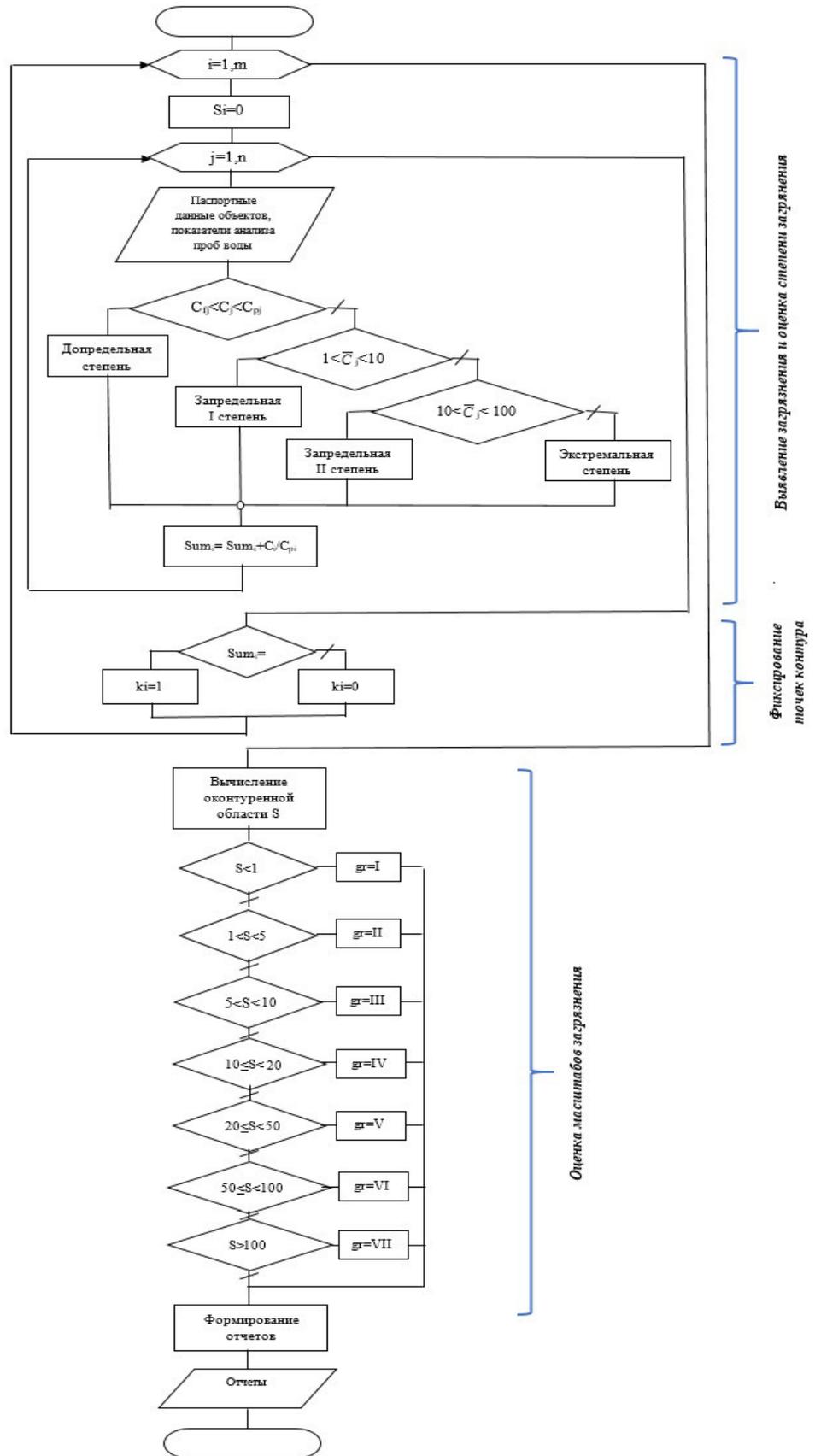


Рисунок 1 – Алгоритм метода выявления и оценки степени, масштабов загрязнения

