

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

СУСКИН ВИКТОР ВИКТОРОВИЧ



**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ АНАЛИЗА
БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ «ПОЛИГОН «СЕВЕРНЫЙ»**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н. С. С. Уткин

МОСКВА, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Состав и особенности технологий, применяемых в пунктах глубинного захоронения ЖРО 13	
1.1 Применение технологий закачки отходов в глубокие геологические горизонты в России и за рубежом	13
1.2 Выбор объекта для исследований	19
1.2.1 Обзор предшествующих работ по моделированию ПГЗ ЖРО полигон «Северный»20	
1.2.2 Выводы по анализу предшествующих моделей	30
2 Исходные данные для формирования модели объекта	32
2.1 Анализ природных условий местоположения объекта.....	32
2.1.1 Географические условия	32
2.1.2 Гидрография	32
2.1.3 Геологическое строение	33
2.1.4 Гидрогеологические условия.....	35
2.1.5 Типы захораниваемых отходов	36
2.1.6 Режимы захоронения отходов	37
2.2 Формирование перечня моделируемых процессов	37
2.2.1 Математическая модель напорно-безнапорной фильтрации.....	38
2.2.2 Математическая модель адвективно-дисперсионно-диффузионного переноса с сорбцией по линейной изотерме и радиоактивным распадом.....	40
2.2.3 Модель переноса в среде с двойной пористостью.....	41
2.3 Уточнение границ области моделирования	42
2.4 Систематизация данных мониторинга	49
2.5 Выводы к главе 2	50
3 Разработка фильтрационной модели и модели массопереноса в среде с двойной пористостью.....	52
3.1 Особенности метода учета фильтрационной неоднородности по колонкам геологических скважин.....	52
3.2 Применение и параметризация модели массопереноса в среде с двойной пористостью 60	
3.2.1 Коэффициент массообмена (K)	61
3.2.2 Мобильная пористость (n_m)	63
3.2.3 Немобильная пористость (n_{im})	64
3.2.4 Сравнение с гомогенной моделью	64
3.3 Обоснование фильтрационно-емкостных параметров модели	65
3.3.1 Скважина А-57	66

3.3.2	Скважина П-7	70
3.3.3	Естественный поток.....	72
3.3.4	Моделирование с измельчением расчетной сетки.....	74
3.3.5	Сравнение моделей без диффузии и дисперсии на разных сетках	75
3.4	Особенности расчётного гидрогеологического обоснования безопасности ПГЗ ЖРО (на примере полигона «Северный»)	77
3.4.1	Архитектура ПС ГЕОПОЛИС	77
3.4.2	Разработка трехмерной геофильтрационной-геомиграционной модели	78
3.5	Выводы к главе 3	94
4	Разработка трехмерной модели ПГЗ ЖРО полигон «Северный»	95
4.1	Анализ неопределенностей и достоверности фактических данных и рекомендации по организации мониторинга	95
4.1.1	II эксплуатационный горизонт	95
4.1.2	I эксплуатационный горизонт.....	98
4.2	Калибровка фильтрационных свойств Правобережного разлома в модели.....	99
4.3	Верификация расчётной модели	102
4.3.1	Стационарная фильтрационная задача	102
4.3.2	Нестационарная фильтрационная задача	108
4.3.3	Миграционная задача	113
4.4	Выводы к главе 4	120
	Заключение	122
	Список сокращений	123
	Список использованных источников	124
	Основные публикации по теме диссертации.....	132

Введение

Захоронение РАО – одна из крупных проблем в области использования атомной энергии. На её полномасштабное решение ориентируют утвержденные Президентом РФ Основы государственной политики [1]. При этом вопрос долгосрочной безопасности захоронения является ключевым. Основные требования по безопасности захоронения РАО представлены в форме федеральных норм и требований, в том числе адресуемых к захоронению ЖРО [2-4], и основном законе недропользования [5]. Вопросам захоронения РАО посвящено несколько стандартов МАГАТЭ [6-9]. Надежного решения принципиального вопроса о локализации отходов в геологической среде требуют нормы Федеральных законов: 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» [10], 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [11] и основной закон «О недрах» [5], а также Положение о порядке лицензирования пользования недрами [12].

Технология закачки жидких радиоактивных отходов в глубокозалегающие пласты-коллекторы применяется с 1963 г. только в нашей стране. До последнего времени, несмотря на принятые меры [13], её не удалось обосновать как лучшую практику на уровне МАГАТЭ. Отражением этого стал законодательный запрет на создание новых полигонов в нашей стране (ст. 30 190-ФЗ [11]). Главная проблема обоснования соответствия технологии закачки ЖРО в глубоко расположенные геологические пласты современным международным стандартам связана с ее базовой концепцией — захоронением отходов в жидкой фазе (без отверждения) и отсутствием системы инженерных барьеров в общем понимании, что воспринимается зарубежными специалистами, как нарушение принципа мультибарьерности. Хотя на самом деле в концепции ПГЗ ЖРО присутствуют элементы многобарьерности в виде чередующихся водоупорных и водоносных горизонтов [14].

Расчетные исследования являются ключевым и зачастую единственным инструментом для получения оценок безопасности в области обращения с РАО [15]. С момента начала разработки данной технологии закачки, расчетные модели, которые в настоящее время реализуются с использованием компьютерных технологий, являются основным инструментом обоснования долгосрочной безопасности в целом и локализации отходов в выделенном для этого горном отводе. Для обеспечения обоснования физической и химической стабильности неупакованных отходов в условиях, ожидаемых на установке для захоронения, и для обеспечения их надлежащего функционирования в случае ожидаемых при эксплуатации событий или аварий должны использоваться специальные модели, верифицированные на данных наблюдений, и/или проводиться проверки поведения форм отходов [7]. При этом на каждом этапе развития данная технология удаления ЖРО и средства оценки безопасности этой

технологии удовлетворяли требованиям своего времени. Однако в 2011 году появилась необходимость в новом витке развития методов и моделей, так как существующие на тот момент модели не в полной мере удовлетворяли потребностям обоснования безопасности, а вычислительные мощности развивались и позволяли создавать модели на другом уровне. К тому же, по рассматриваемой технологии удаления ЖРО в глубокозалегающие пласты-коллекторы имелся ряд замечаний и рекомендаций органов регулирования безопасности в области использования атомной энергии и в сфере недропользования, в том числе прямо предусматривающие необходимость разработки так называемых постоянно действующих геофильтрационных-геомиграционных моделей для ПГЗ ЖРО. Данные обстоятельства требовали развития компьютерных программ и численных трёхмерных компьютерных моделей, которые бы обеспечивали комплексный учёт максимального количества существующих процессов с должным обоснованием параметров моделей и с минимальным количеством допущений. В данных условиях появился заказ эксплуатирующей организации на разработку новой геофильтрационной-геомиграционной модели полигона «Северный», выполненной на базе одной из лидирующих программ, обладающей более широким набором моделируемых процессов, более гибким и удобным функционалом, и в будущем должную иметь статус «постоянно действующей» модели объекта. Согласно [3] в ООБ ПЗРО (ПГЗ ЖРО) должны быть указаны методики и программы, используемые для обоснования безопасности ПЗРО (ПГЗ ЖРО), в том числе для прогнозного расчета оценки безопасности системы захоронения РАО, и приведены сведения об экспертизе (аттестации) программных средств, применяемых для численного моделирования физических и химических процессов при обеспечении и (или) обосновании безопасности ПЗРО (ПГЗ ЖРО).

Вышеуказанные обстоятельства стали отправной точкой для начала работ над диссертационным исследованием, которое направлено, в первую очередь, на обоснование параметров и граничных условий гидрогеологической модели объекта, а также непосредственно на ее разработку и верификацию.

На полигоне «Северный» длительное время особых сомнений в безопасности технологии удаления ЖРО в глубокозалегающие пласты-коллекторы не было [16-18]. В 2013 г. Российская Федерация инициировала организацию международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) международной экспертной оценки технологии удаления жидких радиоактивных отходов в глубокозалегающие пласты-коллекторы [19]. Референтным объектом был выбран полигон закачки ЖРО «Северный». Для устранения рекомендаций и замечаний миссии необходимо разработать более современную геофильтрационную-геомиграционную модель объекта с возможностью дальнейшей актуализации, учета других процессов, имеющих место на территории расположения полигона «Северный», что также подтверждает актуальность

диссертационного исследования. В конечном итоге знания, накопленные с момента работы над новой моделью, позволили реализовать создание современной постоянно действующей трехмерной геофильтрационной-геомиграционной модели полигона «Северный».

К началу диссертационного исследования по рассматриваемой технологии имелись:

- замечания и рекомендации органов регулирования безопасности в области использования атомной энергии и в сфере недропользования, в том числе прямо предусматривавшие необходимость разработки постоянно действующих геофильтрационных-геомиграционных моделей для таких объектов;
- замечания миссии МАГАТЭ, также указывавшие на недостаточный уровень применения современных трехмерных моделей и недостаточную проработку вопроса обоснования безопасности [19];
- прямая заинтересованность эксплуатирующей организации пункта глубинного захоронения ЖРО полигон «Северный» (в тот период ФГУП «ГХК») в разработке постоянно действующей модели объекта.

Из замечаний и рекомендаций миссии МАГАТЭ [19] отдельно стоит выделить следующее:

1. в соответствии с [7] комплексная оценка безопасности должна быть выполнена на основе наилучшей доступной информации и использовать обоснованные концептуальные и математические модели;
2. необходимо провести полную инвентаризацию фактических данных за всю историю эксплуатации объекта, поскольку эти данные составляют основу безопасной эксплуатации в будущем и будут необходимы для оценки и расчета доз;
3. конечной целью подтверждения безопасности должны являться индивидуальные дозы и риски, как это определено в [7], однако также необходимо иметь промежуточные звенья цепи – ореолы концентраций, потоки подземных вод и т.п.;
4. принимая во внимание сложность места расположения объекта, необходимо создать полноценную трехмерную модель участка, в которую будут входить места закачки РАО и места разгрузки подземных вод, а также будет реализована связь проницаемых горизонтов между собой;
5. расчетная трехмерная модель должна подтверждать историю эксплуатации полигона (быть откалибрована по фактическим данным).

Решению проблемы захоронения РАО в последнее время уделяется всё больше внимания:

1. ратификация в 2005 году Российской Федерацией Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами [20]: предусмотренное конвенцией представление и рассмотрение

регулярных национальных докладов [21-25] сконцентрировалось на рассмотрении практики закачки жидких РАО;

2. вступление в силу в 2011 г. нового российского закона по обращению с РАО, который определил актуальность вопросов закрытия действующих пунктов захоронения ЖРО, и статьей 30 которого стал запрет на создание новых подобных объектов захоронения.

По результатам миссии МАГАТЭ был подготовлен отчет с рекомендациями по повышению долгосрочной безопасности после закрытия ПГЗ ЖРО [26]. С целью учета рекомендаций миссии МАГАТЭ Госкорпорацией «Росатом» в 2015 году была разработана и согласована с Ростехнадзором «Программа расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию и оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ «Международное экспертное рассмотрение практики глубокой закачки жидких радиоактивных отходов в Российской Федерации» [13, 27]. Программа предусматривает широкий комплекс экспериментальных и расчетных работ по закрытию скважин и обоснованию долговременной безопасности ПГЗ ЖРО [25, 28].

На международном уровне признано, что обоснование безопасности пунктов захоронения РАО должно производиться на высоком уровне в соответствии с разработанными и принятыми нормативными документами и требованиями [6-9], и с помощью самых современных вычислительных средств. Применение современной трехмерной модели, способной решать задачи геофильтрации и геомиграции, должно проводиться в купе с базой фактических данных, которая включает в себя почти полувековой мониторинг, проводившийся на полигоне «Северный», и позволяющей провести верификацию модели с доказательством её способности адекватно воспроизводить историю закачки на полигоне, и, что также очень важно, – решать прогнозные задачи распространения загрязнителей в грунтовых водах. Также, с помощью разработанной модели, в соответствии с рекомендациями [19], появится возможность предоставить полную оценку проекта, определить набор неопределенностей и устранить их до разработки НИОКР по закрытию ПГЗ ЖРО полигон «Северный».

Учет опыта разработки предшествующих моделей представлялся необходимым для создания наиболее совершенной модели полигона закачки. Также имелась возможность создания модели на базе современного расчётного кода (ПК) GeRa/V1 (Geomigration of Radionuclides), который во время диссертационного исследования получил аттестационный паспорт, отвечая, таким образом, требованиям Российского законодательства о необходимости использования аттестованных программных средств (согласно [10], в случае, если требуется построение расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии, то для

их построения должны использоваться программы для электронных вычислительных машин (ЭВМ), прошедшие экспертизу в организации научно-технической поддержки уполномоченного органа государственного регулирования безопасности), который в настоящий момент продолжает развиваться и разрабатывается группой учёных из ИБРАЭ РАН и ИВМ РАН. Данный РК будет являться расчётным ядром программного средства.

С помощью новой модели становится возможным проведение исследований влияния каких-либо параметров на точность расчёта; понимание важности и точности определения свойств некоторых геологических объектов, конкретно в данном случае – тектонических нарушений.

Стоит отметить, что трёхмерная расчётная модель является частью программного средства ГЕОПОЛИС, которое состоит из трех компонент: непосредственно самой модели, в которой определена геометрия расчетной области, параметры геологических сред, начальные и граничные условия, режимы работы скважин и т.д., расчетного модуля – кода GeRa/V1 [29-31], дополненного возможностью учета новых процессов, и базы данных мониторинга полигона «Северный», используемой для верификации модели на данных натурных измерений, учитывающей пятидесятилетнюю историю эксплуатации полигона.

Целью работы являлось обеспечение безопасности и экологической приемлемости пункта глубинного захоронения ЖРО полигон «Северный» (Железногорский филиал ФГУП «НО РАО») на стадии его эксплуатации и закрытия путем разработки современной геофильтрационной-геомиграционной модели и обоснования ее параметров.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. анализ ранее созданных моделей объекта (границы моделей, моделируемые процессы, допущения и недостатки предшествующих разработок) и моделей подобных объектов для выбора подходов к моделированию и разработке новой модели, снижению консерватизма и расширению границ модели для последующих оценок дозовых нагрузок;
2. сбор, систематизация и анализ данных (геологических, гидрогеологических, геоморфологических, метеорологических и данных бурения) о территории расположения пункта захоронения, данных мониторинга (уровни подземных вод и концентрация загрязнителей в них) и создание единой базы фактических данных для верификации разработанной модели в рамках диссертационного исследования, а также для возможности ее дальнейшей актуализации и верификации по вновь полученным данным;
3. разработка трёхмерной геофильтрационной-геомиграционной модели, включающая:

- обоснование границ, условий и параметров модели, в том числе оценку пространственной изменчивости фильтрационных параметров геологических слоёв,
 - учет модели массопереноса в среде с двойной пористостью и обоснование ее геомиграционных параметров;
4. калибровка фильтрационных параметров и параметров двойной пористости модельных слоев и фильтрационных свойств Правобережного тектонического нарушения, а также верификация разработанной модели по всей совокупности фактических данных.

Научная новизна работы.

1. Разработана геофильтрационная-геомиграционная модель для анализа и обоснования безопасности ПГЗ ЖРО полигон «Северный», в которой впервые:

- расчетная область расширена до природных границ – мест естественной разгрузки подземных вод (региональных дрен и др.) по сравнению с предыдущими моделями объекта ввиду необходимости проведения на модели полного комплекса обоснования безопасности вплоть до предоставления данных для оценки дозовых нагрузок в местах потребления воды;
- объединены моделируемые ранее в разных моделях процессы геофильтрации и геомиграции;
- определены и обоснованы неоднородные фильтрационные параметры слоев модели (пластов-коллекторов и водоупорных горизонтов), основанные на гидродинамических скважинных исследованиях с последующей калибровкой модели, позволившие с приемлемой точностью воспроизвести стационарные условия и историю эксплуатации объекта.
- впервые применена модель массопереноса в среде с двойной пористостью на объекте такого типа, и определены и обоснованы ее параметры;
- проведен анализ неопределенностей и достоверности фактических данных с отбраковкой некачественных замеров, который позволил получить параметры модели, а также осуществить калибровку фильтрационной модели и выполнить эпигнозный расчет геофильтрационной-геомиграционной модели.

2. Впервые путем комплексного учета предшествующих исследований, создания модели, ее калибровки и верификации по фактическим данным сформировано отдельное программное средство (ПС) ГЕОПОЛИС.

Практическая значимость полученных исследований.

Разработанная расчетная модель в составе ПС ГЕОПОЛИС аттестована Ростехнадзором для решения задач обоснования безопасности ПГЗ ЖРО полигона «Северный» на эксплуатационном и постэксплуатационном этапах, включая аварийные сценарии.

Современная расчетная модель обеспечивает:

1. выполнение условия действия лицензии: проводит численные оценки уже имеющегося объема ЖРО в геологической среде (совместно с верификацией расчетов по фактическим замерам в скважинах) и предоставляет исходные данные для оценки остаточной емкости пластов-коллекторов;
2. получение необходимых исходных данных для обоснования работ по закрытию данного объекта:
 - проведение прогнозных расчётов на длительный период (долговременная безопасность);
 - оценку времени достижения загрязняющими компонентами мест разгрузки подземных вод;
 - расчет значений максимальной концентрации загрязнителей в подземных водах в любой точке модели и в местах разгрузки подземных вод в естественные дренажи (исходные данные для проведения оценок дозовых нагрузок на население в местах естественного потребления воды и нахождения у водоемов);
 - оценку долговременных последствий аварийных ситуаций различного генезиса (внешние и внутренние воздействия) на данном объекте и, возможно, аналогичных объектах (заколонные перетоки по стволам скважин, образование горизонтальных каналов ускоренной миграции, засуха/наводнение и др.).

Разработанная модель и полученные на ее основе результаты устраняют часть замечаний и учитывают рекомендации миссии МАГАТЭ к обоснованию безопасности технологии удаления ЖРО в глубокозалегающие пласты-коллекторы.

Личный вклад соискателя:

- проведение сбора, систематизации и анализа всей совокупности фактических данных, использованных при построении модели, а также сбор фактических скважинных данных мониторинга с отбраковкой некачественных замеров и объединением таких данных в единую базу;
- создание модели, калибровка и верификация модели по фактическим данным, подтвердившим корректность модели и ее консерватизм;
- обоснование параметров разработанной геофильтрационной-геомиграционной модели: проведение оценки пространственной изменчивости фильтрационных параметров геологических слоёв, применение комплексного метода систематизации фактических данных и обоснование параметров модели массопереноса в среде с двойной пористостью;
- проведение эпигнозного расчета на разработанной модели, в том числе верификационных расчетов для аттестации ПС в Ростехнадзоре.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная расчетная геофильтрационная-геомиграционная модель для обоснования безопасности ПГЗ ЖРО полигона «Северный», в частности:
 - расширенные границы модели по сравнению с предыдущими моделями объекта, учитывающие места разгрузки подземных вод пластов-коллекторов в естественные дрены;
 - учет в одной модели всего спектра ранее моделируемых процессов при предыдущих исследованиях на данном объекте;
 - верификация модели по фактическим данным, учитывающим более чем сорокалетнюю историю эксплуатации объекта (с 1967 г. по 2011 г.);
 - проведение калибровки модельных параметров, в том числе калибровки коэффициента фильтрации Правобережного тектонического нарушения, являющегося важным звеном в обосновании безопасности данного объекта;
 - анализ неопределенности и достоверности фактических данных, а также замечания и предложения к организации и ведению мониторинга.
2. Определены и обоснованы параметры модели:
 - неоднородность фильтрационных параметров, обоснованная проведенной верификацией модели по фактическим данным;
 - параметры двойной пористости, обоснованные по фактическим замерам концентраций нитрат-иона в наблюдательных скважинах.
3. Результаты геофильтрационных и геомиграционных эпигнозных расчетов, полученные с применением всего спектра ранее моделируемых процессов при предыдущих исследованиях на данном объекте, верифицированные по фактическим скважинным данным.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность разработанной геофильтрационной-геомиграционной модели и ее результатов расчета в составе ПС «ГЕОПОЛИС» для использования при обосновании безопасности ПГЗ ЖРО полигон «Северный» подтверждается верификацией модельных результатов по фактическим данным и прошедшей процедурой аттестации ПС в Ростехнадзоре с положительным заключением и выданным аттестационным паспортом. Результаты диссертации неоднократно докладывались на российских и международных конференциях.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на 17 международной конференции «Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Киото, 2019 г.), V международной научно-технической конференции «Информационные проекты и технологии ядерной энергетики» МНТК-НИКИЭТ (Москва,

2018 г.), 5 международной конференции «International Conference, Hydrus Software Applications to Subsurface Flow and Contaminant Transport Problems» (Прага, 2017 г.), VI научном семинаре «Моделирование технологий ядерного топливного цикла» (Снежинск, 2017 г.), X юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» (Москва, 2015 г.), XXII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2015 г.), VII съезде по радиационным исследованиям «Радиобиология, радиозэкология, радиационная безопасность» (Москва, 2014 г.), XV, XVIII и XIX научных школах молодых ученых ИБРАЭ РАН (Москва, 2014, 2017 и 2018 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 5 статей в научных изданиях, включая 3 статьи в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России, 10 докладов на российских и международных конференциях и семинарах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 85 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 133 страницы основного текста, включая 23 таблицы и 65 рисунков, в том числе графики.

1 Состав и особенности технологий, применяемых в пунктах глубинного захоронения ЖРО

Атомная промышленность, как относительно молодая отрасль, естественным образом привлекала все технологии, наработанные в иных отраслях промышленности, в том числе в сфере обращения с жидкими отходами. В последнем случае существует четыре базовых практики:

1. Отверждение отходов. Отверждение ЖРО средней и высокой активности и высокой минерализации является достаточно сложным процессом. По этой причине во всех странах, реализовывавших ядерные оборонные программы, произошло накопление отходов в емкостях-хранилищах. До сегодняшнего дня эта проблема полностью не решена ни в США, ни в России [32, 33].