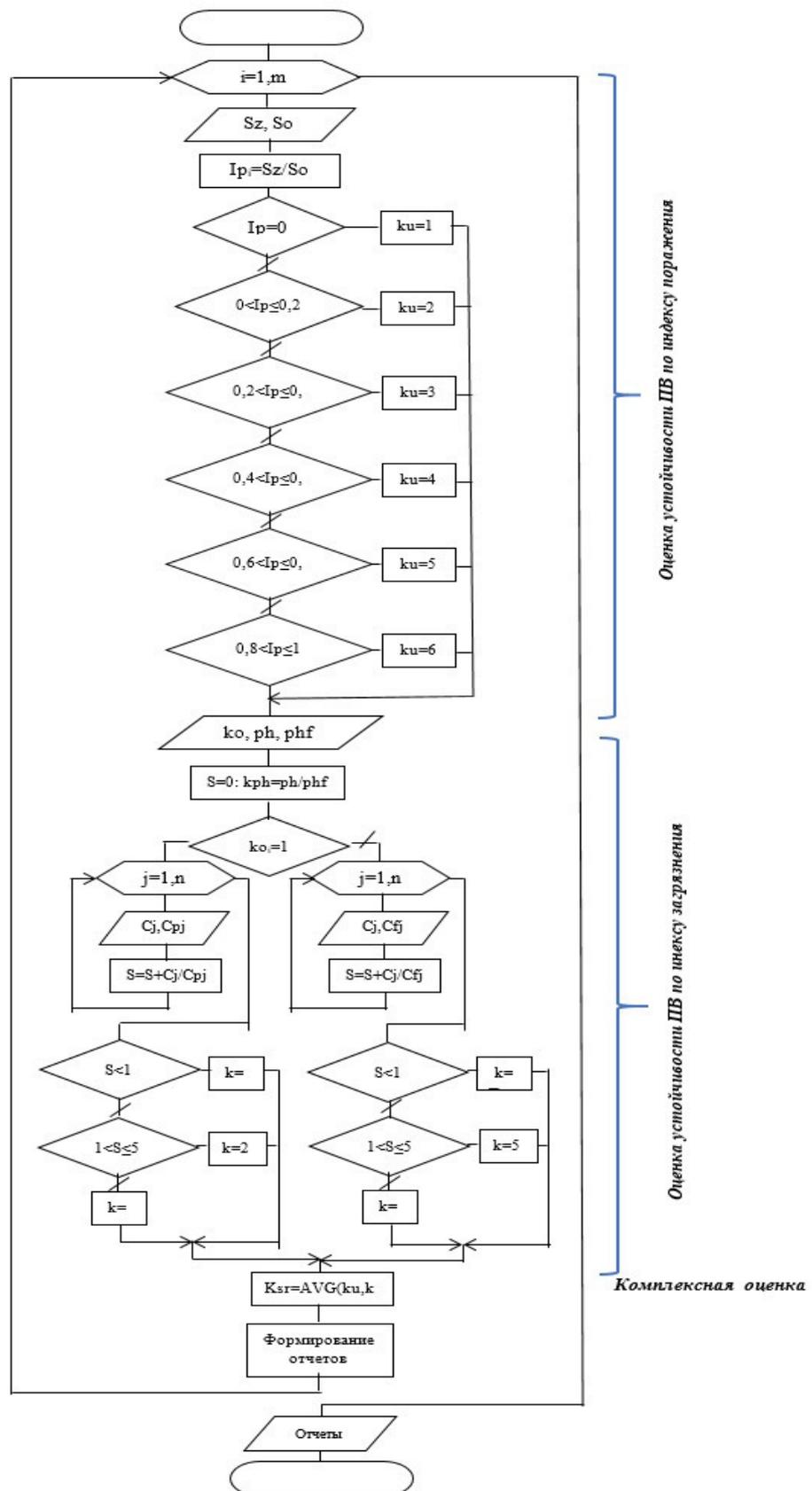


Рисунок 2 - Алгоритм комплексной оценки устойчивости ПВ к антропогенному воздействию