2. Сбросы в открытую гидросеть с последующим разбавлением. Применение этой практики в США, Великобритании и Франции имело меньшие последствия для окружающей среды и населения, поскольку сброс осуществлялся в первом случае в р. Коламбия с большим расходом, в остальных – в моря. В России подобная практика привела к достаточно тяжелым последствиям на первом из трех химических комбинатов (ныне ФГУП «ПО Маяк») [32].

3. Размещение в поверхностных водоемах-хранилищах РАО. Первоначально решения по созданию приповерхностных водоемов-хранилищ РАО оценивались достаточно оптимистично [32]. Однако со временем объем издержек, связанных с подобным технологическим решением, становился все более очевидным.

4. Непосредственное захоронение в геологической среде. Применение данной практики имело существенные отличия от применявшихся в иных отраслях методов, среди которых и вопросы ядерной безопасности, и разогрева отходов вследствие радиоактивного распада, и наличия иных радиохимических процессов. Эти особенности в совокупности с наличием средств для реализации альтернативных решений стали причиной того, что данная практика стала применяться только в СССР и России [32].

1.1 Применение технологий закачки отходов в глубокие геологические горизонты в России и за рубежом

Подземное захоронение сточных вод впервые стало применяться на нефтепромыслах США и России в начале прошлого века. Высокоминерализованную пластовую воду закачивали в непродуктивные и обводнившиеся скважины в США (Пенсильвания) и России (Бакинский район и на Северном Кавказе). В последующий период эта практика была продолжена, несмотря на ужесточение требований к закачиваемым водам.

По данным работы [34] проведен анализ технологий закачки отходов в разных странах. Так, в США подземное захоронение сточных вод получило наибольшее распространение. В

1959 году там, кроме нескольких десятков тысяч нагнетательных скважин на объектах нефтедобычи, эксплуатировалось 6 полигонов подземного захоронения сточных вод других отраслей. К 1997 году их стало 705. Коллекторами для захоронения этих вод служили, в основном, осадочные породы: пески, песчаники, известняки и доломиты. В магматические и метаморфические породы сточные воды захораниваются в редких случаях.

В Германии насчитывается несколько десятков полигонов подземного захоронения сточных вод предприятий калийной, химической, нефтяной и газовой промышленности. В середине 20-х гг. в Германии был организован сброс рассолов калийной промышленности через скважины глубиной 5-160 м в карбонатные породы пермских отложений. Также закачка сточных вод производилась в карбонатные и терригенные породы юрского возраста до глубин 1100 м и более.

В Великобритании в районе Уитчарча промышленные сточные воды закачиваются уже в течение 60 лет в отложения мелового возраста, для чего используются 19 скважин.

Во Франции первая поглощающая скважина пробурена в 1970 г. в 60 км от Парижа на заводе «Грандпюи». Воды объемом 1100 м³/сут закачивались в юрские известняки в интервал 1950-1980 м.

В Канаде имеется несколько десятков поглощающих скважин для подземной закачки промышленных сточных вод. Только в провинции Онтарио насчитывается 16 таких скважин. В провинции Альберта ежесуточно захоранивается более 30 тыс. м³ сточных вод нефтеперерабатывающих заводов.

В Японии осуществляется подземное захоронение многих разновидностей промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. Так, на одном из медных рудников в течение многих лет производится закачка кислых дренажных вод в 150 скважин глубиной 35-60 м, пробуренных из шахты в толще андезитов, подстилаемых песчаниками. Объем закачки 13 тыс. м³/сут.

В России практика закачки жидких отходов, помимо уже упомянутой нефтяной отрасли, применялась в химической промышленности. Она стала единственной возможностью решения экологических проблем Нижегородской (г. Дзержинск), Тамбовской (химический комбинат), Волгоградской («Волжский оргсинтез») областей и других регионов страны. Указанным способом утилизируются и хозяйственно-бытовые стоки – в гг. Губкинский, Тарко-Сале Ямало-Ненецкого автономного округа, где действуют полигоны по захоронению городских стоков. Всего на территории РФ действует более 20 полигонов [35].

Вопрос о глубинном захоронении жидких радиоактивных отходов стал рассматриваться в России в середине 50-х гг. прошлого века, в условиях, когда планируемые мощности создаваемых производств практически исключали возможность реализации двух первых из

вышеупомянутых практик, а по третьей имелись выраженные проблемы. Научно-технические предложения о предпосылках и организации работ по захоронению жидких РАО были рассмотрены и одобрены на Научно-Техническом Совете Министерства среднего машиностроения под председательством академика И. В. Курчатова [16]. Изначально было ясно, что далеко не все геологические формации пригодны для захоронения ЖРО с гарантированной локализацией отходов в недрах. К проведению работ по созданию систем глубинного захоронения были привлечены ведущие организации страны, создана специализированная научно-исследовательская лаборатория № 5 (НИЛ-5) в институте «ВНИПИпромтехнологии», на которую были возложены задачи проведения исследований и внедрения данного способа обращения с РАО на предприятия отрасли. Так, в районе Сибирского химического комбината были начаты геологоразведочные работы с целью обоснования безопасности данной технологии для наиболее вредных жидких промышленных отходов – радиоактивных сточных вод атомной промышленности и токсичных вод химических производств. В ходе этих работ выполнялись различные геофизические исследования, геологическая съемка, бурение скважин, опытно-фильтрационные работы (ОФР), физико-химические исследования совместимости отходов с геологической средой, санитарно-гигиенические оценки и т.д. [16].

Задача глубинного захоронения жидких РАО путем их нагнетания в скважины впервые была решена на полигонах захоронения Сибирского химического комбината (1963) совместно с ИФХЭ РАН и «ВНИПИпромтехнологии» [36]. Позже, в результате длительной кропотливой работы научных, проектных и производственных организаций были созданы и начали эксплуатироваться полигоны захоронения Научно-исследовательского института атомных реакторов (1966) и Горно-химического комбината (1967) [34]. Важно отметить, что при обосновании безопасности такого способа захоронения использовались все основные из наработанных к тому времени в СССР и в мире методы обоснования закачки жидких отходов в поглощающие пласты-коллекторы.

Обоснование приемлемости и безопасности закачки отходов эволюционно развивались. Вначале преобладали соображения подобия и равновесия. При добыче нефти закачка вод в пласт в определенной мере компенсировала изъятые объемы нефти (на нефтяных месторождениях это делается для поддержания пластового давления). На иных полигонах закачки стоков устраивались разгрузочные скважины – происходила откачка воды из пласта-коллектора, а жидкие отходы нагнетались в пласт-коллектор.

Появление расчетных программ и методов начало менять технологии анализа и обоснования безопасности. Уже с 50-х гг. проводились оценки в соответствии с техническими возможностями на тот момент (аналоговое моделирование). Далее, по мере роста

вычислительных мощностей, появлялись более совершенные программные средства. Уже несколько десятилетий для моделирования нестационарной трехмерной напорно-безнапорной фильтрации в мире успешно применяется разработанная в геологической службе США (USGS) программа MODFLOW – Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model и ее миграционная составляющая – MT3DMS [37, 38]. Среди наиболее развитых программ также необходимо отметить такие программы, как Hydrus [39], FEFLOW [40], Amanzi (Advanced Simulation Capability for Environmental Management) [41] и др. Все эти программные средства нашли применение, как в моделировании переноса химических примесей, так и переноса радиоактивных веществ. Все указанные программы ориентированы на применение на персональных компьютерах (Amanzi допускает параллельные расчеты на кластерах).

Верифицированные расчетные комплексы (расчетные коды) являются необходимым инструментом для разработки, оптимизации, анализа, оценки, обоснования и обеспечения безопасности объектов ядерной энергетики и топливного цикла на всех стадиях их жизненного цикла. Существенное повышение функциональных возможностей методов моделирования, обусловленное развитием вычислительной техники и информационных технологий, требует анализа соответствия и потребностей развития существующего программного обеспечения (решение секции № 10 НТС от 05.09.2012).

Последнее десятилетие характеризовалось рядом причин и факторов, давших начало новым подходам к разработке расчетных кодов. Среди них наиболее негативными являлись следующие факторы:

1. отсутствие системного отраслевого заказа на коды, которое привело к созданию только узкоспециализированных кодов, являющихся побочным продуктом деятельности групп специалистов по обоснованию проектов и, как правило, разрабатываемых с использованием устаревших технологий, и использовавшихся в рамках одной организации одним или несколькими специалистами;
2. неотчуждаемость кодов от авторов, малая база тестирования, учета и накопления опыта пользователей;
3. создаваемые коды, как правило, не являлись коммерческим продуктом;
4. отсутствие удобного интерфейса и сервисных возможностей (в том числе для быстрой и качественной подготовки моделей на основе конструкторской документации), применения современных профессиональных баз данных и удобной графической составляющей для анализа получаемых результатов.

Расчетные коды *нового поколения* должны быть тесно связаны с работой по проекту; разработка кодов должна сопровождаться программой экспериментальных работ, направленных на их верификацию. Создание прецизионных кодов нового поколения

невозможно без эффективного использования суперЭВМ. Таким образом, необходимость разработки новых программных средств, ориентированных на принципиально новые возможности, не вызывает сомнений, что является одной из определяющих причин в данном диссертационном исследовании.

Все действующие в России полигоны глубинного захоронения ЖРО длительный период входили в состав СХК, ГХК и НИИАР, но в 2012-2013 годах переданы вновь созданной организации ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» («НО РАО»). Несмотря на то, что в указанных организациях новые производства создаются с ориентацией на отверждение всех РАО, период эксплуатации текущих объектов продлится не менее 10-15 лет. В связи с этим необходимо искать решения по этим объектам, и подтверждать безопасность существующего захоронения, что также определяет актуальность данной работы.

Кратко рассмотрим основные характеристики действующих полигонов.

Филиал ФГУП НО РАО «Северский» (г. Северск, ранее подразделение Сибирского химического комбината», СХК). В качестве пластов-коллекторов на полигоне захоронения (две площадки - 18 и 18а) используются II и III песчаные пласты позднемелового возраста мощностью 30-40 м и 37-94 м с различной степенью глинистости [34]. Уже на ранних стадиях закачки отходов была определена высокая сорбционная задержка некоторых нуклидов, несмотря на высокое солесодержание отходов [16]. Эксплуатация площадки 18а, как экспериментального полигона, была начата в 1963 г.; включала 5 нагнетательных скважин и 9 наблюдательных скважин. В последующие годы, к 1980 г., часть этих скважин была ликвидирована, а для захоронения ЖРО были пробурены новые скважины. Площадка 18 предназначена для закачки нетехнологических НАО [32]. На полигонах также осуществляется подземное захоронение сточных вод. Некоторые виды концентрированных технологических жидких отходов закачиваются в скважины периодически порциями по 5-10 тыс. м³ несколько раз в год [34].

На СХК крупными российскими учеными выполнен ряд работ по моделированию геофильтрации и распространения отходов в подземных водах [42, 43]. Также на АО «СХК» в 2011 г. проводился опыт по нагнетанию кольматирующего раствора через инъекционные скважины. Раствор содержал жидкое стекло, щавелевую кислоту, соединение алюминия и модифицирующую добавку. Таким образом, симулировалось создание слабопроницаемого барьера, призванного ограничить фильтрационный поток и задержать распространение радиоактивных отходов; данный барьер также являлся и геомиграционным барьером, дополнительно сорбирующим РАО. Создание такого барьера позволило снизить коэффициент фильтрации песков на 3-4 порядка, увеличить сорбцию, и в значительной степени

предотвратило распространение радионуклидов и нитрат-иона – основного токсичного макрокомпонента, изолированного в хранилище [44].

Филиал ФГУП НО РАО «Димитровградский» (г. Димитровград, ранее подразделение АО Государственный научный центр «Научно-исследовательского института атомных реакторов», НИИАР). Отличительная особенность территории размещения полигона захоронения НИИАР состоит в том, что толщина осадочных пород достигает 2300 м, и, что более важно, нагнетание ЖРО производится в высокоминерализованные водоносные горизонты (III и IV) каменноугольного возраста (яснополянский горизонт и окско-башкирский комплекс). Первый залегает на глубине 1410-1467 м и сложен песчаниками и алевролитами, второй – на глубине 1138-1194 м представлен трещиноватыми и кавернозными известняками и доломитами. Пластовые воды имеют минерализацию 230-250 г/дм³. В 1966-1973 гг. закачка стоков производилась в яснополянский горизонт объемом от 244 до 340 м³/сут, а с 1973 г. и по настоящее время – в окско-башкирский комплекс объемом от 320 до 960 м³/сут. [34]. В ходе геологоразведочных работ принципиальная возможность и безопасность захоронения сомнений не вызывали, что позволило создать опытно-промышленный полигон (ОПП) захоронения на данной территории. ОПП включает 5 нагнетательных скважин и 32 наблюдательные скважины. В целом результаты захоронения подтвердили перспективность использования глубоких карбонатных пластов-коллекторов для удаления промстоков. Крупное исследование – малое влияние плотностной конвекции на распределение отходов вопреки устоявшемуся мнению о значимом воздействии этого фактора [16].

Филиал ФГУП НО РАО «Железногорский» (г. Железногорск, ранее – подразделение ФГУП «Горно-химический комбинат», ГХК). Геологические условия полигона захоронения «Северный», относящегося к филиалу «Железногорский», схожи с условиями на полигоне СХК: пласты-коллекторы (I и II) также сложены песчаными отложениями. Пласты имеют юрский возраст мощностью 55-85 м и 25-45 м, залегающих на глубине 355-500 м (I горизонт) и 180-280 м (II горизонт) [34].

На данной территории беспокойство вызывало тектоническое нарушение, отделяющее полигон захоронения от р. Енисей. В результате детальных полевых гидрогеологических исследований свойств тектонического нарушения было установлено, что оно представляет собой глинистый непроницаемый экран. Результаты геологоразведочных работ с учетом опыта СХК позволили достаточно уверенно рекомендовать полигон ГХК для захоронения РАО.

В пласт-коллектор нижнего горизонта нагнетаются ВАО и САО, в пласт-коллектор верхнего горизонта – НАО [16, 45]. В I горизонт с 1967 г. закачивается около 300 м³/сут, во II горизонт с 1968 г. захоранивается до 600 м³/сут. [34]. В последние десятилетия объемы закачки ВАО существенно сокращены, практически до нуля.

В состав глубокого хранилища входят 13 нагнетательных, 4 наблюдательно-нагнетательных и 12 разгрузочных скважин. Глубинное захоронение на полигоне позволило изолировать от среды непосредственного обитания значительную часть образовавшихся отходов и избежать строительства потенциально опасных поверхностных хранилищ и бассейнов. Это имело большое значение для предупреждения радиационного воздействия на окружающую среду, особенно с учетом близости р. Енисей [32]. Одновременно с нагнетанием отходов осуществлялась откачка воды из разгрузочных скважин, что позволяло снизить давление нагнетания и добиться равномерного распределения отходов в пласте [45].

Объем удаленных отходов в глубокое хранилище жидких РАО на ГХК составил 6,37 млн м³ (данные на 2007 г.)

Таким образом, текущие объемы закачки ЖРО и целевое направление обеспечиваемых производств однозначно определяют актуальность работ по обеспечению ядерной и радиационной безопасности, а приближение сроков закрытия формирует новый набор требований к долгосрочной безопасности объектов, который ранее не предъявлялся. Один из основных документов в этой области – НП-019-15 [46]. Для подтверждения актуальности диссертационного исследования важно, что большая часть этих новых требований адресована к вопросам расчетного прогнозирования долгосрочной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.

1.2 Выбор объекта для исследований

Из трех полигонов наибольший интерес по объемам закачки и сложным характеристикам отходов представляют полигоны СХК и ГХК. В силу нескольких причин из этих двух объектов наибольший интерес для разработки трехмерной модели представлял именно полигон закачки ЖРО на ГХК. Среди них:

1. Определение миссией МАГАТЭ полигона «Северный», как референтного объекта, и наличие развернутых замечаний к обоснованию безопасности данной технологии захоронения ЖРО [19], а конкретно к существующей на тот момент модели полигона ГХК (процесс создания новой модели с учетом опыта предшествующих разработок к тому моменту уже был запущен):
 - использование упрощенных параметров гидрогеологической среды, используемой при моделировании миграции – ввиду сложности объекта целесообразно использование полноценного 3D моделирования;
 - отсутствие анализа результатов мониторинга в совокупности с результатами моделирования и расчетов.

Эти обстоятельства делали актуальным прогресс в области развития расчетных моделей именно ГХК, в том числе для представления в МАГАТЭ.

2. Руководство эксплуатирующей организации ФГУП «ГХК» само поставило задачу создать новую программную реализацию трехмерной модели, учитывающей опыт предшествующих моделей и всю историю закачки на полигоне (в связи с необходимостью проведения ряда работ, которые позволят поддерживать безопасное функционирование полигона с учетом действующих требований по безопасности (ФЦП 2008-2015 гг.) [32]).

3. Требования Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) и Роснедра, установленных в лицензиях на эксплуатацию и пользование недрами для ПГЗ ЖРО «Северный».

4. Отсутствие полноценного расчета долговременных последствий на полигоне «Северный» (крайний срок прогнозных расчетов составлял 1000 лет).

Стоит отметить, что вопросы ядерной безопасности были решены за счет критериев приемлемости отходов для захоронения, в отличие от вопросов долгосрочного прогнозирования.

Также стоит отметить, что в п. 6.4 НП-100-17 сказано, что разработка и обоснование концептуальных и математических моделей и их реализация с помощью ПС – необходимое условие для проведения оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО [2]. «Результаты прогнозных расчетов и обоснование их достоверности должны быть представлены с указанием результатов качественного и количественного анализа неопределенности, обусловленной неопределенностью сценариев, моделей, исходных данных и расчетных параметров» [2] – данная формулировка подразумевает под собой, в том числе, глубокий анализ фактических данных, используемых для верификации, их качество и пригодность.

1.2.1 Обзор предшествующих работ по моделированию ПГЗ ЖРО полигон «Северный»

Самые первые работы по моделированию полигона были выполнены аналоговым методом еще на стадии проектирования, то есть в 60-е годы прошлого века [47, 48]. Применение этого метода было обусловлено отсутствием расчетного инструментария. Недостатком метода ЭГДА (электрогидродинамическая аналогия) была возможность решения только фильтрационных задач. Согласно этому методу из электропроводной бумаги для моделирования полигона «Северный» были созданы две плановые стационарные модели для первого и второго водоносного горизонтов. Скважины были смоделированы в виде латунных электродов диаметром 5 мм, подключенных к реостатам сопротивлений моделирующего устройства. Метод ЭГДА являлся важной вехой в истории, однако далее подробно останавливаться на этом методе не будем и приведем кратко лишь основные результаты.

При моделировании работы подземного хранилища в первом горизонте [47] северная граница в долине р. Б. Тель была задана условием первого рода вдоль гидроизопьезы 165 м. На юге области была задана граница первого рода вдоль гидроизопьезы 190 м. С запада и востока

были заданы непроницаемые границы. Электропроводная бумага соответствовала коэффициентам фильтрации от 0,2 до 1,4 м/сут. При моделировании работы подземного хранилища первого горизонта было рассмотрено два варианта:

1. одновременная работа 6 нагнетательных и 6 разгрузочных скважин с суммарным дебитом закачки и разгрузки 500 м³/сут;
2. одновременная работа 4 нагнетательных и 4 разгрузочных скважин с суммарным дебитом закачки и разгрузки 500 м³/сут.

В задачу исследований входило определение дебитов и избыточных давлений на устьях нагнетательных скважин, определение дебитов и понижений уровня в разгрузочных скважинах, время продвижения фронта во время периода эксплуатации и после. Решение задач переноса проводилось приближенно – графоаналитическим методом вдоль линий тока, построенных на основе решения фильтрационной задачи. Расчеты показали, что при предположении отсутствия сорбции, время прихода к разгрузочным скважинам составит от 10 до 23 лет (первый вариант) или от 6 до 12 лет (второй вариант). Время прихода к долине р. Б. Тель оценивалось в несколько сотен лет.

Аналоговое моделирование для второго горизонта [48] дало время прихода к разгрузочным скважинам 2-3 года, а к реке Б. Тель – 30-50 лет.

К концу прошлого века появились численные подходы и вычислительные мощности, достаточные для решения задач фильтрации и массопереноса с учетом различия плотности и вязкости пластовых вод и нагнетаемых растворов. Для решения двумерной плановой фильтрации и переноса с учетом переменных плотности и вязкости во «ВНИИПромтехнологии» в 1994 г. был разработан специальный расчетный код [49]. Расчеты с помощью этого кода были проведены при следующих миграционных параметрах:

- 1) коэффициент распределения стронция-90 – 0,4 л/кг,
- 2) дисперсивность 0,1-1 м,
- 3) пористость – 0,1-0,2, д.е.

Проведённые расчеты для I горизонта показали, что за период 625 лет после завершения эксплуатации полигона стабильные компоненты РАО, не взаимодействующие с породами, не достигнут границ горного отвода недр. Граница распространения радиоактивного компонента РАО (стронций-90 с относительной концентрацией 10⁻⁵) через 100 лет будет внутри контура макрокомпонентов. Положение и площадь контура отходов, плотность которых больше плотности пластовой воды, несущественно отличается от положения контура отходов, не отличающихся по плотности от пластовой воды – плотностная конвекция не оказывает эффекта.

Результаты этих расчетов нашли отражение в монографии [16], обобщающей опыт создания, исследования и осуществления глубинного захоронения радиоактивных отходов в геологические формации.

В 2000-2001 гг. под руководством института ПАСА (Австрия), был выполнен ряд работ, связанных с моделированием геомиграции [17, 18]. Участниками проекта были специалисты институтов «ВНИПИпромтехнологии» и ИГЕМ РАН. Технология закачки привлекала внимание зарубежных специалистов, и в рамках этого ПАСА и была сформулирована и организована эта работа.

Во «ВНИПИпромтехнологии» были разработаны две однослойные двумерные модели для каждого горизонта с такими граничными условиями, которые соответствовали ранее заданным на аналоговых моделях. Фильтрационная модель «ВНИПИпромтехнологии» была реализована с помощью кода MODFLOW, миграционная – с помощью MT3DMS.

Прогнозы для горизонта I были выполнены на 1000 лет, для горизонта II – на 300 лет. Моделирование проводилось без учета распада и сорбции. Продольная дисперсивность $\alpha_L = 1,0$ м, поперечная дисперсивность $\alpha_T = 0,1$ м.

Исследование ИГЕМ РАН было выполнено для оценки влияния следующих сил на миграцию радиоактивных отходов: тепловой конвекции, плотностной конвекции и регионального потока. Для того чтобы проанализировать роль этих сил была разработана модель для водоносного горизонта на наклонном водоупоре. Ореол с отходами был задан в виде цилиндра. Проведенные на основе такой схематизации расчеты позволили установить, что для высокоактивных отходов моделирование миграции ореола на 100 лет требует учета соединения всех трех движущих механизмов.

При расчетах на длительный период оказалось, что скорость тепловыделения быстро убывает с течением времени и, следовательно, для долгосрочных прогнозов влияние тепловой конвекции не является существенным, и можно ограничиться только учетом плотностной конвекции и регионального потока. При расчетах оказалось, что для отходов низкого уровня активности (НАО), плотностные эффекты всегда доминируют над тепловыми.

В материалах ИГЕМ РАН было показано, что существует перетекание между горизонтами I и II, и это может быть причиной миграции на север в сторону р. Б. Тель. Также была проведена калибровка фильтрационных параметров отдельно для горизонтов I и II и параметров перетекания между ними. Полученные параметры были использованы для миграционных прогнозов.

Для расчетов использовались: собственный код для решения фильтрационных задач и калибровки параметров, программа HST3D (USGS) для моделирования трехмерной фильтрации

и массопереноса с учетом плотностной и тепловой конвекции, и код JDB-МОС (GeoChem Software, Inc., 1995) для прогнозирования миграции на период до 100 лет.

В работе ИАСА в международном проекте были выполнены прогнозы миграции на плановых моделях отдельно для I и II горизонтов без учета сорбции, распада и дисперсии (только конвекция). Для расчетов использовались программные коды MODFLOW для решения фильтрационной задачи и МОС3D для решения миграционной задачи.

Результаты сопоставления прогнозных ореолов для водоносных горизонтов I и II, выполненных тремя организациями, приведены на рисунках 1.1 и 1.2.

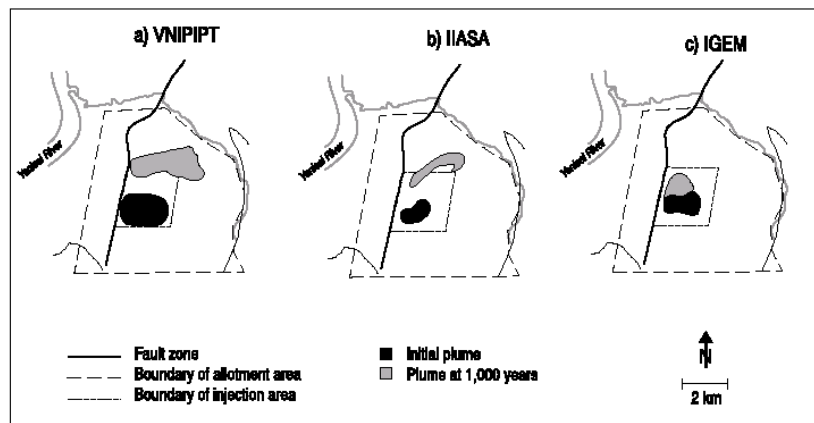


Рисунок 1.1 – Сопоставление прогнозных ореолов для водоносного горизонта I, выполненных «ВНИПИпромтехнологии», ИАСА и ИГЕМ РАН в международном проекте [17]

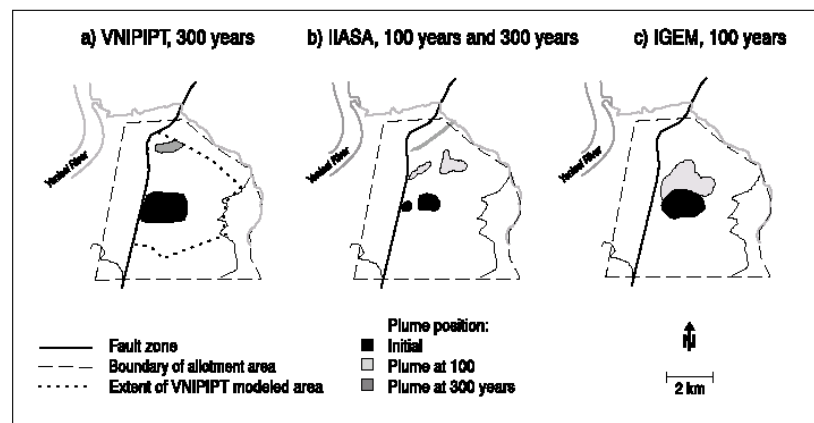


Рисунок 1.2 – Сопоставление прогнозных ореолов для водоносного горизонта II, выполненных «ВНИПИпромтехнологии», ИАСА и ИГЕМ РАН в международном проекте [17]

В отчете ИАСА [17] приводятся следующие выводы касательно сравнения результатов для I горизонта:

1. ни один из расчетов не показывает миграцию ореола отходов за пределы горного отвода в течение 1000 лет (время, которым был ограничен срок моделирования);

2. в отсутствие учета плотностной конвекции ореол РАО движется на северо-северо-восток и мигрирует на половину расстояния до реки;
3. моделирование с учетом плотностных эффектов показывает, что большая часть ореола мигрирует на север и оседает во впадине немного севернее участка размещения полигона;
4. так как при учете плотностной конвекции РАО состоит из смеси компонент, то, следовательно, не все радионуклиды будут задерживаться во впадине и, таким образом, точная картина миграции находится где-то посередине между результатами с плотностными эффектами и результатами без них.

В 2000 году в работе [17] был сделан вывод о том, что результаты расчетов тремя организациями очень близки. Однако, по мнению автора, результаты при этом имеют некоторые существенные различия. Возможно, это связано с отсутствием достаточно четких указаний на ошибки и опыт предыдущих исследований, а также отсутствием явно диагностируемых дефектов в моделях, что привело, по мнению автора, к весьма сильно различающимся результатам, если судить хотя бы по положению ореола отходов.

Касательно сопоставления во II горизонте тоже были сделаны некоторые выводы:

1. скорость миграции во II горизонте выше, чем в I горизонте;
2. ореол несорбируемого компонента достигнет границы горного отвода через 150-250 лет, что подтвердили все три участника моделирования, хоть и представили результаты на разные временные моменты.

Правобережный разлом отделяет полигон «Северный» от реки Енисей. При выполнении прогнозов во всех моделях Правобережный разлом считался слабопроницаемым. Особый интерес представляют прогнозы барьерной роли разлома в будущем. Оценка поведения разлома была выполнена исходя из того, что горизонтальные тектонические движения могут дать увеличение проницаемости вдоль разлома в двух местах (рисунок 1.3) [18].

Вариант б) не подтвердился фильтрационными исследованиями, проведенными на полигоне «Северный». В области, отмеченной на рисунке 1.3 б серым цветом, наблюдается низкая проницаемость. Поэтому, в качестве наиболее вероятного, был выбран вариант, показанный на рисунке 1.3 а, и для него выполнены прогнозы.

Прогноз миграции в горизонте I на период до 10 000 лет, полученный по результатам исследования международного проекта, приведен на рисунке 1.4.

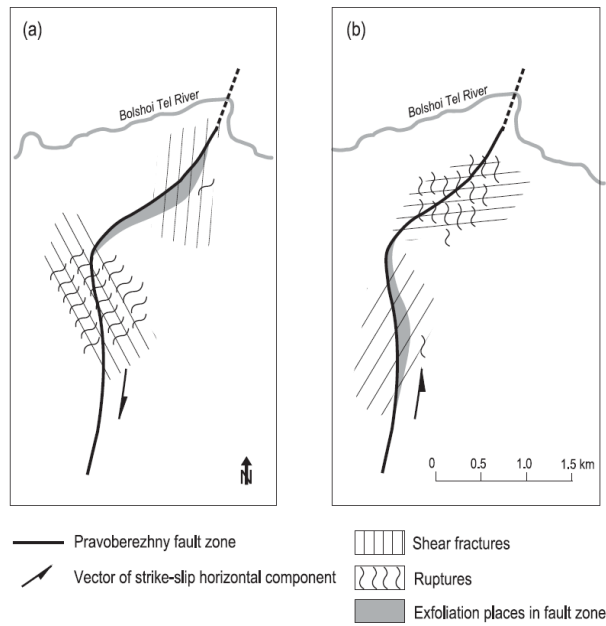


Рисунок 1.3 – Два возможных места (обозначены серым цветом) увеличения проницаемости
 ВДОЛЬ разлома

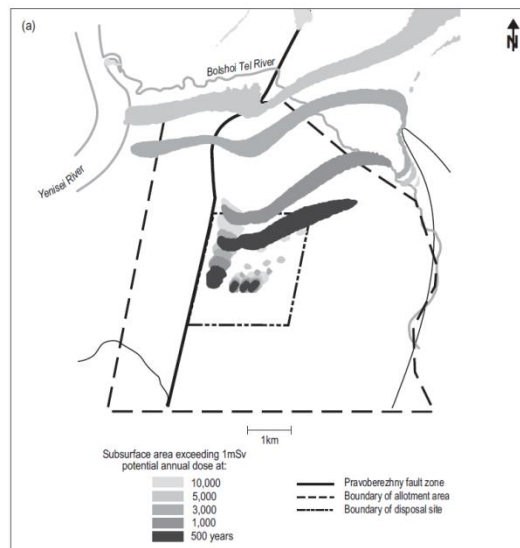


Рисунок 1.4 – Прогнозы миграции в случае увеличения проницаемости разлома

Проведенные в составе международного проекта модельные исследования хотя и выполнены в упрощенной постановке, но полезны для последующего создания более достоверных моделей. Однако стоит отметить, что по результатам гелиевой съемки и, исходя из различия естественных уровней в опущенном и приподнятом блоках (до 43 м), можно с уверенностью говорить о том, что плоскость тектонического нарушения представляет собой глинистый экран. Глинистый экран образован залегающими под большими углами глинистыми слоями, которые не были нарушены (вследствие пластичности глин), а только перемяты [16].

Основные минусы примененных в тот период моделей – двумерность. Для гидрогеологических условий объекта важно учитывать вертикальную фильтрацию и миграцию. Важным достоинством выполненного международного исследования является оценка влияния плотностной конвекции и теплового потока.

Попытка увеличения достоверности геомиграционной модели полигона «Северный» за счет учета совокупности геохимических процессов была предпринята в Томском политехническом университете под руководством М. Б. Букаты в 2009 г. [50, 51]. Им был разработан программный код HydroGeo, основанный на методе конечных разностей для расчета фильтрации и теплопереноса с учетом химических реакций.

В этой работе были рассмотрены две модели. Во-первых, упрощённая модель для полного спектра радионуклидов с учетом возможности протекания химических взаимодействий в системе раствор-твердая фаза в двумерном пространстве. Во-вторых, «полная» модель, в которой рассматривалась миграция только ^{90}Sr и NO_3^- , контролируемых в ходе режимных наблюдений и не принимающих участия в образовании.

Как следует из [50], в упрощенной модели был рассмотрен однослойный водоносный горизонт I, расчетная область 3x3 км. Шаг сетки составлял 100 м. Теплоперенос и плотностная конвекция не учитывались. Производился детальный учет химических реакций. Время расчета – 100 лет.

Результаты прогнозов миграции ^{90}Sr , U_4O_9 и PuO_2 приведены на рисунках 1.5-1.7 соответственно (на 2007 и 2094 гг.).

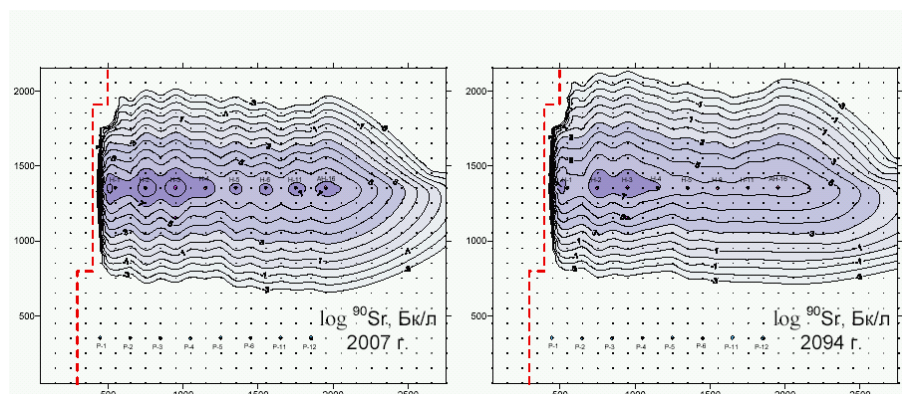


Рисунок 1.5 – Прогнозы миграции ^{90}Sr , полученные в [50]

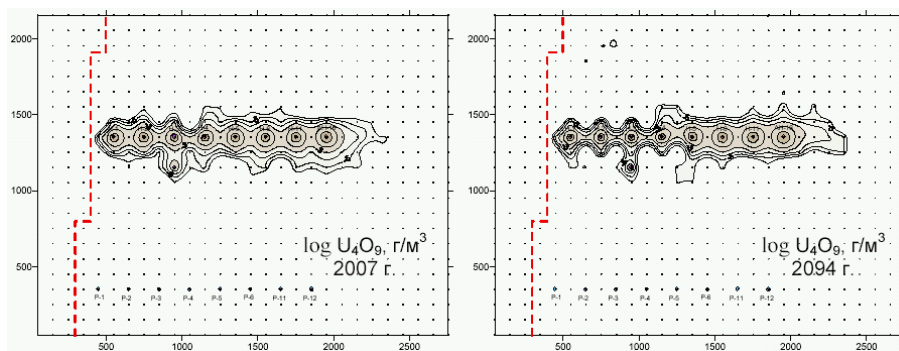


Рисунок 1.6 – Прогнозы миграции U_4O_9 , полученные в [50]

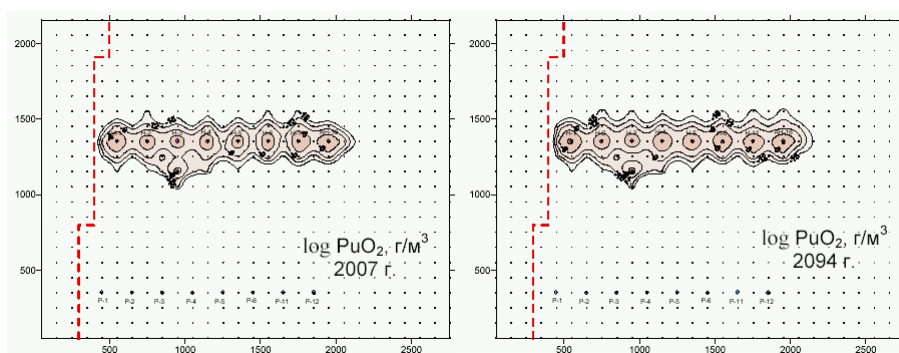


Рисунок 1.7 – Прогнозы миграции PuO_2 , полученные в [50]

В этой работе также была разработана трёхмерная «основная», как её называют авторы, модель – полная модель. Размеры модели выбирались на основе анализа возможного распространения компонентов в закачиваемых ЖРО, исходя из имеющихся представлений о геолого-гидрогеологическом строении полигона, рельефа местности, режимных наблюдений и наличия естественных границ фильтрационного потока, которыми служили наиболее крупные водотоки, водоразделы и тектонические нарушения. В принятом варианте они составили $5600 \times 6200 \times 520$ м. Дискретизация модели потребовала $56 \times 62 \times 26 = 90272$ блоков, размерами $100 \times 100 \times 20$ м, соответственно. Тектоническое нарушение принято слабопроницаемым, хотя коэффициент фильтрации составлял $0,001$ м/сут, что не является низким значением.

В этой модели было принято осреднение данных, характеризующих закачку и откачку. Поэтому авторы говорят о невозможности сопоставления напоров, а качество модели проверяют по сопоставлению данных, характеризующих состав вод.

Остановимся на выводах из этих исследований [50].

1. Массоперенос актиноидов и других радионуклидов в подземных водах и породах объясняется химическими реакциями растворения-осаждения их окисных и гидроокисных минералов и дисперсией, тогда как сорбция и ионный обмен влияют на него незначительно.

2. Наиболее опасным направлением распространения отходов на современном этапе и после остановки полигона является восточное, а не северное, как предполагается в проектных документах и большинстве публикаций.

3. Для нитратов снижение концентрации по мере удаления от нагнетательных скважин связано с разбавлением; долгоживущие изотопы высаживаются в виде окисей и гидроокисей, далее переносятся путём переосаждения.

Существенным недостатком данной модели является необоснованность границ расчетной области и отсутствие какой-либо калибровки по напорам или сопоставления натуральных и модельных напоров.

Наиболее развитой из ранее применявшихся моделей полигона «Северный» является модель, реализованная специалистами «ВНИПИпромтехнологии» в 2010 г. [52] (далее, для удобства, будем называть эту модель – модель «ВНИПИпромтехнологии»). Модель трёхмерная, при разработке было принято допущение, что всю толщу пород, заполняющих Тельскую впадину, можно разделить на слои, соответствующие основным геологическим подразделениям с осредненными по каждому слою фильтрационными и миграционными свойствами (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Вертикальная дискретизация модели ПГЗ ЖРО полигон «Северный», принятая в [52]

Слой	Горизонт	Горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут	Вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут	Эффективная пористость
1 безнапорный	Q	2	1	0,25
2 водоупор	Д	0,001	0,0005	0,3
3 напорный	III	0,26	0,26	0,3
4 водоупор	Г	0,001	0,0005	0,3
5 напорный	II	0,1 – 2,2	0,1 – 2,2	0,12
6 водоупор	Б+F+B	0,001	0,0001	0,3
7 напорный	I	0,3 – 1,6	0,3 – 1,6	0,07
8 водоупор	A	0,00001	0,0001	0,2

В модели «ВНИПИпромтехнологии» были учтены следующие процессы:

1) Нестационарная фильтрация. Горизонты закачки моделировались в напорной постановке.

2) Массоперенос отдельных компонент с учетом равновесной сорбции и распада.

В модели не учитывались тепловые процессы и плотностная конвекция.

Для расчетов были использованы программные коды MODFLOW и MT3DMS, реализованные с помощью препроцессора PMWIN. В качестве прогнозируемых показателей выбраны ^{90}Sr и нитраты. Наиболее опасный прогноз для радионуклидов был дан по миграции ^{90}Sr в горизонте I в коллоидной форме (без учета сорбции, рисунок 1.8). Прогнозные расчеты по нитратам без учета распада к 3000 году показали их распространение до р. Кан (за пределы модели), но в концентрациях ниже допустимых (рисунок 1.9).

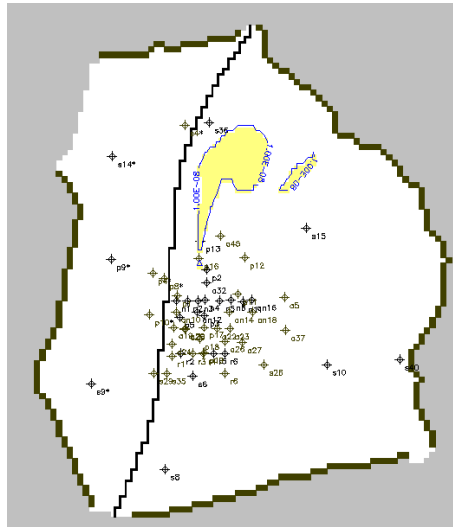


Рисунок 1.8 – Миграция компонентов отходов ^{90}Sr в I горизонте (слой 7) к 2571 году без учета сорбционной задержки, изолинии для минимальной активности – 10^{-8} Ки/л [52].

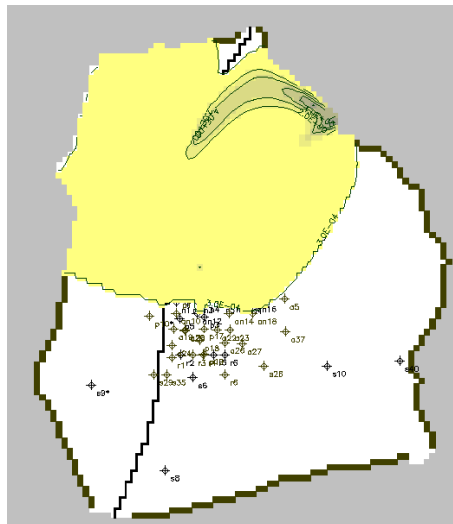


Рисунок 1.9 – Миграция компонентов отходов (нитраты) в I горизонте (слой 7) к 3021 году; изолинии для минимальной концентрации – 0,0003 г/л [52].

Последняя группа материалов, описанная в работе [52], была представлена на экспертизу в Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) при получении лицензии на использование недр. По итогам её рассмотрения были сформулированы следующие основные замечания:

1. Не приведено чёткое обоснование граничных условий.
2. Не все параметры модели имеют чёткое обоснование.
3. Не сопоставлены прогнозные контуры распространения отходов с фактическими контурами, достигнутыми на 2010 год.

1.2.2 Выводы по анализу предшествующих моделей

В работах [16, 52] представлены самые последние и самые совершенные материалы по моделированию полигона «Северный»; опыт и особенности всех предшествующих моделей будут учтены и переработаны при подготовке новой трехмерной модели данного ПГЗ ЖРО.