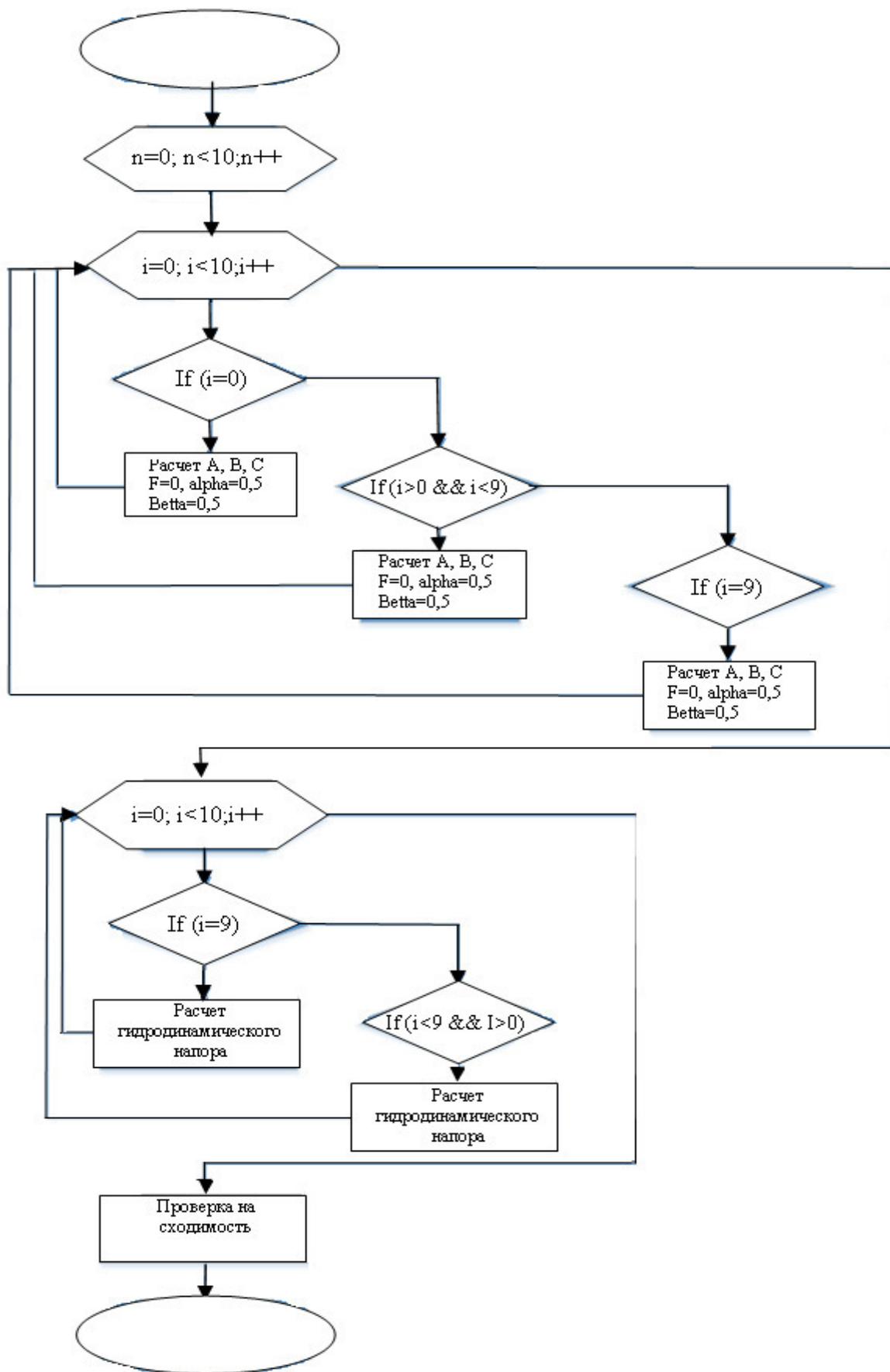


Рисунок 3 – Алгоритм расчета гидродинамического напора

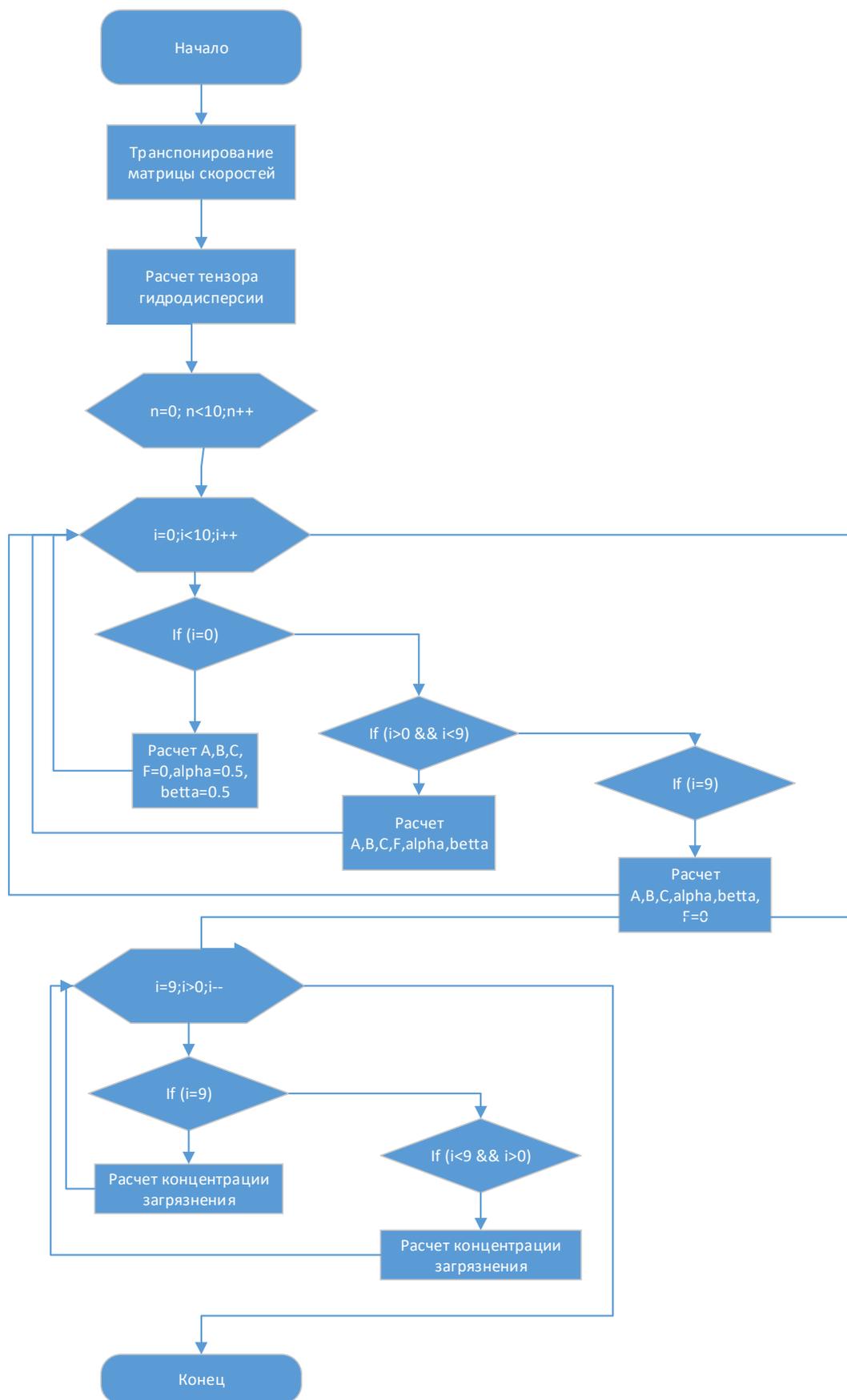


Рисунок 4 - Алгоритм расчета концентрации загрязнения



Рисунок 5 – Общий алгоритм модели

Приложение Б
Описание структуры БД

Таблицы-каталоги

Таблица GWD_catalogue (Каталог месторождений ПВ)

Название	Тип	Описание
Code_GWD (ПК)	Int	Код МПВ
GWD_name	varchar (200)	Название МПВ
godn	Int	Год начала наблюдений
dodk	Int	Год окончания наблюдений
Code_GWD_type BK (Voc_GWD_type.Code_MPV_type)	Int	Генетический тип МПВ
Adres	varchar (250)	Местоположение
Comment	Text	Комментарий
DataExp	datetime	Дата утверждения запасов
InstExp	varchar (50)	
NumProt	varchar (50)	Номер протокола
Code_district BK (Voc_region.Code_region)	varchar (50)	Код района
Code_parent	Int	Код предка
Code_inst BK (Voc_inst.Code_inst)	Int	Код инстанции утверждения запасов
Code_use_type BK (Voc_use_type.Code_use_type)	Int	Код назначения вод
Code_gr_issled BK (Voc_gr_issled.Code_gr_issled)	Int	Код группы по г/г исследованиям
Code_defend_condit BK (Voc_defend_condit.Code_defend_condit)	Int	Код группы по условиям защищенности
Code_osv_zapas BK (Voc_osv_zapas.Code_osv_zapas)	Int	Код группы по условиям освоения запасов
Code_water_type BK (Voc_water_type.Code_water_type)	Int	Код типа вод
Abs_otm_pov_ot	Int	Абсолютная отметка поверхности от
Sr_god_temp	Int	Среднегодовая температура, С
Atm_Osadki	Int	Атмосферные осадки, мм
Sr_god_isparen	Int	Среднегодовое испарение, мм