Книга А.И. Рыбальченко [16] представляет собой законченный и целостный труд по всем трем объектам захоронения ЖРО нашей страны, впервые давший развернутую информацию по ранее закрытым технологиям и закрытым объектам. Модель «ВНИПИпромтехнологии» [52] самая совершенная из предшествующих моделей ПГЗ ЖРО полигона «Северный». Однако, несмотря на наличие данной книги и наличия трехмерной модели полигона, – замечания миссии МАГАТЭ к данному объекту имели место быть, и в будущем предстоит уверенно ликвидировать пробелы по этим позициям.

Невозможность развития модели в рамках одного зарубежного кода с учетом всех подлежащих к моделированию процессов, согласно [19], – одна из причин создания нового программного средства вкупе с новой моделью объекта и с учетом прогресса вычислительной техники и наличия суперкомпьютеров и новых мощностей. Модель «ВНИПИпромтехнологии» реализована с помощью программ MODFLOW и MT3DMS, в рамках которых усовершенствование модели не представляется возможным. Данное обстоятельство является веской причиной для создания новой модели, развитие которой в будущем должно иметь место в связи с анализом тех или иных процессов, протекающих на данной территории, с новыми данными и новыми знаниями, в связи с возможностью доработки ПС, на основе которого модель создана. Также стоит отметить, что в силу внесения изменений в статью 26 «Разрешения (лицензии) на право ведения работ в области использования атомной энергии» ФЗ № 170 «Об использовании атомной энергии» для обоснования безопасности в настоящее время необходимо пользоваться только аттестованными ПС, что является требованием, игнорировать которое невозможно.

Стоит отметить, что скважинный мониторинг на территории размещения объекта ведется весьма регулярно, что дает оптимистичную надежду на возможность обширных сопоставлений по скважинам, что, в свою очередь, позволит качественно откалибровать модель по данным натурных измерений и обосновать модельные параметры. В скважинах ведется достаточно регулярный контроль уровней вод в пластах-коллекторах и буферном горизонте и активностей химических компонент, правда, с переменной регулярностью. Наиболее регулярный контроль химических компонент отмечается по несорбируемому нитрат-иону и ^{90}Sr . Несорбируемый нитрат-ион является основным маркером экологической безопасности, в том числе долгосрочной безопасности. В дальнейшем два этих компонента будут взяты для калибровки миграционной модели полигона «Северный».

2 Исходные данные для формирования модели объекта

2.1 Анализ природных условий местоположения объекта

Полигон «Северный» – объект ядерной техники, предназначенный для захоронения жидких РАО в глубокозалегающие пласты-коллекторы. Захоронение осуществляется путем контролируемой закачки ЖРО через систему нагнетательных скважин в два водоносных горизонта, характеризующихся застойным характером водообмена, изолированных от вышележащих водоносных горизонтов и поверхности земли водонепроницаемыми породами. Отходы поступают к нагнетательным скважинам по трубопроводам высокого давления. Управление работой нагнетательных скважин осуществляется путем изменения расхода и давления на устьевой задвижке. ПГЗ ЖРО оборудован системами разгрузочных (для снижения пластового давления и выравнивания контура отходов) и наблюдательных скважин. Наблюдательные скважины используются для контроля содержания и распространения радионуклидов в поглощающих и вышележащих водоносных горизонтах [53].

2.1.1 Географические условия

Полигон закачки находится на правом берегу реки Енисей на водоразделе рек Енисей и Большая Тель. Ближайшие населенные пункты: г. Железногорск (22 км), село Атаманово (6 км на левом берегу реки Енисей), поселок Шивера (15 км на юго-запад) и село Большой Балчуг (6 км на север).

Площадка полигона расположена на территории промплощадки ФГУП «ГХК». Для эксплуатации полигона выделен участок недр, имеющий статус горного отвода. Горный отвод по поверхности ограничен контуром прямых линий площадью 44,9 км², а по глубине отметкой 562 м.

2.1.2 Гидрография

Полигон расположен в бассейне р. Енисей. В радиусе 30-ти км от объекта насчитывается 49 рек, включая участки больших и средних рек – Енисея, Кана. Суммарная протяженность всех рек в районе размещения промплощадки составляет 1704 км, средняя густота речной сети – 0,6 км/км². Рельеф местности обеспечивает хороший дренаж и глубокую инфильтрацию атмосферных осадков, минимизирует развитие болотных процессов, «сухость» водораздельных пространств. Вся речная сеть учтена в модели. Рельеф местности, а также знания о характере растительности, об экспозиции склонов и об углах наклона склонов пригодны для создания неоднородной карты инфильтрационного питания, являющегося верхней границей разработанной модели (раздел 2.3).

Ширина основного русла Енисея вблизи площадки составляет 500-1800 м, глубина 3-7 м, скорость течения 1,5 м/сек. Притоки, стекающие с Енисейского кряжа, имеют ширину до 30 м,

глубину 0,3-1,5 м, скорость течения 1,5-1,0 м/сек. и, как правило, песчано-галечниковое дно. Отметка уровня воды в реке в районе водозаборных сооружений ФГУП «ГХК» составляет 121,04 м.

Река Кан в своем нижнем течении имеет долину шириной 6-9 км. На участке прорыва через Енисейский кряж протяжением около 140 км Кан течет по дну глубокого ущелья, где скорость течения достигает 3-4 м/сек. На равнинной части реки русло очень извилистое, на реке много галечниковых перекатов и наносных островов, в пойме много озер и стариц. Берега, большей частью, обрывистые высотой 2-15 м. Скорость течения 1 м/сек. Притоки Кана на отрезке, примыкающем к Енисейскому кряжу, имеют преимущественно крутые берега, ширину до 30 м, глубину до 2 м, скорость течения до 1,5 м/сек, песчано-галечниковое дно.

Реки Енисей и Кан – естественные границы модели – границы третьего рода (река Кан является местом разгрузки I пласта-коллектора). Приток р. Енисей – р. Большая Тель – также является границей третьего рода, учтена в модели, и является местом разгрузки II пласта-коллектора. Абсолютные отметки уровней в реках и знания о донных отложениях позволят уверенно задать границы и откалибровать модель по фактическим данным (раздел 2.3).

Питание рек преимущественно снеговое. Выделяются: высокое и продолжительное весенне-летнее половодье, период летне-осенних дождевых паводков, осенне-зимняя межень.

Начало половодья – первая декада мая. Вскрытие рек – в конце апреля – начале мая, ледоход длится 10-15 дней и на некоторых участках сопровождается заторами льда. За время половодья по рекам проходит более половины годового стока. Продолжительность половодья от 40 до 60 дней. Пик половодья – во второй половине мая – начале июня. Летом и осенью наблюдаются дождевые паводки.

2.1.3 Геологическое строение

Полигон находится в средней части провала, образованного двумя крупными тектоническими нарушениями в доюрский период. Территория полигона с запада примыкает к Правобережному тектоническому нарушению (ПТН), другое тектоническое нарушение расположено на восток за пределами области влияния захоронения. ПТН представляет собой непроницаемую границу, являющуюся дополнительным барьером в модели – отделяет зону закачки от р. Енисей. Калибровка коэффициента фильтрации локального разлома вкупе с верификацией модели позволит подтвердить этот тезис, сформулированный в ходе выполнения полевых гидрогеологических исследований, проведенных еще до создания объекта закачки ЖРО [54].

Правобережное тектоническое нарушение в южной и средней областях имеет линейный характер и субмеридиональное направление. Оно представляет собой крутопадающий на восток сброс, который нарушает западную часть Тельской впадины, с различной вертикальной

амплитудой смещения от 40 до 306 м. По плоскости зоны нарушения повсеместно контактируют разновозрастные породы. Проведенные исследования указывают, что заглинизированная плоскость тектонического нарушения фактически представляет собой водоупорный экран [54].

В геологическом разрезе региона выделяются два структурных этажа: нижний – фундамент, сложенный кристаллическими породами докембрия (AR-PR), и верхний – осадочный чехол, представленный отложениями поздне триасового, юрского и четвертичного возраста.

Фундамент района имеет четко выраженную асимметричную впадину (Тельская впадина). Впадина характеризуется крутым западным и пологим восточным склонами и уклоном на север под углами 2-5°. На северо-востоке, юге и юго-западе впадина заканчивается выходами кристаллических пород фундамента на дневную поверхность, кое-где локально перекрытых слоем коры выветривания и четвертичными отложениями. ПГЗ ЖРО расположен в центральной части впадины, характеризующейся наибольшей мощностью осадочной толщи (до 480 м). Выходы коренных пород фундамента на поверхность будут служить в модели непроницаемыми границами.

Юрская система представлена толщей переслаивающихся песчаных и глинистых отложений. Песчаные горизонты (среднезернистые пески и слабосцементированные песчаники), разделяются мощными и протяженными слоями различного типа глин (с линзовидными прослоями песков, подчиненного значения): аргиллитоподобных, углистых, известковистых, жирных, алевролитами и алевролитами. Такое строение позволяет условно разделить Юрскую толщу на водоносные (обозначаются римскими цифрами – I (глубина залегания 355-500 м), II (глубина залегания 180-280 м) и III (глубина залегания 50-100 м)) и водоупорные (обозначаются буквами – А, Б, В, Г) горизонты. Мощность отдельных слоев уменьшается от центральных, наиболее погруженных частей впадины к периферии. Таким образом, в модели, согласно геологическому строению, будут выделены 10 слоев (сверху вниз): Q (слой отложений четвертичного периода), Д, Ш, Г, Ц, В, F, Б, I, А.

В нижний водоносный горизонт (I), расположенный на фундаменте и грубообломочных песках слоя А, производится закачка САО. Этот горизонт представлен средне- и мелкозернистым песчаным материалом, его мощность 10 – 100 м. Он перекрывается аргилитовыми глинами горизонта Б мощностью 25 – 70 м. Усиливают перекрытие слой гравелистых песков горизонта Б, зеленые и серо-зеленые аргиллитоподобные жирные глины (слой F мощности от 20-25 м в центре до 10 м на периферии), а выше глинистые отложения с маломощными прослоями песков, песчаников и алевролитов, мощностью 40-75 м (слой «В»).

Выше расположена мощная (до 95 м) песчаная толща (пласт-коллектор II), которая используется для захоронения низкоактивных отходов. Пласт-коллектор II неоднороден по вертикали: его нижняя часть (30-40 м) представлена кварц-полевошпатовыми слабосцементированными песками с прослоями (0,5-5 м) глин, выше залегает пласт сильно углистых глин (25 м), который перекрывается песками, сменяющимися алевролитами и глинами (30-35 м). Верхний водоупор сложен из глин (слой «Г», мощностью до 50 м).

Верхняя часть разреза представлена слабосцементированными (рыхлыми) песками (горизонт III, максимальная мощность 31 м) и глинами (слой Д, максимальная мощность 45 м) повсеместно перекрытыми четвертичными образованиями. Отложения слоев III и Д сосредоточены в наиболее погруженных частях впадины (центральной и северо-восточной).

В основании четвертичных отложений, завершающих геологический разрез, залегают галечники (10-15 м), состоящие из хорошо окатанных обломков кварца и кремнистых пород. Они перекрываются лессовидными суглинками (15-20 м) и супесями (до 15 м).

Вышеописанный литологический состав геологических слоев, учтенных в модели, позволит обосновать и откалибровать по фактическим данным фильтрационные и емкостные параметры модели.

Ближайший водозабор подземных вод расположен в ~ 30 км от захоронения в отличающихся гидрогеологических условиях, соответственно, такие данные для учета в модели не требуются.

Разрез каждого горизонта осадочных пород характеризуется постепенным переходом по вертикали гравийно-песчаных отложений в глинистые отложения. Это характерно для синклинали залегания слоев с мощностью, изменяющейся по площади. Большая мощность отдельных слоев характерна для зоны наиболее глубокого залегания фундамента впадины. Благодаря пластичности глин осадочного чехла на отдельных участках района произошли изгибы слоев без разрыва сплошности.

2.1.4 Гидрогеологические условия

Подземные воды присутствуют в зоне выветривания метаморфических пород фундамента и проницаемых горизонтах осадочного чехла. Непосредственно в зоне тектонического нарушения сплошность водоносных горизонтов нарушается, а водоупорные слои пластичных глин вытягиваются по плоскости нарушения без разрыва сплошности и разобщают водоносные горизонты опущенного и поднятого блоков (рисунок 2.1). Анализ имеющихся данных дает основание утверждать об отсутствии фильтрационных «окон» и подтверждает непроницаемость Правобережного тектонического нарушения.

В рассматриваемом районе выделено 4 водоносных горизонта.

Водонасыщенные толщи пород, расположенные справа и слева от зоны Правобережного нарушения, представляют собой отдельные гидравлические системы. Потоки подземных вод в опущенном блоке направлены преимущественно с юга на север и северо-восток, а в поднятом блоке – с северо-востока на юго-запад и с юга на запад. В пределах опущенного блока поток подземных вод горизонта II характеризуется скоростью движения 10-15 м/год и разгружается в долине р. Б. Тель [55]. Поток подземных вод горизонта I опущенного блока характеризуется скоростью движения 5-6 м/год, и разгружается в водосбор р. Кан [16]. На поднятом блоке разгрузка подземных вод горизонта II осуществляется в р. Енисей, а движение потока в горизонте I направлено на запад за пределы рассматриваемой территории.

Знания о гидрогеологических условиях территории расположения объекта позволят выделить на модели в пределах опущенного блока три водоносных горизонта – I, II и III. Первые два – горизонты закачки РАО, III горизонт – буферный. В пределах приподнятого блока присутствует только водоносный горизонт I.

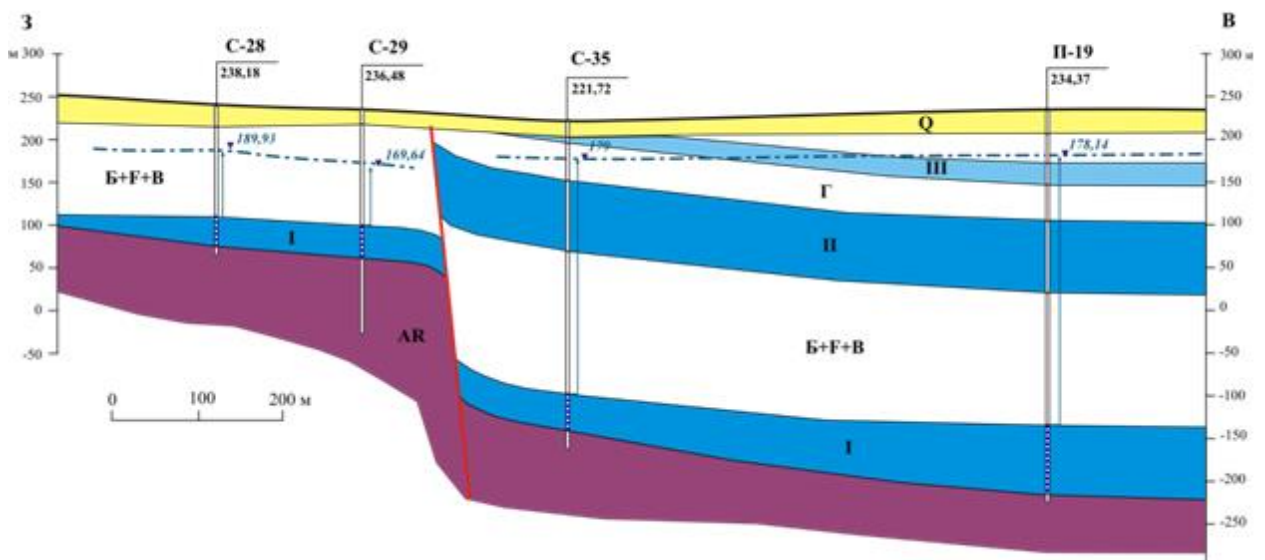


Рисунок 2.1 – Схематический вид геолого-гидрогеологического разреза с тектоническим нарушением

2.1.5 Типы захораниваемых отходов

В глубинное хранилище ЖРО полигон «Северный» удаляют несколько типов отходов, которые отличаются как по уровню активности, так и по составу макрокомпонентов. Реальные отходы могут быть слабокислыми (рН 2-3) или щелочными (от рН~10 до 15 г/л натриевой щелочи). Основной солевой фон составляет нитрат натрия (до 250 г/л). Кроме того, в кислых отходах содержатся продукты коррозии конструкционных материалов (Fe, Cr, Mn, Ni, в сумме до 5 г/л), а в щелочных отходах присутствует алюминий – основной техногенный катион.

2.1.6 Режимы захоронения отходов

В пласт-коллектор I горизонта осуществляется захоронение САО и ВАО. Захоронение САО в щелочной среде осуществляется при давлении нагнетания до 1,2 МПа. Максимальный расход нагнетания не превышал $\sim 300 \text{ м}^3/\text{сут}$ ($110 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$) [16]. Захоронение ВАО осуществлялось с 1972 г. этапами 1-2 раза в год и реже; объем закачки на каждом этапе составлял 1-2 тыс. м^3 [45]. Перед нагнетанием ВАО проводится предварительная подготовка пласта-коллектора путем нагнетания слабокислых растворов для снижения накопления нуклидов в ближней зоне нагнетательной скважины; после завершения закачки отходов скважина вторично обрабатывается слабокислым раствором. В последние десятилетия объемы закачки ВАО существенно сокращены, практически до нуля.

В пласт-коллектор II горизонта полигона «Северный» с 1968 г. осуществляется закачка НАО с расходом до $600 \text{ м}^3/\text{сутки}$ и при давлениях до 2 МПа [16].

2.2 Формирование перечня моделируемых процессов

Опираясь на разработанные предшествующие модели полигона «Северный», описанные в прошлой главе, на другие исследования ряда авторов [56-62] и, учитывая новые знания, появившиеся за время подготовки и анализа данных в ходе данного диссертационного исследования, целесообразно выделить следующие основные процессы, которые протекают на территории размещения ПГЗ ЖРО полигон «Северный», и которые подлежат рассмотрению и моделированию:

1. Нестационарная напорно-безнапорная фильтрация.
2. Адвективный дисперсионно-диффузионный массоперенос.
3. Двойная пористость геологической среды.
4. Радиоактивный распад.
5. Химические взаимодействия (процесс сорбции).
6. Плотностная конвекция.
7. Процесс нитрат-редукции.
8. Коллоидный перенос
9. Теплоперенос.

В данном перечне процессы с 6 по 9 перечислены в порядке важности оказания влияния на результат прогнозных расчетов, по мнению автора; соответственно, в процессе приоритета рассмотрения в будущем. Процессы с 1 по 5 подлежат обязательному учету и рассмотрению в первой версии модели – в данном диссертационном исследовании.

Трехмерная модель создавалась с помощью аттестованного расчетного кода GeRa/V1 [29-31].

Ниже приведены и описаны математические модели основных моделируемых процессов.

2.2.1 Математическая модель напорно-безнапорной фильтрации

В расчетном коде GeRa/V1 используется модель фильтрации в напорно-безнапорном режиме с учетом водообмена между грунтовыми водами и поверхностными водоемами [63], основанная на уравнении Ричардса:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + S \cdot s_{stor} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} - \nabla \cdot (K(\theta) \nabla (\psi + z)) = Q, \quad (1)$$

где ψ – высота всасывания, [м], $\theta(\psi)$ – объемное влагосодержание, [-], $K(\psi)$ – коэффициент фильтрации, [м/сут], s_{stor} – коэффициент упругой емкости породы, [м⁻¹], Q – расходы нагнетательных и разгрузочных скважин [сут⁻¹], « ∇ » – градиент функции, « $\nabla \cdot$ » – дивергенция вектора.

Модель использует псевдоненасыщенный подход, близкий к подходам, применяемым в программных комплексах FEFLOW и MODFLOW [63-65].

Насыщенность S определяется по формуле:

$$S = \frac{\theta}{\varphi}, \quad (2)$$

где φ – пористость.

С другой стороны, уравнение (1) можно переписать в терминах приведенного напора h , который можно выразить через высоту всасывания ψ и высоту положения (вертикальную координату) z по формуле $h = \psi + z$:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + S \cdot s_{stor} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (K(h) \nabla h) = Q. \quad (3)$$

Далее в качестве главной переменной будет использоваться напор.

Достоинство модели, реализованной в GeRa/V1 [63] в том, что она требует гораздо меньше параметров по сравнению с моделями ненасыщенной фильтрации: выражения зависят от дискретизации по пространству, в отличие от моделей ненасыщенной фильтрации, где они зависят только от среды (функции могут меняться от ячейки к ячейке), а, предполагаемые гидрофизические свойства не имеют экспериментального обоснования и вводятся только как метод аппроксимации. Соответственно, необходимо уточнить, что относительная проницаемость в ненасыщенной зоне мала по сравнению с насыщенной, а также относительная проницаемость в ячейке меняется линейно от минимального значения (близкое к нулю влагосодержание) до максимального значения (полная насыщенность) с ростом уровня воды в ячейке.

В дополнение к уравнению Ричардса необходимы зависимости между влагосодержанием, высотой всасывания и относительной проницаемостью.

Зависимость влагосодержания $\theta_E(h_E)$ в ячейке E от приведенного напора h_E в этой ячейке определяется следующим образом:

$$\theta_E(h_E) = \begin{cases} \varphi & \text{при } h_E > h_{E,max}, \\ \varphi \frac{h_E - h_{E,min}}{h_{E,max} - h_{E,min}} & \text{при } h_{E,r} < h_E < h_{E,max}, \\ \alpha_\phi \varphi - \alpha_\theta (h_{E,r} - h_E) & \text{при } h_E < h_{E,r}. \end{cases} \quad (4)$$

$h_{E,max}$, $h_{E,min}$ – максимальная и минимальная вертикальные координаты точек в ячейке (верхняя и нижняя границы ячейки), φ – пористость породы, параметр $h_{E,r}$ определяется как величина, при которой влагосодержание, определяемое по формуле $\theta_E = \varphi \frac{h_E - h_{E,min}}{h_{E,max} - h_{E,min}}$ в условиях частичного насыщения, достигает величины $\alpha_\phi \varphi$, а именно

$$h_{E,r} = h_{E,min} + \alpha_\phi (h_{E,max} - h_{E,min}). \quad (5)$$

Таким образом, функция $\theta_E(h_E)$ имеет три линейных участка:

- при полном насыщении она тождественно равна пористости;
- при частичной насыщенности ячейки и условию $h_r < h < h_{max}$ она приближает отношение объема пор, занятых водой при заданном уровне грунтовых вод, к объему ячейки (для прямоугольных ячеек это приближение является точным, для иных ячеек – аппроксимацией);
- ниже порогового значения $\alpha_\phi \varphi$ влагосодержание предполагается медленно линейно убывающим с уменьшением h . Параметр α_ϕ должен выбираться достаточно малой величиной, гарантирующей неотрицательность $\theta(h)$, вычисляемой по формуле (4).

Для коэффициента фильтрации принято следующее выражение [63]:

$$K_E(h_E) = K_{E,r}(h_E) K_s. \quad (6)$$

где K_s – коэффициент фильтрации при полном насыщении, а относительная проницаемость $K_{E,r}(h_E)$ на ячейке E равна насыщенности в этой ячейке:

$$K_{E,r}(h_E) = S_E(h_E). \quad (7)$$

В результате относительная проницаемость для насыщенной ячейки равна единице. При осушении ячейки относительная проницаемость убывает линейно до тех пор, пока $h_E \geq h_r$. Это – аппроксимация насыщенности как доля объема ячейки, заполненная водой. Когда $h_E < h_r$, функция $K_r(h_E)$ также линейна, но убывает медленно.

Таким образом, реализованная модель напорно-безнапорной фильтрации имеет 2 параметра $(\alpha_\phi, \alpha_\theta)$, которые должны быть заданы достаточно малыми величинами. При стремлении этих параметров к нулю получается модель, в которой течение происходит только в насыщенной зоне.

2.2.2 Математическая модель адвективно-дисперсионно-диффузионного переноса с сорбцией по линейной изотерме и радиоактивным распадом

Для моделирования переноса радионуклидов в растворе используется модель адвекции-диффузии-дисперсии с учетом сорбции и радиоактивного распада. Сорбция считается равновесной, моделируется по линейной изотерме (изотерме Генри), в которой коэффициент распределения K_d может зависеть от концентрации нитрат-иона (в частности, для стронция), либо быть постоянным. Математическая запись данной модели имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(\phi RC)}{\partial t} - \nabla \cdot D \nabla C + \nabla(\vec{u}C) + \lambda \phi RC = f \quad (8)$$

где использованы обозначения: R – фактор сорбционной задержки, [-]; ϕ – активная пористость, [-]; C – концентрация растворенного вещества (для каждой переносимой компоненты – свое уравнение вида (8)), [ML⁻³]; D – тензор диффузии-дисперсии, [L²T⁻¹]; \vec{u} – скорость фильтрации Дарси, [LT⁻¹]; λ – константа распада, [T⁻¹], связанная с периодом полураспада $t_{1/2}$ соотношением $\lambda = \ln 2/t_{1/2}$.

В правую часть входят скважины:

$$f = q_{well} C_{well}, \quad (9)$$

где q_{well} – расход скважины [L³T⁻¹]. Для концентрации в скважине берется ее значение из характеристик входного раствора в случае нагнетания, и концентрация в грунтовых водах в случае разгрузки:

$$C_{well} = \begin{cases} C & \text{при } q < 0, \\ C_{inj} & \text{при } q \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

Для учета сорбции используется модель равновесной обратимой сорбции по изотерме Генри (линейной): $c_0 = K_d C$, где c_0 – массовая концентрация в твердой фазе, C – объемная концентрация в жидкой фазе и K_d – коэффициент сорбционного распределения; в таком случае масса сорбированного вещества в единичном объеме составляет $\rho_s K_d (1-\phi) C$, а общая масса компоненты в этом объеме составляет $\phi \left(1 + \frac{1-\phi}{\phi} \rho_s K_d \right) C$, где ρ_s – плотность твердого вещества (без учета пор). Выражение, стоящее в скобках, называется фактором сорбционной

задержки, представляет собой отношение действительной скорости фильтрации потока к скорости миграции растворенного вещества с учетом обменных процессов между растворенным веществом и породами, и определяется из выражения:

$$R = \left(1 + \frac{1-\varphi}{\varphi} \rho_s K_d \right). \quad (11)$$

2.2.3 Модель переноса в среде с двойной пористостью

В модели переноса в среде с двойной пористостью учитывается наличие проточной (mobile – m) и непроточной (immobile – im) зон в породе. В расчетном коде GeRa/V1 использована так называемая модель сосредоточенной емкости [66, 67] при моделировании сред с двойной пористостью, в которой концентрация в непроточной зоне считается равновесной, то есть, динамика насыщения примесью непроточной зоны не учитывается. Решаемая система уравнений для насыщенной среды следующая:

$$\begin{cases} \varphi_m R_m \left(\frac{\partial C_m}{\partial t} + \lambda C_m \right) + \nabla(\bar{u} C_m) - \nabla D_m \nabla C_m + \zeta (C_m - C_{im}) = Q_s C_Q, \\ \varphi_{im} R_{im} \left(\frac{\partial C_{im}}{\partial t} + \lambda C_{im} \right) = \zeta (C_m - C_{im}), \end{cases} \quad (12)$$

где φ_m, φ_{im} – пористости проницаемой и непроницаемой зон соответственно [-]; \bar{u} – скорость фильтрации [$L T^{-1}$]; D_m – эффективный тензор диффузии-дисперсии в проточной зоне [$L^2 T^{-1}$]; C_m, C_{im} – концентрации примесей [ML^{-3}]; Q – объемные источники-стоки [$L^3 T^{-1}$]; C_Q – концентрация примеси в источнике-стоке [ML^{-3}], в случае стока равна C_m .

Факторы задержки [-], вычисляются по нижеследующим формулам:

$$R_m = 1 + \frac{\rho_b K d_m}{\varphi_m}, \quad (13)$$

$$R_{im} = 1 + \frac{\rho_b K d_{im}}{\varphi_{im}}; \quad (14)$$

где ρ_b – плотность породы [ML^{-3}]; $K d_m, K d_{im}$ – коэффициент распределения [$L^3 M^{-1}$];

λ – постоянная радиоактивного распада [T^{-1}]; ζ – коэффициент массообмена между проточной и непроточной зонами [T^{-1}].

В случае моделирования сред с переменной насыщенностью в GeRa/V1 возможно использование модели мобильно-немобильной жидкости (mobile-immobile water в работе [67]). В ней влагосодержание в непроточной области считается постоянным, а в проточной области

может меняться. Уравнения, описывающие модель, выглядят следующим образом (радиоактивного распада не учтен):

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_m}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = Q, \\ \frac{\partial (\theta_m C_m)}{\partial t} + \nabla (\vec{u} C_m) - \nabla \cdot D \nabla C_m + \zeta (C_m - C_{im}) = Q C_s, \\ \varphi_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \zeta (C_m - C_{im}). \end{cases} \quad (15)$$

В (15) θ_m – влагосодержание в проточной зоне [-], Q – объемные источники и стоки [T^{-1}].

Первое уравнение в (15) описывает фильтрацию в ненасыщенном или безнапорном режимах.

2.3 Уточнение границ области моделирования

Для региональной расчетной модели границы области проведены по рекам Енисей и Кан, определяющим разгрузку подземных вод, и участкам выхода кристаллических пород (рисунок 2.2). Реки Енисей и Кан являются мощными водотоками, совершенными по степени вскрытия для первого от поверхности четвертичного водоносного горизонта; заданы граничными условиями для всех геологических слоев выше пласта-коллектора I. Реки задавались граничным условием 3 рода: напор в обеих реках был задан равным 120 м, согласно отметке рельефа. Сопротивление ложа рек подбиралось в результате калибровки модели: реки Енисей – $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$, реки Кан – $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$. Участки выхода кристаллических пород в модели рассматриваются как непроницаемые и реализуются нулевым условием второго рода.

Через верхнюю границу реализуется связь модели с атмосферой (испарение и инфильтрационное питание) и внутренними водотоками и водоемами (реками, болотами и др.). Для задания верхней границы модели – земной поверхности – была построена цифровая карта рельефа на основе оцифровки карты масштаба 1:100 000.

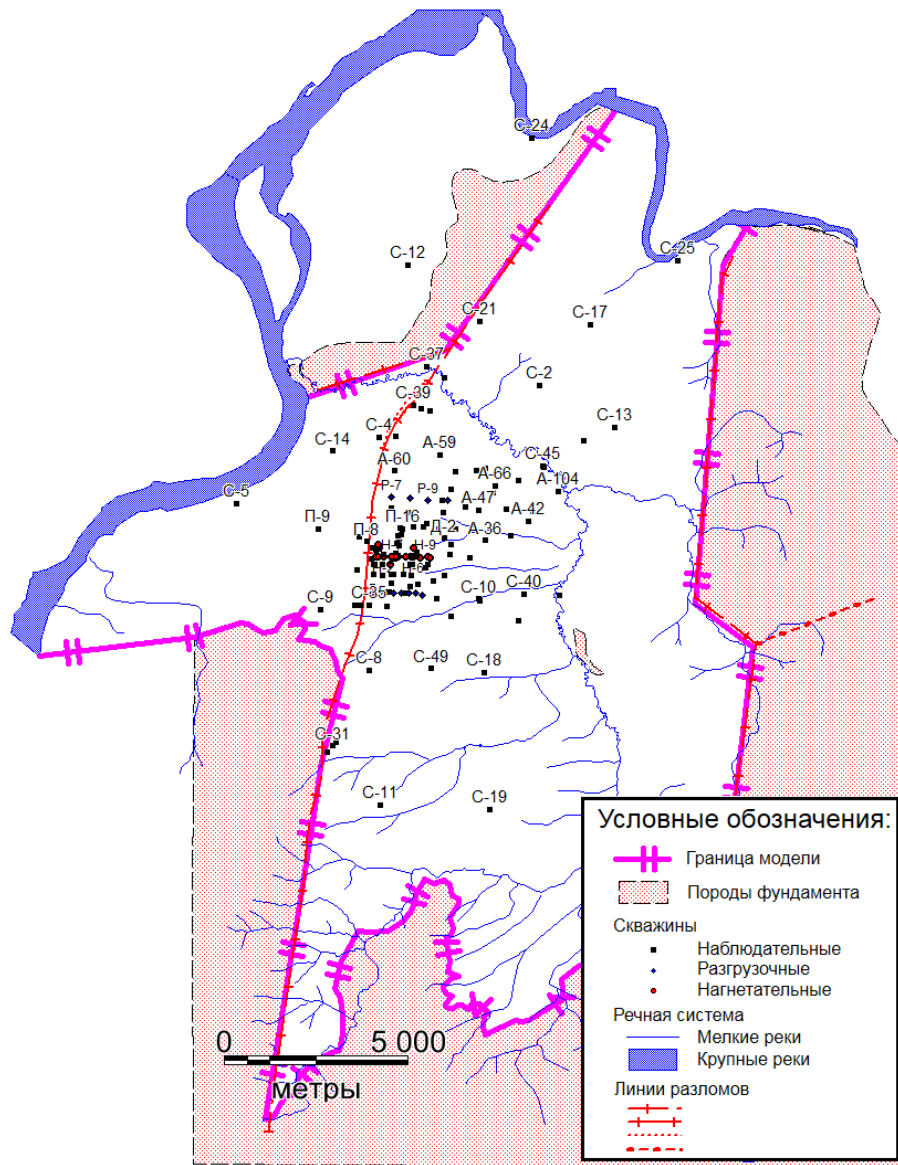


Рисунок 2.2 – Плановые границы расчетной модели

Трехмерное представление земной поверхности дано на рисунке 2.3.

Для оценки инфильтрации использовались материалы отчета по комплексным гидрогеологическим исследованиям, согласно которому величина подземного стока локального (р. Б. Тель) и глубинного (р. Кан и р. Енисей) оценивается как 89 мм/год или 0,00024 м/сут [68]. Однако эта величина является средней. В действительности же происходит существенное изменение инфильтрационного питания по площади. В работе [69] показано, что вариации инфильтрационного питания определяются экспозицией и углом наклона склонов, типом рельефа, породами, преимущественно слагающими зону аэрации, и растительностью.

Экспозиция склонов, полученная на основе цифровой модели рельефа, показана на рисунке 2.4. Углы наклона склонов, полученные на основе цифровой модели рельефа, приведены на рисунке 2.5.

Территорию рассматриваемого объекта можно считать залесенной. Строение зоны аэрации по данным геологических исследований [54, 68] можно принять как преимущественно суглинистое. Согласно результатам [69] в таких условиях определяющими, с точки зрения инфильтрационного питания, являются подножия склонов. Подножия склонов, выделенные на основе анализа рельефа местности, приведены на рисунке 2.6 [69].

В пределах подножий склонов инфильтрационное питание, согласно [69], определяют экспозиция и углы наклонов склонов. В таблице 2.1 приведены сведения о площадях участков подножий склонов с разной экспозицией и углами наклона. Данные о роли каждого участка в инфильтрационном питании взяты из работы [69].

Полученная в результате карта с распределенным инфильтрационным питанием, принятым в расчетной модели приведена на рисунке 2.7.

Инфильтрационное питание задается при моделировании граничным условием II рода с постоянным во времени расходом на отметке рельефа моделируемой области.

На верхней границе также присутствуют водотоки (реки), которые задаются в модели линейными объектами в соответствии с картой местности. На модели они описываются граничным условием III рода. На рисунке 2.8 представлены реки, включенные в расчетную модель. Для реализации этого условия вдоль поверхностных водоемов были заданы отметки уреза.

Нижней границей модели является уровень скальных пород, на которых сформировался пласт осадочных пород, нижние водоносные слои которого и являются пластами-коллекторами полигона «Северный». В качестве исходной информации для построения нижней границы модели были использованы данные о глубине залегания скальных пород из глубоких эксплуатационных и наблюдательных скважин, при бурении которых они и были достигнуты. На основе этих данных была проведена геостатистическая оценка нижней границы методами, описанными в [70]. В геофильтрационной модели эта граница предполагается непроницаемой и задается нулевым условием второго рода.

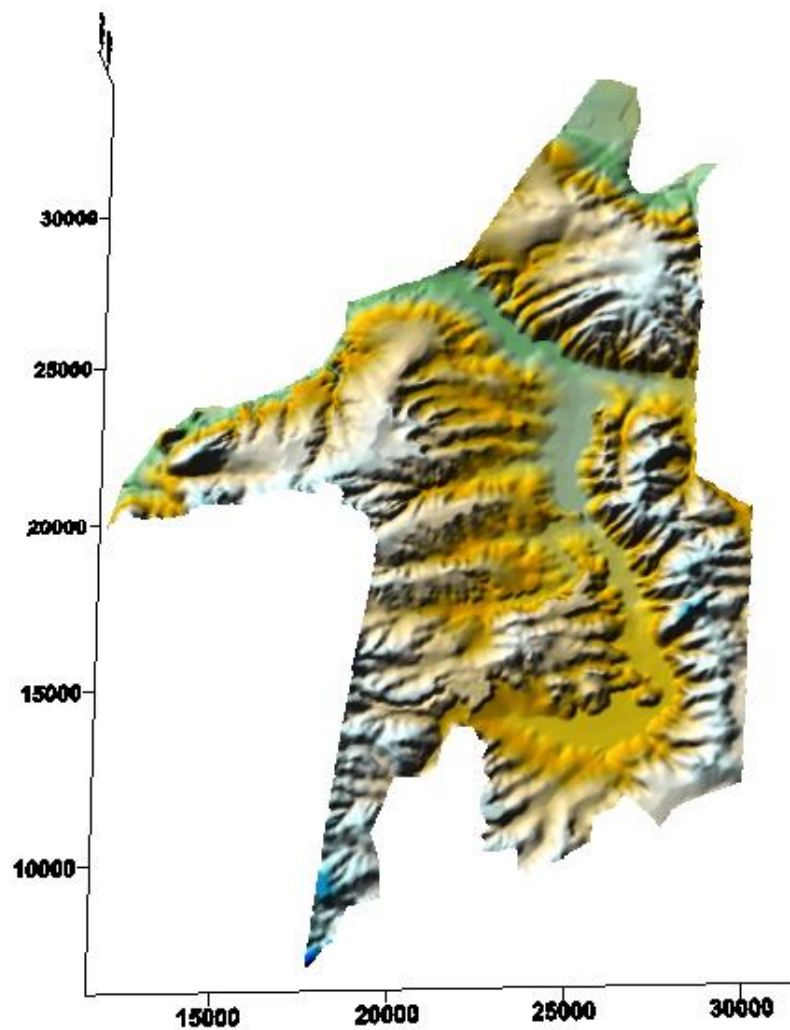


Рисунок 2.3 – Трехмерное представление рельефа в пределах моделируемой области

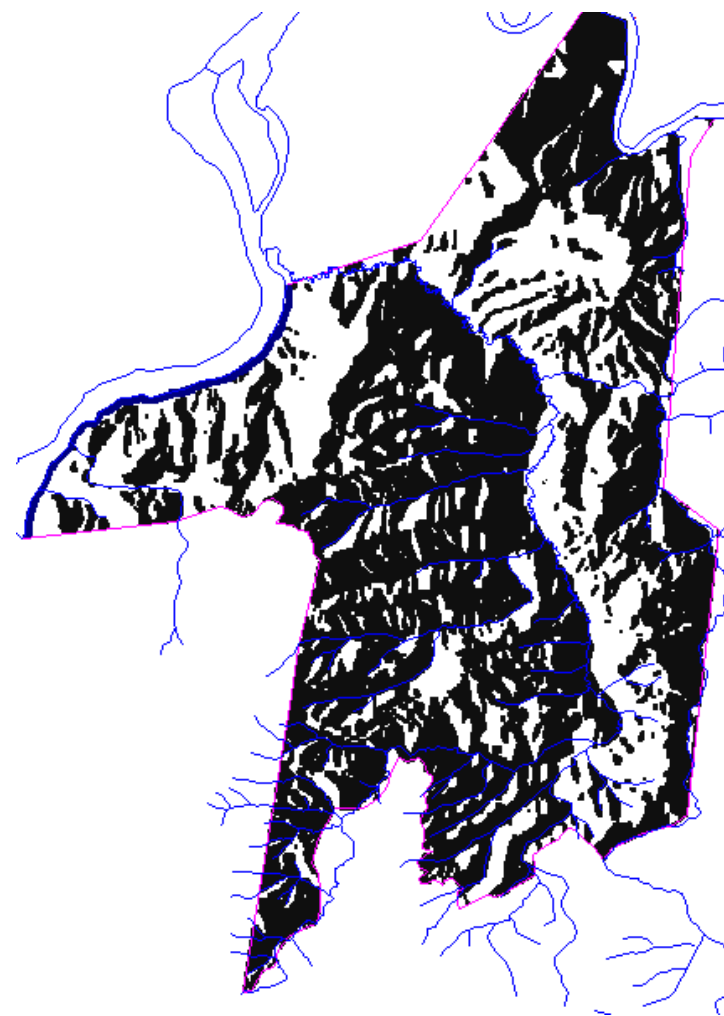


Рисунок 2.4 – Выделение преимущественно северных (черный цвет) и преимущественно южных (белый цвет) склонов на основе цифровой модели рельефа

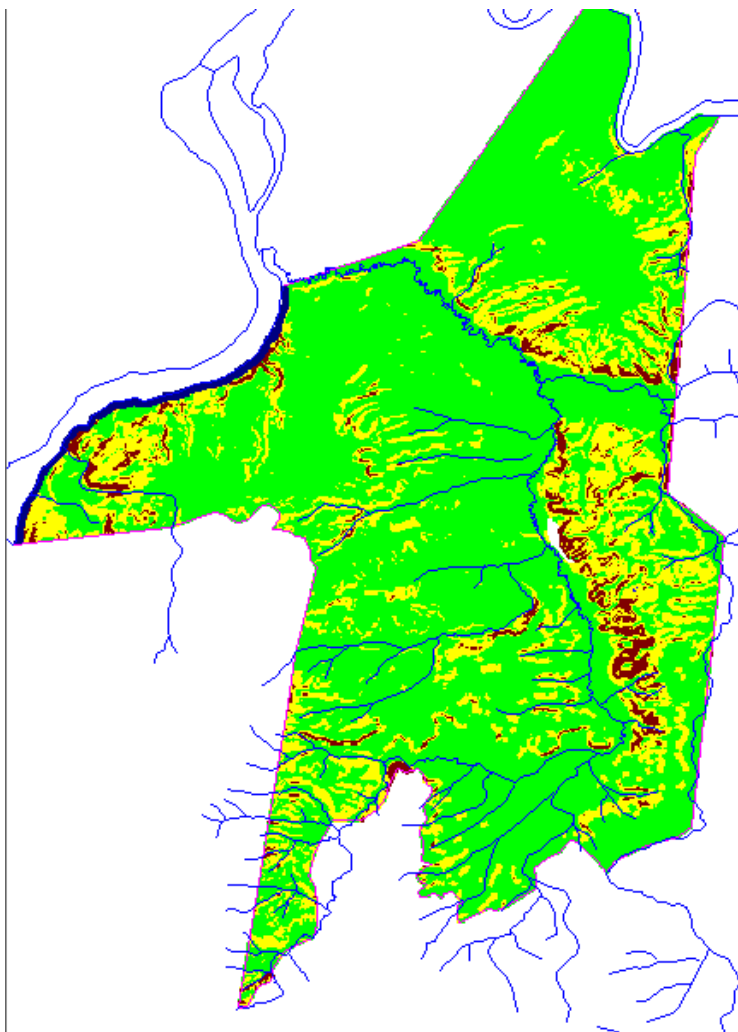


Рисунок 2.5 – Выделение рельефа с уклоном 0-5° (зеленый цвет), 5-10° (желтый цвет) и >10° (коричневый цвет) на основе цифровой модели рельефа