Название	Тип	Описание
Glub_merzl_ot	Int	Глубина залегания мерзлых пород от, м.
Glub_merzl_do	Int	Глубина залегания мерзлых пород до, м.
Abs_otm_pov_do	Int	Абсолютная отметка поверхности до
Code_relief ВК (Voc_relief.Code_relief)	Int	Код формы рельефа
Code_minwater_type	Int	Код типа минеральных вод
Srok_expl	Int	Срок эксплуатации, лет
Global_MPV_code	Uniqueidentifier	
Rowguid УИ (index_727725695)	Uniqueidentifier	
Updated	Bit	
Ex	Int	
date_repl1234	datetime	Время добавления записи
Kol_uch	Int	Количество участков
Osv_gwd	varchar (100)	Освоенность МПВ

Таблица OP_catalogue (Каталог пунктов наблюдения)

Название	Тип	Описание
Code_OP	Int	Код пункта наблюдений
Code_use_water_type	Int	Код типа ПН
Code_pn_purpose	Int	Код назначения ПН
Num_bur_org	varchar (20)	Номер буровой организации
Num_wateruser	varchar (20)	Номер водопользователя
Purpose_date	Datetime	
OP_name	varchar (200)	Название ПН
Code_district	varchar (50)	Код района
Code_town	varchar (50)	Код города
Datan	Datetime	Дата введения в эксплуатацию
Max_proizv	Float	Максимальная производительность
Commentary	varchar (200)	Комментарий
Code_cat_NS	Int	Код категории наблюдательной сети
Bur_start	Datetime	Начало бурения
Bur_finish	Datetime	Окончание бурения
Expl_date	Int	
Max_diam_bur	Int	Максимальный диаметр, мм.

Название	Тип	Описание
Comment	varchar (200)	Комментарий
Code_tech_bur	Int	Код технологии бурения
Code_spos_bur	Int	Код способа бурения
Adres	varchar (250)	Местоположение
RasstVdt	decimal (18,2)	Расст. до пост. водотока
Code_spos_coord_priv	Int	Код способа координатной привязки
Code_spos_vys_priv	Int	Код способа высотной привязки
AbsOtmUstie	decimal (18,2)	Абсолютная отметка устья
MinUr	decimal (18,2)	Минимальный уровень
DateMinUr	Datetime	Дата минимального уровня
MazUr	Float	Максимальный уровень
DateMaxUr	Datetime	Дата максимального уровня
MinDeb	Float	Минимальный дебит
DateMinDeb	Datetime	Дата минимального дебита
MaxDeb	Float	Максимальный дебит
DateMaxDeb	Datetime	Дата максимального дебита
DateZSO	Datetime	Дата утверждения
InstZSO	varchar (100)	Инстанция утверждения
SizeZSO	varchar (100)	Размеры
ConditionZSO	varchar (100)	Состояние
IinfSource	varchar (400)	Источник информации
GidrogName	varchar (100)	Фамилия ответственного гидрогеолога
BurOrg	varchar (150)	Организация, проводившая бурение
ZacOrg	varchar (150)	Организация-заказчик
Code_tech_condit	Int	Код тех. состояния
Code_san_condit	Int	Код санитарного состояния
Code_parent	Int	Код предка
Code_water_type	Int	Код типа вод
Global_PN_code	uniqueidentifier	
Updated	Bit	
Code_regim_type	Int	Код режима эксплуатации
date_repl1234	Datetime	Дата внесения записи
Code_relief	Int	
Stat_ur	decimal (18,2)	Статический уровень, м
S_dop	decimal (18,2)	Допустимое понижение, м
Razr_scale	Int	
Razr_step	Int	

Название	Тип	Описание
Razr_fontsize	Int	

Таблица WI_catalogue (Каталог водозаборов)

Название	Тип	Описание
Code_WI (ИК)	Int	Код ВЗ
Water_instake	varchar (150)	Название водозабора
Beg_god	Int	Год начала эксплуатации
Fin_god	Int	Год окончания эксплуатации
Code_parent	Int	Код предка
Code_district	varchar (50)	Код района
Code_town WI(Voc_town.Code_town)	varchar (50)	Код города
Code_WI_purpose BK (Voc_WI_purpose.Code_WI_purpose)	Int	Код целевого назначения ВЗ
Adres	varchar (200)	Местоположение
Comment	varchar (200)	Комментарий
Code_type_ZSO WI(Voc_ZSO.Code_type_ZSO)	Int	Код типа ЗСО
PollSource	varchar (200)	Источник загрязнения
Rasst_PollSource	decimal (18,2)	Расстояние до источника загрязнения, м
Code_use_type WI(Voc_use_type.Code_use_type)	Int	Код назначения использования
Code_water_type WI(Voc_water_type.Code_water_type)	Int	Код типа вод
Global_WI_code	uniqueidentifier	
Code_minwat_type	Int	Код типа минеральных вод
Updated	Int	
Ex	Int	
date_repl1234	Datetime	Дата внесения записи

Информационные таблицы
Таблица Chem_factor_info

Название	Тип	Описание
Code_quality_factor (ПК) БК (Voc_quality_factor.Code quality_factor)	Int	Код показателя качества
Code_measure_rang БК (Voc_measure_rang .Code_measure_rang)	Int	Код единицы измерения
Eqvival_weight	Float	Эквивалентный вес
Code_valent_type БК (Voc_valent_type. Code_valent_type)	Int	Код знака заряда
Comment	varchar (200)	Комментарий

Таблица CP_MPV

Название	Тип	Описание
Code_coll_promstok (ПК)	Int	Код пласта-коллектора
Code_MPV (ПК)	Int	Код МПВ

Таблица CP_PN

Название	Тип	Описание
Code_coll_promstok (ПК)	Int	Код пласта-коллектора
PN_number (ПК)	Int	Код пункта наблюдений

Таблица CP_VZ

Название	Тип	Описание
Code_coll_promstok (ПК)	Int	Код пласта-коллектора
Code_VZ (ПК)	Int	Код водозабора

Таблица CP_WG_feature

Название	Тип	Описание
Code_coll_promstok (ПК) БК (Coll_promstok_catalogu e.Code_coll_promstok)	Int	Код пласта-коллектора
Code_WG БК	int	Код водоносного горизонта

Название	Тип	Описание
(Voc_water_gorizont.Code_WG)		
Code_litology БК (Voc_litology.Code_litology)	Int	Код литологического состава
WG_text (ПК)	varchar (200)	Индексы пласта-коллектора
Litology_text (ПК)	varchar (250)	Литология
Code_water_type	Int	Код типа вод
Code_chem_sost	Int	Код химического состава
Step_zakr	varchar (50)	Степень закрытости, от
Priem_ot	varchar (100)	Приемистость, м/сут, от
Priem_do	decimal (18,3)	Приемистость, м/сут, до
Code_gd_situation	Int	Код гидродинамической обстановки
Num_vodoupor	Int	Количество водоупоров
Mosch_coll_ot	varchar (100)	Мощность водоупора над коллектором, м, от
Mosch_coll_do	varchar (100)	Мощность водоупора над коллектором, м, до
Mosch_ot	varchar (100)	Общая мощность водоупора, м, от
Mosch_do	varchar (100)	Общая мощность водоупора, м, до
Glub_palast_ot	varchar (100)	Глубина залегания кровли пласта, от
Glub_palast_do	varchar (100)	Глубина залегания кровли пласта, до
Mosch_plast_ot	varchar (100)	Мощность пласта, от
Mosch_plast_do	varchar (100)	Мощность пласта, до
Koeff_filtr_ot	varchar (100)	Коэфф. фильтрации, тыс. м ³ /сут, от
Koeff_filtr_do	varchar (100)	Коэфф. фильтрации, тыс. м ³ /сут, до
Vodoot_ot	varchar (100)	Водоотдача, от
Vodoot_do	varchar (100)	Водоотдача, до
Rayon_raspr	varchar (200)	Район распространения
Recommend	varchar (200)	Рекомендации к использованию
Omin_ot	decimal (18,3)	Минерализация, г/л, от
Omin_do	decimal (18,3)	Минерализация, г/л, до

Название	Тип	Описание
Water_type_text	varchar (200)	Тип используемых вод
God_work	Int	Год проведения работ
Godn	Int	Год начала работ
Squar	decimal (18,3)	Площадь
Step_zakr_do	varchar (100)	Степень закрытости, до
Code_min_sost BK (Voc_chem_sost.Code_chem_sost)	Int	Код минерального состава