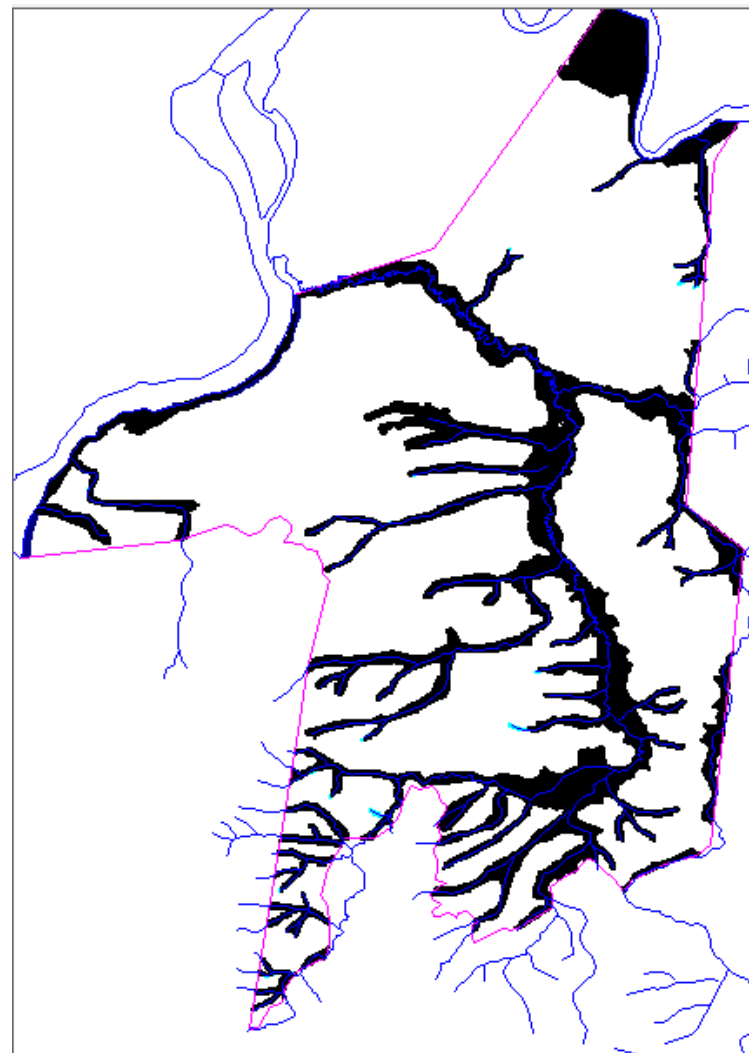


Рисунок 2.6 – Выделение подножий склонов (черный цвет) и остальных форм рельефа

Таблица 2.1 – Данные для обоснования площадного распределения инфильтрационного питания

Территория	Экспозиция	Угол наклона, градус	Доля в инфильтрационном питании	Площадь, км ²	Инфильтрационное питание, м/сут
Вся	–	–	–	236,8475	0,000243
Часть подножий склонов	северная	0-5	3,691	30,925	0,00117
Часть подножий склонов	северная	5-10	4,27	3,26	0,00135
Часть подножий склонов	южная	0-5	2,437	20,955	0,00077
Часть подножий склонов	южная	0-5	1,509	2,37	0,000477

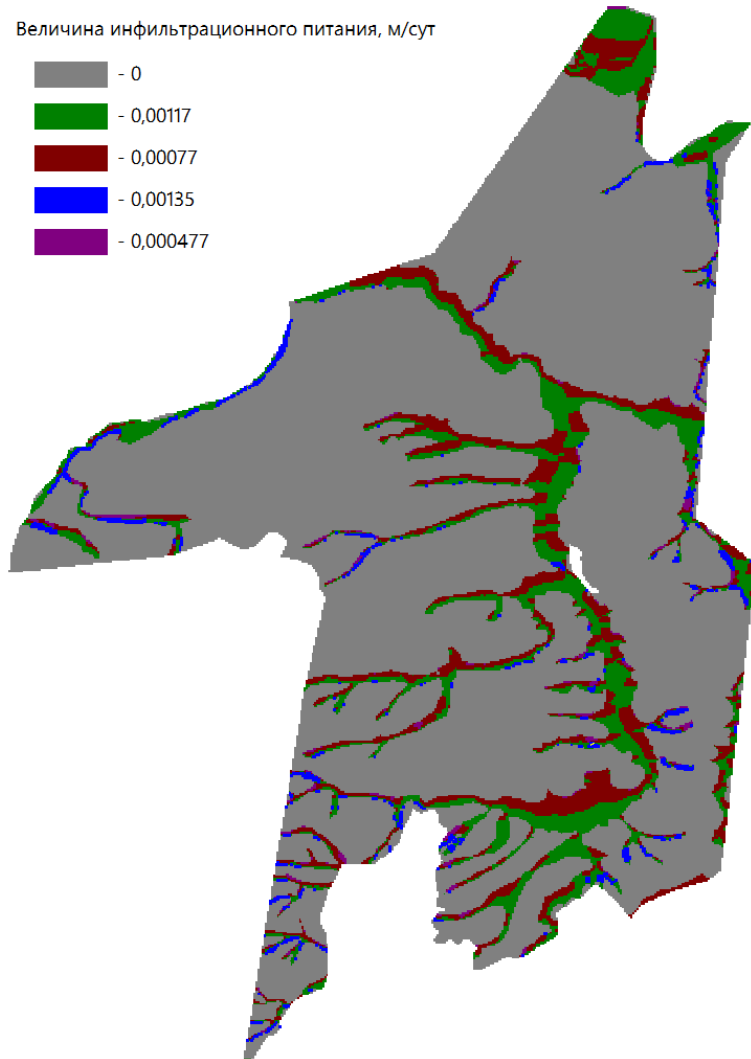


Рисунок 2.7 – Карта с распределенным инфильтрационным питанием, принятым в расчетной модели

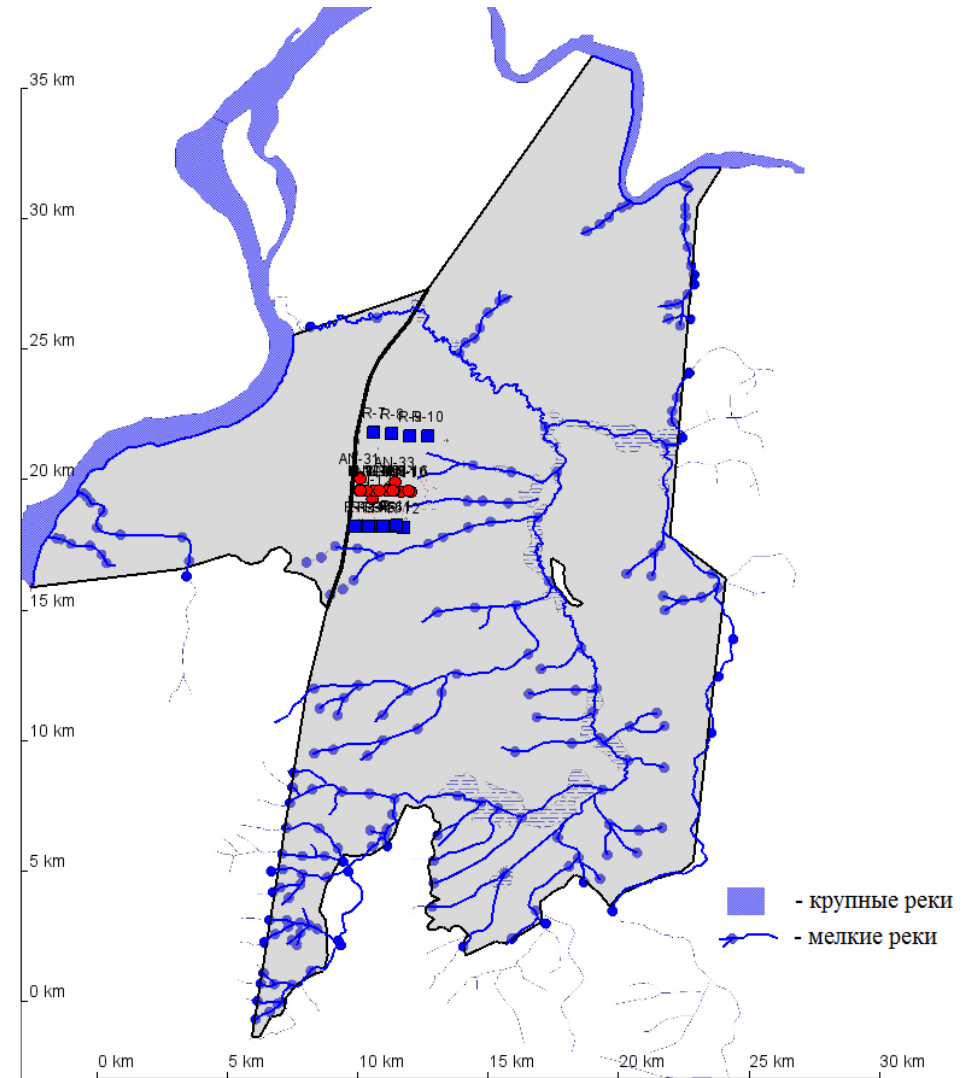


Рисунок 2.8 – Границы расчетной области

2.4 Систематизация данных мониторинга

На территории расположения полигона «Северный» проводился и проводится в настоящий момент обширный и регулярный мониторинг (в частности, это относится к замерам напоров подземных вод в скважинах, фильтры которых оборудованы на оба пласта-коллектора закачки, а также на буферный горизонт III). Однако существуют не вполне понятные единичные выпадения по напорам, как в меньшую, так и в большую сторону, но такие некачественные замеры не использовались при верификации разработанной модели (производилась их отбраковка). Что касается мониторинга распространения химических компонент, то эти данные весьма неоднозначны: вызывают недоумение частые отдельные замеры концентраций и активностей в скважинах, являющиеся резкими выпадениями при отсутствии предпосылок к таковым.

Все имеющиеся замеры, содержащиеся в 13 отчетах об эксплуатации полигона за разные годы [71], были собраны в единую базу данных, которая будет являться неотъемлемой частью будущего ПС, способная легко пополняться новыми данными в связи с продолжением ведения мониторинга на территории расположения объекта, а также послужит мощным инструментом для верификации разработанной модели. Ниже, в таблице 2.2 приведены названия тех компонент, данные по которым существуют и были загружены в базу данных (далее – БД).

Фактические данные учтены по 179 скважинам за период с 1967 г. по 2011 г. (таблица 2.3).

Таблица 2.2 – Компоненты, по которым присутствуют наблюдения в БД

Компонент	Описание
T	Температура
O	Кислород
Жестк	Жесткость воды
Аммон	Аммоний
Sr	Стронций-90
S04	Сульфат-ион
Ru	Рутений-106+рутений-103
Ph	ph-показатель
N03	Нитрат-ион
NaN03	Нитрат натрия
Na	Натрий
Min	Минерализация

Компонент	Описание
Mg	Магний
K	Калий
HCO ₃	Гидрокарбонат-ион
Fe	Железо
F	Фтор
Cs-134	Цезий-134
Co	Кобальт
Cl	Хлорид-ион
Ca	Кальций
Beta	Бета-активность
absH	Напор

Таблица 2.3 – Сведения об имеющихся фактических данных в базе данных

179 скважин	15 нагнетательных	данные по закачке ЖРО в два пласта-коллектора	
	12 разгрузочных	данные по откачке воды из скважин обоих пластов-коллекторов	
	152 наблюдательные	концентрация и активность 22 хим. компонент; напор подземных вод	около 400 000 строк с фактическими данными

2.5 Выводы к главе 2

В данном разделе приведен перечень и математические модели основных процессов, подлежащие моделированию в разрабатываемой трехмерной модели: напорно-безнапорная фильтрация, адвективно-диффузионный-дисперсионный массоперенос с учетом сорбции и радиоактивный распад. Данный набор процессов вкупе со сведениями о территории расположения полигона «Северный» позволит разработать трехмерную модель объекта, учесть геофильтрацию и геомиграцию в природной среде расположения объекта, откалибровать модель, и выполнить на ее основе эпигнозные и прогнозные расчеты.

Сбор, систематизация и анализ данных мониторинга позволили создать единую базу данных, которая в дальнейшем была использована для верификации модели.

Границы области моделирования существенно расширены по сравнению с предшествующими моделями объекта. Границы модели проведены по местам разгрузки подземных вод в естественные дрены – реки Енисей и Кан и по выходам коренных архейских пород на поверхность. В данной геологической схематизации архейские породы являются

водоупорными породами. Расширение границ модели до естественных дрен позволит проводить оценку дозовых нагрузок на население за счёт воздействия от ПГЗ ЖРО при водопользовании (в местах естественного потребления воды и нахождения у водоемов) для обоснованных сценариев, что раньше было невозможно ввиду ограниченности модельных областей.

На верхней границе модели реализовано неоднородное инфильтрационное питание, учитывающее экспозицию и угол наклона склонов, тип рельефа, породы, преимущественно слагающие зону аэрации, и растительность. Данный подход впервые применен для модели территории расположения полигона «Северный».

3 Разработка фильтрационной модели и модели массопереноса в среде с двойной пористостью

3.1 Особенности метода учета фильтрационной неоднородности по колонкам геологических скважин

Данный объект характеризуется сложным геологическим строением осадочного чехла. Согласно геологическому строению корректно выделять геологические горизонты песков, слагающих пласты-коллекторы, и горизонты глин, слагающих водоупорные слои, однако, согласно буровым колонкам существуют слабопроницаемые прослои внутри проницаемых горизонтов и хорошо проницаемые прослои внутри водоупорных толщ. Чтобы учесть этот «слоистый пирог» была построена модель пространственной фильтрационной неоднородности. Для этого была выполнена оцифровка данных бурения – колонок геологических скважин, представленных в паспортах скважин. Всего было оцифровано 107 скважин – тех, по которым имелись буровые колонки, и которые лежали внутри области моделирования.

Расположение скважин в плане показано на рисунке 2.2. Пример оцифровки отсканированной колонки буровой скважины показан на рисунке 3.1.

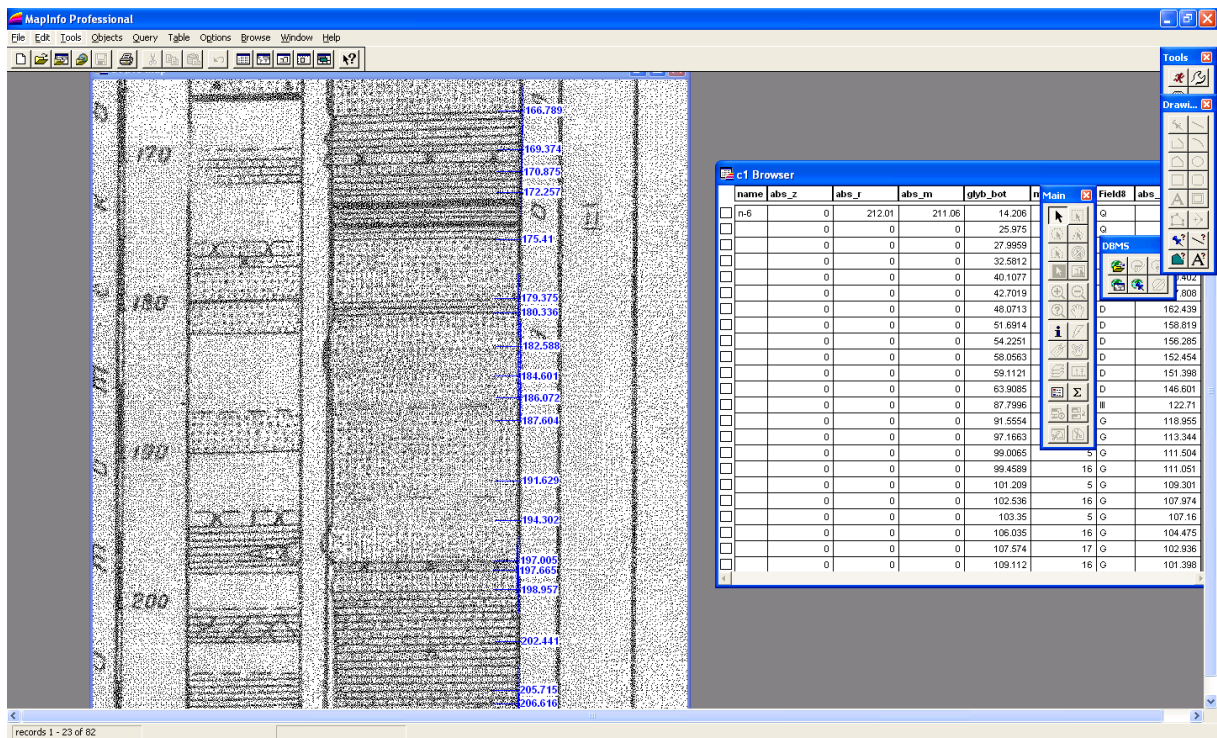


Рисунок 3.1 – Пример оцифровки разрезов скважин

Таблица с оцифрованными литологическими разностями (породами с близкими фильтрационными свойствами) была присоединена к базе данных объекта.

В ходе оцифровки было выделено 10 основных литологических разностей, определяющих фильтрационные свойства юрских отложений вблизи полигона «Северный» (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Выделенные, посредством оцифровки буровых колонок, литологические разности

Номер литологической разности	Литологический состав
1	супеси
2	суглинки
3	пески мелкозернистые и алевриты
4	пески среднезернистые и разноезернистые
5	пески крупнозернистые
6	гальки, щебни и конгломераты
7	пески и песчаники глинистые, алевролиты
8	глины
9	конгломераты, гравелиты, песчаники
10	угли

Для определения фильтрационных свойств каждой из литологических разностей были использованы данные 48 опытных откачек. Опытные откачки дают возможность достаточно достоверно определить водопроводимость T , которая в данном случае для скважины j равна:

$$T_j = \sum_{i=1}^M m_{i,j} k_i, \quad (16)$$

где M – количество литологических разностей в пределах водопримного интервала, m – мощность литологической разности, k – коэффициент фильтрации литологической разности. Значения мощностей литологических разностей и водопроводимостей для опытных скважин показаны в таблице 3.2.

Для каждого горизонта использовались лишь те скважины с откачками, которые соответствуют данному водоносному горизонту. Для I – 39 скважин с фактической водопроводимостью, определённой по откачке; для II – 25 скважин с фактической водопроводимостью, определённой по откачке. Для слабопроницаемых слоёв В, F, W (залегających между I и II горизонтами) использовались коэффициенты фильтрации литологических разностей I горизонта, для слабопроницаемого слоя G (залегającego между II и III горизонтами) использовались коэффициенты фильтрации литологических разностей II горизонта.

Среднее значение фактической проводимости для первого горизонта по всем скважинам – $42 \text{ м}^2/\text{сут}$, стандартное отклонение фактических значений проводимости от среднего значения для I горизонта составило – $30,4 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Среднее значение фактической проводимости для второго горизонта по всем скважинам – 24,3 м²/сут, стандартное отклонение фактических значений проводимости от среднего значения для II горизонта составило – 9,3 м²/сут.

Эти данные использовались для отбраковки тех фактических проводимостей на полигоне в двух горизонтах, которые «лежат» за стандартным отклонением от среднего значения. То есть, для первого горизонта не учитывались при калибровке те скважины, фактическая проводимость в которых выше 72 м²/сут и ниже 12 м²/сут, для второго горизонта не учитывались те скважины, фактическая проводимость в которых выше 34 м²/сут и ниже 15 м²/сут. Это сделано в связи с сомнениями в корректности значений фактической проводимости в некоторых скважинах. Так, например, вызывает сомнение значение 0,21 м²/сут для скважины А-5, 1,03 м²/сут для скважины С-33 или 107,8 м²/сут для скважины А-26 (все скважины на I горизонт). Возможно, эти значения справедливы, то есть, для скважины А-26 действительно фактическая проводимость является достоверной. Но, судя по буровой колонке, такое высокое значение могли дать литологические разности среднезернистых и мелкозернистых песков, которые в пределах I горизонта в этой скважине встречаются довольно часто. Видимо, это одна из локальных областей с крупными песками. Лишены логического обоснования низкие значения водопроницаемости в скважине А-5: в отложениях I горизонта в основном присутствует литологическая разность конгломератов, гравелитов и песчаников, которая должна была бы дать высокое значение водопроницаемости. Возможно, это просто ошибка расчёта водопроницаемости. В отложениях I горизонта скважины С-33 встречаются угли. Очевидно, именно они занизили значение водопроницаемости. Таким образом, общее число скважин для интерполяции по первому горизонту составило 29, для второго составило 19. Веса у всех скважин для обоих горизонтов были приняты равными единице.