Таблица CP_WG_feature_old

Название	Тип	Описание
Code_coll_promstok	Int	Код пласта-коллектора
Code_WG	Int	Код водоносного горизонта
Code_litology	Int	Код литологического состава
WG_text	varchar (200)	Индексы пласта-коллектора
Litology_text	varchar (250)	Литология
Code_water_type	Int	Код типа вод
Code_chem_sost	Int	Код химического состава
Step_zakr	varchar (50)	Степень закрытости, от
Priem_ot	decimal (18,3)	Приемистость, м/сут, от
Priem_do	decimal (18,3)	Приемистость, м/сут, до
Code_gd_situation	Int	Код гидродинамической обстановки
Num_vodoupor	Int	Количество водоупоров
Mosch_coll_ot	decimal (18,3)	Мощность водоупора над коллектором, м, от
Mosch_coll_do	decimal (18,3)	Мощность водоупора над коллектором, м, до
Mosch_ot	decimal (18,3)	Общая мощность водоупора, м, от
Mosch_do	decimal (18,3)	Общая мощность водоупора, м, до
Glub_palast_ot	decimal (18,3)	Глубина залегания кровли пласта, от
Glub_palast_do	decimal (18,3)	Глубина залегания кровли пласта, до
Mosch_plast_ot	decimal (18,3)	Мощность пласта, от
Mosch_plast_do	decimal (18,3)	Мощность пласта, до
Koeff_filtr_ot	decimal (18,3)	Коэфф. фильтрации, тыс.

Название	Тип	Описание
		м3/сут, от
Koeff_filtr_do	decimal (18,3)	Коэфф. фильтрации, тыс. м3/сут, до
Vodoot_ot	decimal (18,3)	Водоотдача, от
Vodoot_do	decimal (18,3)	Водоотдача, до
Omin_ot	decimal (18,3)	Минерализация, г/л, от
Omin_do	decimal (18,3)	Минерализация, г/л, до
Water_type_text	varchar (200)	Тип используемых вод
God_work	Int	Год проведения работ
Godn	Int	Год начала работ
Squar	decimal (18,3)	Площадь

Справочные таблицы

Таблица Voc_analysis_method

Название	Тип	Описание
Code_analysis_method (ПК)	Int	Код метода анализа
Analysis_method	varchar (150)	Метод анализа
Code_parent	Int	Код предка

Таблица Voc_building

Название	Тип	Описание
Code_building (ПК)	Int	Код сооружения
Building	varchar (100)	Сооружение
Code_parent	Int	Код предка

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Справка об участии в госбюджетной НИР

Қазақстан Республикасы
Білім және ғылым министрлігінің
«Д. Серікбаев атындағы
Шығыс Қазақстан мемлекеттік
техникалық университеті»
шаруашылық жүргізу құқығындағы
республикалық мемлекеттік
кәсіпорыны



Республиканское государственное
предприятие на праве
хозяйственного ведения
«Восточно-Казахстанский
государственный технический
университет им. Д. Серикбаева»
Министерства образования и науки
Республики Казахстан

Қазақстан Республикасы, ШҚО
070004, Өскемен қаласы, А.К. Протозанов көшесі, 69
070010, Өскемен қаласы, Д. Серікбаев көшесі, 19
тел.: 26-28-89, факс 26-74-09
E-mail: kanc_ekstu@mail.ru

«СБЕРБАНК» АҚ ЕБ Өскемен қаласындағы филиалы
ЖСК KZ70914102203KZ000DL

БСК SABRKZKA, РНН 18180000624, Код (КБе) 16
БСН 010440002379

09.11.2018 № 15-22-04/2263

Республика Казахстан, ВКО
070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова А.К., 69
070010, г. Усть-Каменогорск, ул. Д.Серикбаева, 19
тел.: 26-28-89, факс 26-74-09

E-mail: kanc_ekstu@mail.ru
ДБ АО «СБЕРБАНК» филиал в г. Усть-Каменогорск

ИИК KZ70914102203KZ000DL, БИК SABRKZKA,
РНН 18180000624, Код (КБе) 16
БИН 010440002379

СПРАВКА

Дана Бельдеубаевой Жанар Толеубаевне в том, что она действительно в период с 2015 года по 2017 год работала в должности старшего научного сотрудника по проекту «Разработка информационно-аналитической системы мониторинга запасов и качества подземных вод Республики Казахстан», выполненного в Восточно-Казахстанском государственном техническом университете им. Д.Серикбаева в рамках государственного заказа по бюджетной программе 217 «Развитие науки», подпрограмме 102 «Грантовое финансирование научных исследований».