Таблица 3.2 – Значения мощностей литологических разностей в водоприемных интервалах опытных скважин и проводимость, определённая по откачкам

Скважина	Номер литологической разности и её мощность, м										Водопроницаемость, м ² /сут
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Н-1				16,7	8,4			34,6	14,4	1,5	44,4
Н-2				22,9			2,6	44,9	10,3		42,1
Н-3				41,6			1,3	17,6	21,1		35,9
Н-4				31,5			12,4	25,6	11,2		40,3
Н-5			2,7	13,3			12,8	23,3	16,8		53,8
Н-6				26,7			2,3	30,5	1,9		54,2
Н-11				15,3			2,5	26,6	18,8		57,4
АН-10				34,0		3,1		46,3	8,0		22,3
АН-12				29,6		3,4	1,6	33,2	19,1		38,3
АН-14				21,5	3,9		4,9	23,0	8,1		40,1

Скважина	Номер литологической разности и её мощность, м										Водопроницаемость, м ² /сут
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
АН-16			9,7	7,6				19,9	13,9		65,7
П-1			10,3	24,7			1,8	28,2	8,0		8,2
П-2	29,3	3,2		5,5			12,2	23,2	7,1		12,0
П-3				45,8			9,8	16,7	4,8		15,2
П-4	42,4		1,3				1,4	20,3	1,6		26,4
П-8	3,6		10,8	19,8	3,0		7,3	29,4	1,0		42,8
П-11							25,6	17,3	25,3		15,0
П-12	6,6		7,3	9,0			20,2	16,3	3,5	2,2	5,0
П-16	51,1						10,5	21,8			15,6
Р-1				8,8	6,0			23,2	25,6		13,7
Р-2			9,3	16,4				26,5	17,1		26,2
Р-3				15,1	13,1			22,5	31,0		35,1
Р-4				37,6	4,0		9,1	18,4	15,3		88,5
Р-5				24,7		2,5	16,7	18,8	15,4	3,1	124,7
Р-6				40,8		4,2		20,0	21,0		126,5
Р-11				3,0				22,3	37,5	3,1	67,4
Р-12				13,6				29,7	18,6		42,6
А-5				11,7				8,2	33,5		0,2
А-19				20,0				27,1	26,0		23,2
А-23				15,9			15,5	26,3	21,2	0,7	63,2
А-24								29,3	37,7		7,6
А-25				31,9			1,8	35,6	5,0		35,4
А-26				33,7				17,6	15,8		107,8
А-27			0,9	22,1			2,0	18,5	23,3		68,0
А-37								23,1	34,2		39,5
П-9			2,7	16,4				12,0	5,0		45,7
П-17				35,4			14,9	23,7	4,9		36,3
П-18			1,5	41,2			1,7	21,5	8,7	0,6	77,7
П-19				38,4			2,1	27,3	12,2	0,5	41,3
С-11				3,6				19,4	16,8	0,5	43,7
С-31								25,4	16,3		4,0
С-33				30,1			6,4	20,2	11,9	1,7	1,0
С-39				6,2		8,7	6,1	8,9	24,8		44,1
Н-10			35,5					8,1			36,4
АН-31					27,8		11,4	9,2	1,3		14,1
АН-33				23,4			6,8	8,9	3,1		26,5
АН-34				15,8				10,2	12,9		11,5
Р-8			1,1	28,8			1,5	9,5			26,0
Р-9				16,5				18,8	5,7		40,1
А-11			5,7	29,3	5,4		17,3	29,0	7,0		22,8
А-18			3,1	17,0				16,5	5,4		11,5
А-39				14,7				21,3	17,4		20,6
А-40				19,9				17,4	5,6		41,6

Скважина	Номер литологической разности и её мощность, м										Водопроницаемость, м ² /сут
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
А-42				17,7				11,3	8,0	0,6	14,8
А-44				17,3			7,8	12,5	8,7	0,6	28,7
А-46			1,9	20,3	1,1			18,1	3,8		23,5
А-47			2,0	16,3			3,5	12,2	4,9		35,3
А-50			2,1	19,5				15,7	1,0		15,0
А-52				26,8				6,0	1,6		21,5
А-65			1,6	14,0			5,3	15,6	4,3		31,3
А-66			3,5	17,3			2,1	15,8	4,0		33,1
А-67				12,2			8,7	6,8	6,1		33,2
П-6			16,3	24,1			6,8	45,9			16,4
П-7			46,2	5,8				26,5	2,2	0,8	19,6
П-13			25,1	31,5				35,5	6,3	1,5	25,9
П-14			41,9					35,4	5,7		29,8
П-20				11,0			5,3	16,3			19,9
С-30				20,0				33,4	3,1	0,6	8,3
С-49				27,1				10,2	9,2		26,3

Известно, что проводимость (Т) горизонта равна сумме проводимостей отдельных его литологических разностей (прослоев), а проводимость отдельного прослоя – есть произведение коэффициента фильтрации (К) прослоя на мощность (m) прослоя. Таким образом, зная мощности литологических разностей в пределах слоёв I и II для скважин, по которым была проведена откачка, можно записать уравнение для каждой скважины следующим образом: сумма произведений коэффициентов фильтрации литологических разностей на мощность соответствующей разности есть проводимость, которая была определена по данным откачки. В пределах слоёв I и II встречаются литологические разности только с 1-ой по 10-ую. Коэффициенты фильтрации литологических разностей глин, суглинков и углей были взяты по литературным данным, то есть их поиск с помощью оптимизационного алгоритма не производился.

Значения коэффициентов фильтрации литологических разностей были найдены с помощью оптимизационного алгоритма PEST [72] на основе переопределённой системы уравнений, соответствующей данным из таблицы 3.2 (количество уравнений 48, неизвестных 10), добиваясь минимума функционала:

$$\sum_{j=1}^N (T_j - T_{\phi j})^2 = \min \quad (17)$$

где T_j – водопроницаемость для скважины j, рассчитанная согласно (16), $T_{\phi j}$ – фактическое значение водопроницаемости для той же скважины.

Оптимизация фильтрационных параметров проводилась с ограничениями. Ограничения приведены в таблице 3.3.

В результате проведения оптимизации были получены значения коэффициентов фильтрации литологических разностей (таблица 3.4).

Таблица 3.3 – Диапазоны оптимизационного варьирования коэффициентов фильтрации литологических разностей для алгоритма PEST

№ литологической разности	Описание слагающих пород	K min, м/сут	K max, м/сут
1	супеси	0,05	0,8
3	пески мелкозернистые и алевриты	0,1	1
4	пески среднезернистые и разноезернистые	0,5	2
5	пески крупнозернистые	1	5
6	гальки, щебни и конгломераты	1	5
7	пески и песчаники глинистые, алевролиты	0,1	1
9	конгломераты, гравелиты, песчаники	0,1	1

Таблица 3.4 – Значения коэффициентов фильтрации литологических разностей, которые были определены с помощью оптимизационного алгоритма PEST [72]

№ литологической разности	Описание слагающих пород	Коэффициент фильтрации, м/сут	
		I горизонт	II горизонт
1	супеси	0,22	0,36
2	суглинки	0,005	0,005
3	пески мелкозернистые и алевриты	0,91	0,86
4	пески среднезернистые и разноезернистые	0,58	0,5
5	пески крупнозернистые	2,26	1
6	гальки, щебни и конгломераты	1	1,96
7	пески и песчаники глинистые, алевролиты	1	0,54

8	глины	0,00001	0,00001
9	конгломераты, гравелиты, песчаники	1	0,51
10	угли	0,0001	0,0001

После того, как параметры литологических разностей были определены, для точек (скважин), где известен разрез (то есть для тех скважин, колонки по которым имелись в распоряжении), были оценены эффективные параметры коэффициентов фильтрации. В отличие от коэффициентов фильтрации литологических разностей, которые не зависят от направления, эффективные коэффициенты фильтрации могут различаться при фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях. Расчет эффективных коэффициентов фильтрации модельных слоёв в вертикальном направлении и в горизонтальном направлении для каждой j -ой скважины проводился по формулам:

$$k_h = \frac{\sum_{i=1}^M k_i m_i}{\Delta z}, \quad k_v = \frac{\Delta z}{\sum_{i=1}^M \frac{m_i}{k_i}}, \quad \Delta z = \sum_{i=1}^M m_i \quad (18)$$

где M – число литологических разностей, Δz – общая мощность слоя, k_h – эффективный коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении, рассчитывается как среднее значение по высоте, k_v – эффективный коэффициент фильтрации в вертикальном направлении, рассчитывается как среднее гармоническое по высоте.

В том случае, если для скважины значение водопроницаемости было известно по данным опытных работ, значение эффективного коэффициента фильтрации в горизонтальном направлении принималось согласно:

$$k_h = \frac{T_\phi}{\Delta z} \quad (19)$$

Далее данные по скважинам были проинтерполированы для получения неоднородных коэффициентов фильтрации в вертикальном и горизонтальном направлениях [73]. На рисунке 3.2 приведен пример неоднородного коэффициента фильтрации в горизонтальном и в вертикальном направлениях для верхнего пласта-коллектора II; также на этом рисунке хорошо видна зона однородного коэффициента фильтрации. Данная зона присутствует помимо II эксплуатационного горизонта и в слабопроницаемых слоях В, Ф, Б, разделяющих два эксплуатационных горизонта. Граница этой области соответствует границе распространения слоя Г (слой, перекрывающий II эксплуатационный горизонт). Слой Г является водоупорным и сложен глинами. В связи с этим вертикальные коэффициенты фильтрации в этой зоне для слоёв В, Ф, Б составляют 0,0001 м/сут, а для II горизонта – 0,0005 м/сут.

Для слабопроводящих пластов неоднородность может оказывать существенное влияние при образовании сквозных быстрых каналов, но такого рода явления на объекте были бы обнаружены мониторингом. Поэтому для разделяющих водоносные горизонты слабопроводящих пластов пространственной неоднородностью пренебрегается, и принимаются однородные параметры (исключая зону неоднородности в слоях В, F, Б).

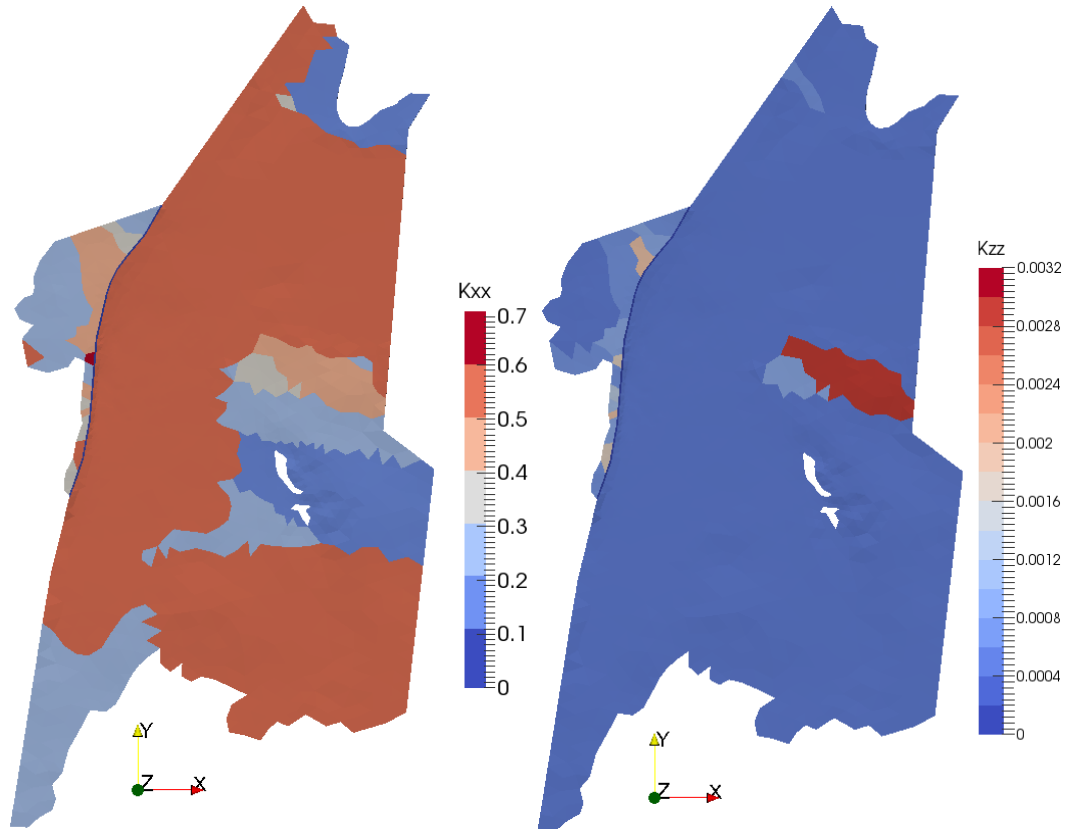


Рисунок 3.2 – Распределение коэффициента фильтрации в горизонтальном направлении (слева) и вертикальном направлении (справа) во II эксплуатационном горизонте

Данный метод был описан в статье [74] и подходит для оценки пространственной изменчивости коэффициента фильтрации слоев модели, однако, конкретно в этой модели от этих исследований пришлось отказаться по ряду причин, описанных в разделе 3.4.2.

В ходе анализа фактических данных и знаний, накопленных в результате работы полигона «Северный» за предшествующие созданию модели 40 лет, стало очевидно, что в данном случае необходимо:

1. во-первых, задавать зоны неоднородности фильтрационных параметров вручную сообразно с зонами питания и разгрузки пластов-коллекторов (знания о таких зонах почерпнуты в ходе изучения отчетов по полигону за предшествующие годы),
2. во-вторых, для верификации разработанной модели по концентрациям загрязнителей необходимо применить модель массопереноса в среде с двойной пористостью.

3.2 Применение и параметризация модели массопереноса в среде с двойной пористостью

Модель гетерогенно-блоковой среды (модель двойной пористости) успешно применяется на объектах, имеющих неоднородную песчано-глинистую структуру. Ярким примером такого применения служит работа [75]. В данной работе описывается площадка эксперимента MADE (Macrodispersion Experiment) на военной базе Коламбус, в штате Миссисипи, США. Авторы говорят о том, что на этой исследовательской площадке проводились эксперименты по закачке трития и регистрации его в наблюдательных скважинах; закачка длилась в течение 48,5 часов в пять, расположенных в ряд, наблюдательных скважин. Геологические условия, слагающие исследовательскую площадку, в чем-то схожи с полигоном «Северный»: локальный водоносный горизонт, который лежит в основе исследуемого участка, состоит из аллювиальных отложений террасы со средней толщиной 11 м. Отложения плейстоценовой реки, связанные с близлежащими реками Томбигби и Буттахатчи, объясняют неоднородность участка. Отложения водоносного горизонта состоят из плохо отсортированного песчаного гравия и гравийного песка со значительным количеством ила и глины. Литологические разности имеют вид нерегулярных линз и прослоев, с горизонтальными размерами до 8 м и вертикальными размерами менее 1 м. Водоупорный горизонт на площадке MADE состоит из глины, ила и мелкозернистых песков; залегает под аллювиальным водоносным горизонтом. Таким образом, можно сказать, что здесь наблюдается сложное перемешивание песчаных и глинистых фракций, в точности похожее на ситуацию на полигоне «Северный». Авторы работы [75] в ходе исследования предложили сравнить попытку модельного воспроизведения наблюдаемого в достаточно регулярной сети скважин ореола загрязнения с помощью классической адвективной модели и модели массопереноса в среде с двойной пористостью. В результате был сделан ряд важных выводов:

1. Классическая однопористая модель неадекватно воспроизводит распространение ореола в сложной неоднородной среде (ввиду неспособности такой модели явным образом учитывать сильные неоднородности с преимущественным распространением загрязнения по этим путям).
2. Дисперсивность, которая является основной движущей силой в классической модели адвекции-дисперсии в случае с применением двойной пористости отходит на второй план, так как большая часть дисперсии учитывается массопереносом между мобильной и немобильной зонами в каждой ячейке модели.
3. Модель массопереноса в среде с двойной пористостью позволяет достаточно адекватно воспроизвести ореол наблюдаемого загрязнения (авторы показали, что воспроизводится и сосредоточение основной массы трития вблизи закачки, и существенное распространение его в гораздо меньших концентрациях на большие расстояния от источника, тогда как классическая модель не воспроизводит последнее).

4. Разница в результатах моделирования, вызванная использованием различных методов генерации проводимости, является вторичной по сравнению с той разницей, которая была вызвана использованием различных моделей пористости – классической адвективно-дисперсионной модели и модели массопереноса в среде с двойной пористостью.

Последний вывод повлиял на выбор параметров фильтрационной модели (отказ от сложного пространственного распределения в пользу задания зон неоднородности вручную сообразно с областями питания и разгрузки водоносных горизонтов), что в итоге позволило откалибровать ее с приемлемой точностью.

Параметры модели двойной пористости в диссертационном исследовании подбирались в результате калибровки модели по фактическим данным (замеры концентрации нитрат-иона и активности ^{90}Sr). Этими параметрами являлись пористость каналов, пористость блоков (матрицы) и коэффициент массообмена между ними.

Геологические условия на полигоне «Северный» неоднозначны в связи с сильной неоднородностью литологического состава пород водоносных и водоупорных горизонтов. Далее будет показана вся сложность калибровки модели по натурным данным, когда во время замеров фактических концентраций нитрат-иона в скважинах вдруг появляются резкие и высокие значения, затем они снова пропадают (раздел 4). Такие ошибки в совокупности с неопределенностью начальных условий и концентрации веществ в стоках позволяют откалибровать геомиграционную модель консервативно с превышением существующих концентраций, или же откалибровать модель с повторением кривой на уровне среднего значения без воспроизведения пиков в обоих случаях, так как зачастую они не отражают реальную картину.

3.2.1 Коэффициент массообмена (K)

Значения коэффициента массообмена при калибровке модели варьировались от $1 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ до $1 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$.

На рисунке 3.3 в качестве примера скважины на II эксплуатационный горизонт приведено сопоставление фактической и модельных концентраций нитрат-иона по скважине А-56 на примере трех вариантов коэффициента массообмена. Исходя из этого рисунка видно, что при значении $K=1 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ модельная кривая больше приближена к фактической кривой в период с 1980 по 2010 год. Увеличение значения коэффициента массообмена ведет к «задиранию» модельной концентрации и ухудшению общей оценки модели по нитрат-иону. В I горизонте ситуация более неоднозначная, однако значение параметра массообмена выбрано идентичным. В качестве примера на рисунках 3.4-3.5 приведены сопоставления фактических и модельных кривых для трех различных значений коэффициента массообмена. Для скважины А-32 (рисунок 3.4) логичнее было бы выбрать значение $K=1 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$, так как именно эта модельная

кривая ближе к фактическим значениям. Однако если обратить внимание на рисунок 3.5, то именно значение $K=1 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ для этой скважины в среднем соответствует фактической кривой. А так как в модели в будущем предпочтителен консерватизм, то значение коэффициента массообмена между мобильной и немобильной зонами двойной пористости выбрано минимальным, равным $1 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ для обоих эксплуатационных горизонтов.

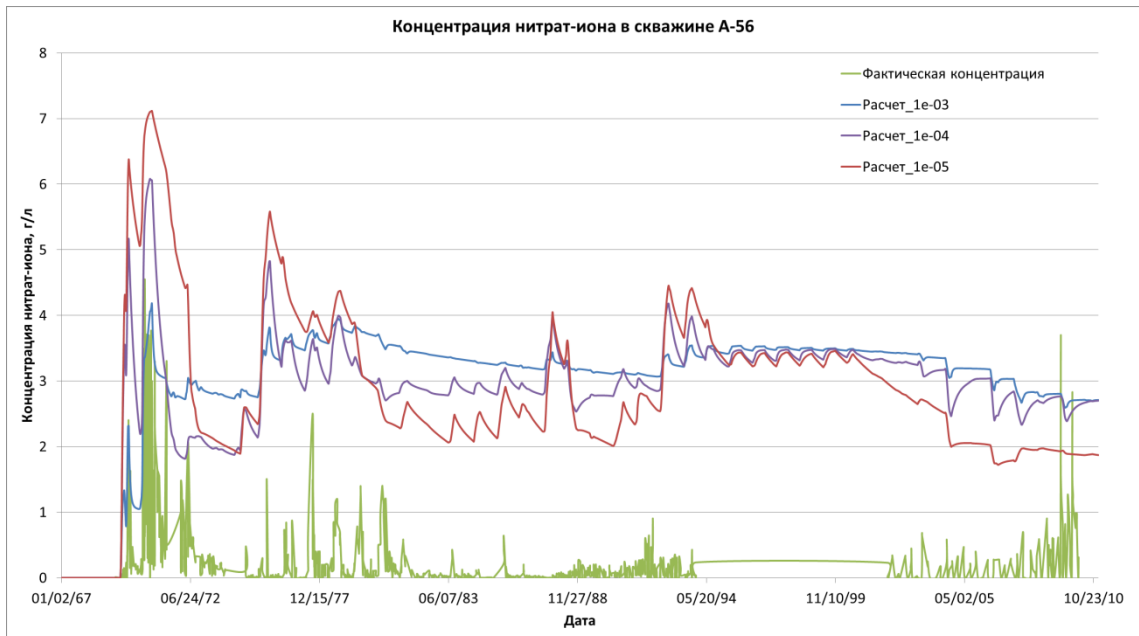


Рисунок 3.3 – Сопоставление фактической и модельных (различные значения коэффициента массообмена между мобильной и немобильной зонами двойной пористости) концентраций нитрат-иона в скважине А-56 (II горизонт)

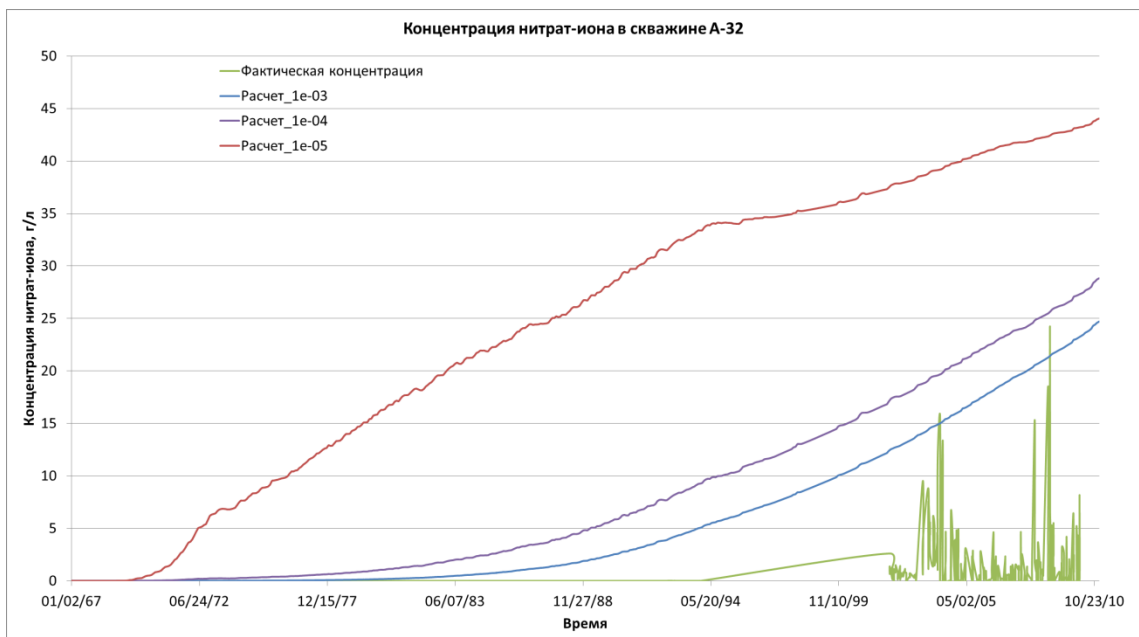


Рисунок 3.4 – Сопоставление фактической и модельных (различные значения коэффициента массообмена между мобильной и немобильной зонами двойной пористости) концентраций нитрат-иона в скважине А-32 (I горизонт)