Проректор по НИИ

О.Гавриленко

Исп. Айдарова Д.
8/7232/269168

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт внедрения результатов диссертационного исследования в производство



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по Н и МС
О.Д. Гавриленко
О.Д. Гавриленко
« 30 » мая 2017 г.



«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по УМР
Н.Н. Линок
Н.Н. Линок
« 30 » мая 2017 г.

А К Т

об использовании результатов НИР договора № 327 от 13 мая 2016 г. по теме «Разработка информационно-аналитической системы мониторинга запасов и качества подземных вод Республики Казахстан», выполняемого в рамках программы 101 "Грантовое финансирование научных исследований" в учебном процессе университета.

Мы, нижеподписавшиеся, начальник управления по академической деятельности Тажибаева Г.Б.; начальник управления научно-исследовательской работы и инновационной деятельности Сегада Т.А.; заведующий кафедрой информационных систем и компьютерного моделирования Кумаргажанова С.К. составили настоящий акт в том, что результаты НИР договора № 327 от 13 мая 2016 г. по теме «Разработка информационно-аналитической системы мониторинга запасов и качества подземных вод Республики Казахстан» внедрены в учебный процесс кафедры информационных систем и компьютерного моделирования в 2016-2017 учебном году.

Результаты исследований по теме были использованы при разработке методических рекомендаций по курсовому проектированию по дисциплине «Численные методы» для магистрантов специальности 6М070400 - Вычислительная техника и программное обеспечение, а задачи, реализованные в процессе научного исследования, использованы для формирования банка индивидуальных заданий и практических примеров.

Научные результаты исследований опубликованы:

а) Рахметуллина С.Ж. Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Численные методы» для магистрантов специальности 6М070400 - Вычислительная техника и программное обеспечение, 2016;

б) Beldeubayeva Zh.T., S.Rakhmetullina, Mathematical and Computer Modeling of the Process of Groundwater Pollution, Материалы 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies AICT 2016 Russia, Октябрь, Баку, Азербайджан. – Октябрь, 2016. – стр. 743-745.

Использование научных результатов исследования по теме позволяют повысить качество учебно-методического обеспечения и степень приобретения магистрантами компетенций в области использования современных численных методов для решения прикладных задач.

/ Начальник управления по академической деятельности

Тажибаева Г.Б.

Начальник управления научно-исследовательской работы и инновационной деятельности

Сегада Т.А.

Заведующий кафедрой информационных систем и компьютерного моделирования.

Кумаргажанова С.К.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс

Согласовано

Утверждаю

Проректор по научной работе
и международному сотрудничеству
ВКГТУ им. Д.Серикбаева
 О.Д.Гавриленко

Директор ТОО "Центр экологической
безопасности"

 Корешков Г.Л.

« 16 » 10 2017 г.
м.п.

« 16 » октябрь 2017 г.
М.П. «ЦЭБ»

А К Т

о внедрении результатов НИР в производство

Мы, представители ТОО «Центр экологической безопасности» настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы «Разработка информационно-аналитической системы мониторинга запасов и качества подземных вод Республики Казахстан» № 61-420-17, выполненной в Восточно-Казахстанском государственном техническом университете им.Д.Серикбаева, в рамках грантовых научных исследований в период с 12 февраля 2015 по 30 ноября 2017 г. внедрены в ТОО «Центр экологической безопасности».

1. Вид внедрения результатов: программа для ЭВМ;
2. Область и форма внедрения: экологический мониторинг, научные исследования;
3. Технический уровень НИР: заявка на авторское свидетельство;
4. Ожидаемый эффект от внедрения: внедрение системы позволит улучшить сбор и анализ данных экологического мониторинга г. Усть-Каменогорска.

От ВКГТУ им. Д.Серикбаева:

От предприятия:

Руководитель темы

Технический директор

 /Е.М.Турганбаев
« 16 » октябрь 2017 г.

ТОО «Центр экологической
безопасности»

 Шевченко В.В.
« 16 » октябрь 2017 г.