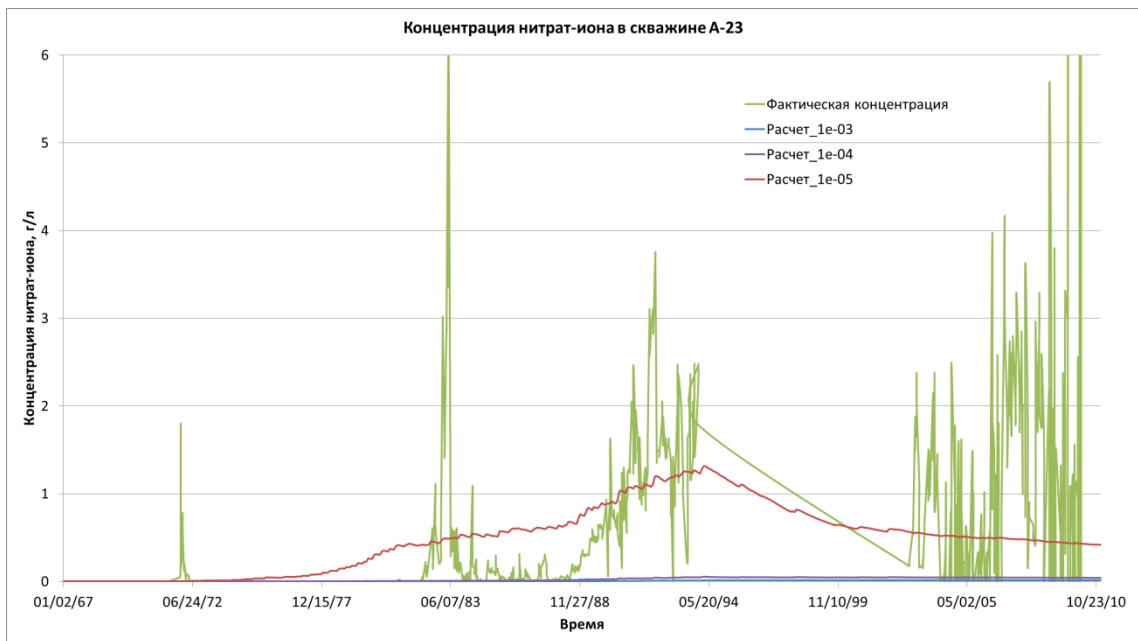


Рисунок 3.5 – Сопоставление фактической и модельных (различные значения коэффициента массообмена между мобильной и немобильной зонами двойной пористости) концентраций нитрат-иона в скважине А-23 (I горизонт)

3.2.2 Мобильная пористость (n_m)

Значения мобильной пористости обоих эксплуатационных горизонтов при калибровке модели варьировались от 0,01 до 0,2.

На рисунке 3.6 в качестве примера скважины на II эксплуатационный горизонт приведено сопоставление фактической и модельных концентраций нитрат-иона по скважине А-56 на примере трех вариантов мобильной пористости. Расчет с мобильной пористостью, равной 0,02 (красная линия), более приближен к фактическим значениям концентрации нитрат-иона, и в целом по модели наблюдается меньшее расхождение с фактическими данными именно при таком значении мобильной пористости. Сопоставление графиков по мобильной пористости отражает приблизительно ту же ситуацию, что и с коэффициентом массообмена, поэтому графики не приводятся. Основной вывод заключается в том, что значение мобильной пористости 0,02 для I эксплуатационного горизонта также отражает наиболее приближенную к реальности картину по нитрат-иону, как самому достоверно измеренному компоненту РАО.

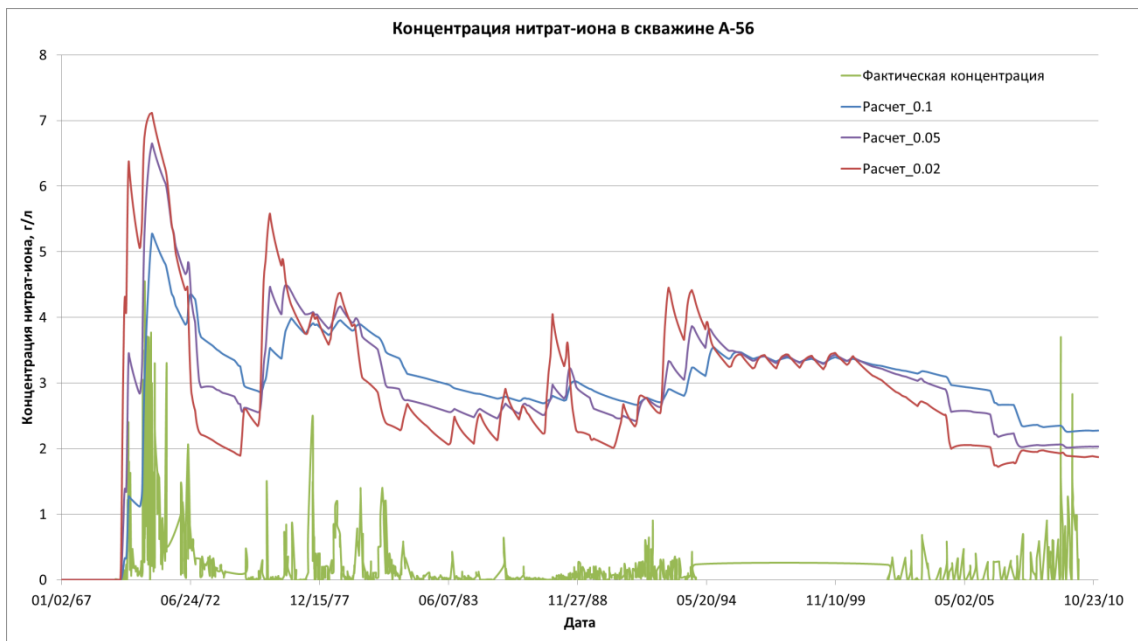


Рисунок 3.6 – Сопоставление фактической и модельных (различные значения мобильной пористости) концентраций нитрат-иона в скважине А-56 (II горизонт)

3.2.3 Немобильная пористость (n_{im})

Значения немобильной пористости обоих эксплуатационных горизонтов при калибровке модели варьировались от 0,01 до 0,2, как и значения мобильной пористости.

Для II эксплуатационного горизонта по результатам калибровки эта величина составила 0,11, для I – 0,05.

3.2.4 Сравнение с гомогенной моделью

Помимо варьирования параметров двойной пористости для лучшего приближения к фактическим данным уместно привести сравнение результатов моделирования простой модели массопереноса в гомогенной однопористой среде и модели массопереноса в гетерогенно-блоковой среде (в среде с двойной пористостью). Гомогенная среда принималась с одинаковой пористостью для обоих эксплуатационных горизонтов, – равной 0,2. На рисунке 3.7 в качестве примера приведено сопоставление фактической и модельных концентраций нитрат-иона по скважине А-32 (I горизонт). Видно, насколько гомогенная модель повышает концентрацию в скважине, и существенно превышает фактическую концентрацию нитрат-иона – практически в 6,5 раз, если сравнивать максимальные значения модельной и фактической концентраций. Модель же гетерогенно-блоковой среды превышает фактическую концентрацию в 2 раза, при этом сохраняя консерватизм модели.

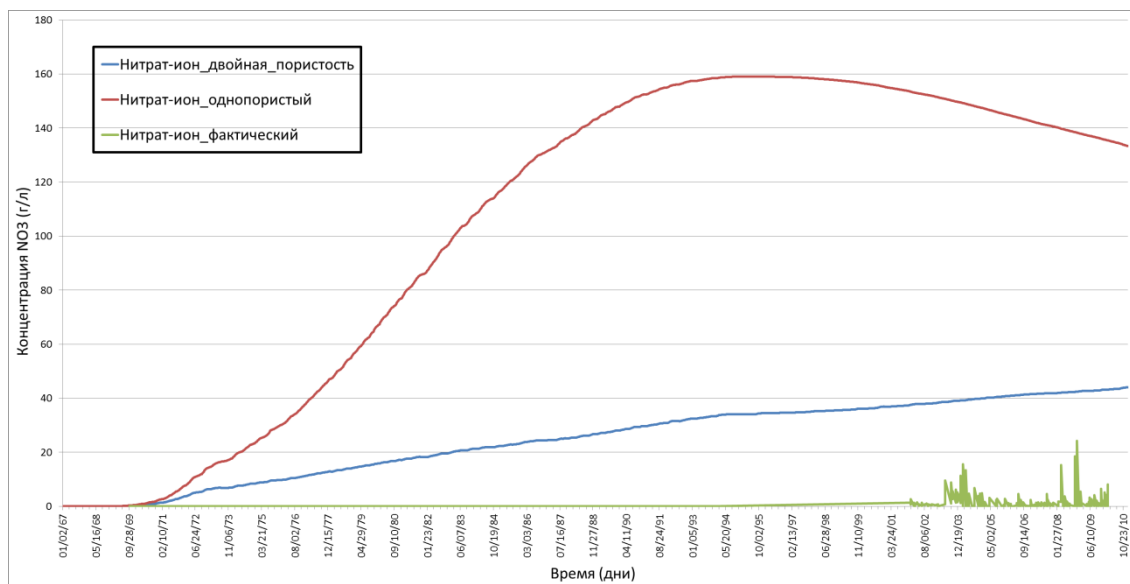


Рисунок 3.7 – Сопоставление фактической и модельных (модели гомогенной и гетерогенно-блоковой сред) концентраций нитрат-иона в скважине А-32 (I горизонт)

3.3 Обоснование фильтрационно-емкостных параметров модели

Для обоснования выбранного параметра активной пористости проведено исследование влияния закачки в нагнетательную скважину на ближайшие к ней наблюдательные скважины. Для исследования взят пласт-коллектор, предназначенный для закачки НАО и САО, – пласт-коллектор II, так как именно в нем есть продолжительные ряды наблюдений по скважинам, расположенным в непосредственной близости от нагнетательной скважины, в данном случае это скважины А-56, А-57, П-7 и нагнетательная скважина Н-8 (рисунок 3.8). Средняя мощность пласта в районе этих скважин составляет 91,2 м.

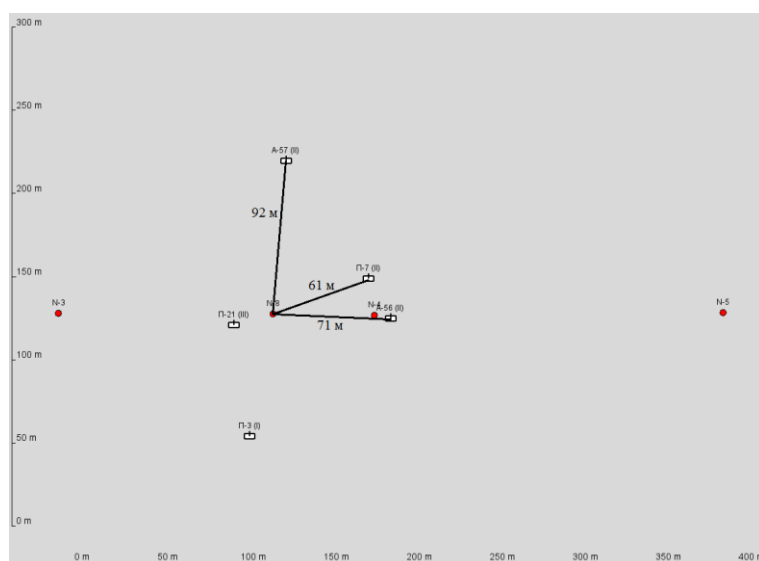


Рисунок 3.8 – Расположение наблюдательных скважин относительно скважины нагнетания

3.3.1 Скважина А-57

Рассмотрим самую удаленную скважину А-57.

Интерес представляет сравнение концентрации в закачке в нагнетательной скважине Н-8 и фактической концентрации в наблюдательной скважине А-57 (рисунок 3.9). Глядя на эти кривые, на первый взгляд все кажется похожим. Однако неясны некоторые фактические пики:

- 1) Приблизительно в 1980 году – хотя в закачке все было относительно ровно и спокойно.
- 2) Высокое значение в 2002 году после долгого перерыва – в закачке, в период с 2000 по 2003, дебит закачки вообще нулевой.

Если говорить о схожих моментах, то можно выделить следующее: высокая фактическая концентрация явно связана с высокой интенсивностью закачки и высокой концентрацией в закачке в начальные моменты времени.

В целом можно сказать, что расчетная кривая очень близка по форме к фактической кривой за исключением резких падений фактической концентрации вниз (предположительно, нитрат-редукция) и за исключением того факта, что расчетная кривая ниже фактической.

Также стоит обратить внимание на тот факт, что концентрация в закачке не превышает 8 г/л, тогда как в скважине А-57 можно видеть наблюдения с концентрацией до 8,5 г/л, что повторить на модели никак невозможно. То есть, очевидно, значения в скважине А-57 не должны превышать 8 г/л. Второй момент: в начале, согласно замерам, концентрация колебалась на уровне 1,5 г/л (до 10/29/1969, когда концентрация в А-57 начала возрастать), что согласуется с концентрацией в закачке — 2 г/л. Здесь каких-либо вопросов нет. Однако при этом, если посмотреть на дебит закачки (рисунок 3.10), то можно заметить, что первая закачка происходит в период с 7/3/1969 по 8/3/1969 (с 3 июля по 3 августа 31 день) с дебитом закачки 427,387 м³/сут и концентрацией в закачке 8 г/л. То есть то, что начинают «ловить» в наблюдательной скважине, начиная с 7/24/1969, — это нитрат-ион от закачки с максимальной концентрацией (возможно, в наблюдательную скважину начинает приходить концентрация по дисперсионному и диффузионному механизму). То есть заданная на модели концентрация в закачке 2 г/л в самом начале в действительности никакой нагрузки не несет, так как дебит закачки в это время был нулевым.

Также существует скептическое отношение к некоторым замерам фактической концентрации в скважине А-57 (таблица 3.5).

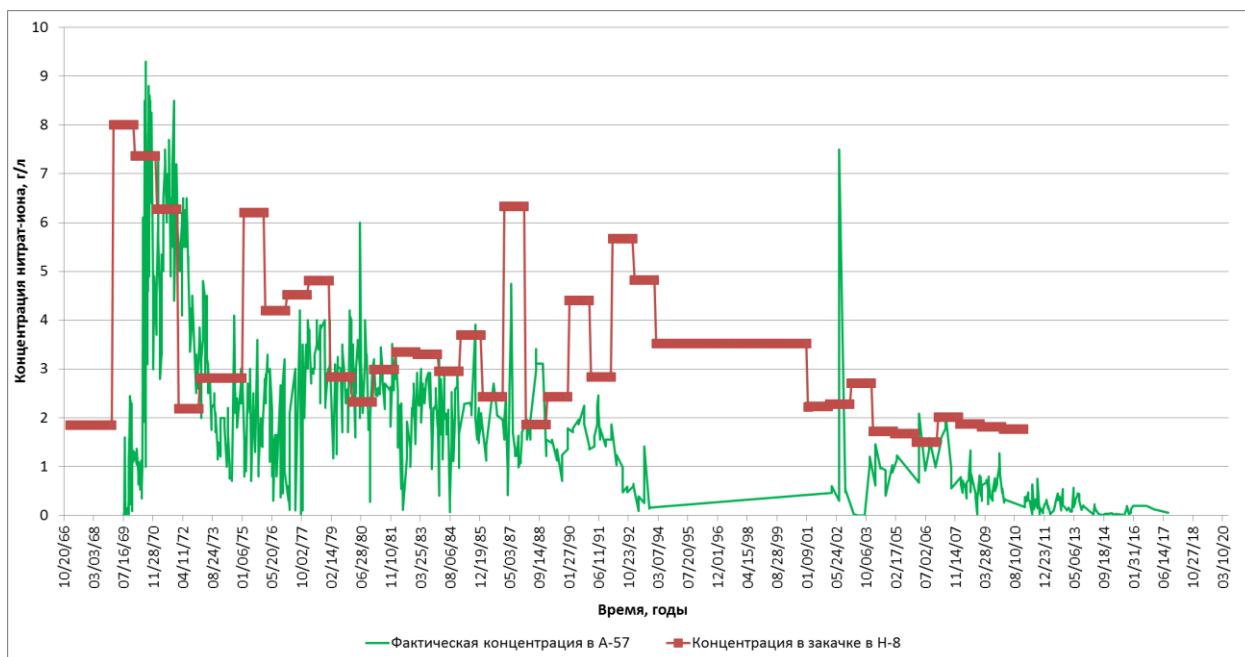


Рисунок 3.9 – Концентрация в закачке Н-8 и фактическая концентрация в А-57

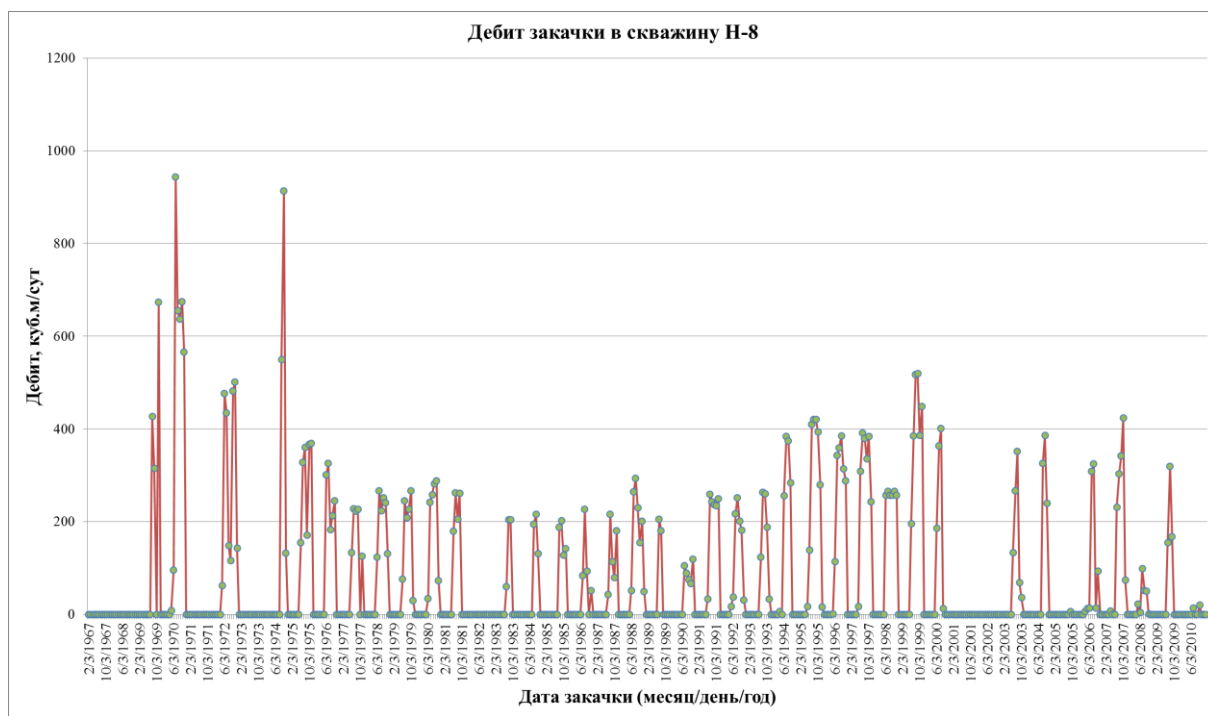


Рисунок 3.10 – Дебит закачки в скважину Н-8

Таблица 3.5 – Данные о фактических замерах концентрации нитрат-иона в скважине А-57

Дата (мм/дд/гггг)	Концентрация нитрат-иона	Глубина
5/29/1970	1,120	210
5/29/1970	1,127	225
6/12/1970	4,800	195
6/12/1970	5,200	210
6/12/1970	6,100	225
6/20/1970	1,908	210
6/20/1970	1,913	225
7/8/1970	7,500	195
7/8/1970	8,200	210
7/8/1970	8,500	225
7/20/1970	6,600	195
7/20/1970	8,400	210
7/20/1970	4,850	225
7/28/1970	9,300	195
7/28/1970	1,000	210
7/28/1970	8,050	225
8/13/1970	6,200	195
8/13/1970	6,327	210
8/13/1970	5,500	225

Если посмотреть на замеры, то можно увидеть, что возрастание концентрации от весьма низкой (1 г/л) до максимальной в закачке (8 г/л) происходит с начала июня 1970 по, примерно, начало июля 1970, – то есть за 1 месяц. Стоит заметить, что есть еще очень низкая концентрация (выделена оранжевым) в этот период – два замера на разных глубинах с идентичной концентрацией при том, что немногим ранее и немногим позднее концентрация в замерах высокая. То же самое справедливо и для замера с концентрацией 1 г/л. Создается ощущение, что эти замеры некорректны. Вызывает сомнение тот факт, что концентрация сначала возрастала, затем резко опустилась, а затем мгновенно возросла до максимальной (потому как в закачке концентрация существенно не падала: только лишь от 8 до 7,36 г/л). Поэтому есть основания считать эти и подобные замеры некорректными.

Взяв первый замер в А-57 с максимальной концентрацией, соответствующей 4 г/л (с учетом дисперсии фронт должен быть там, где значение = 0,5 от входной концентрации, то есть от 8 г/л), можно утверждать, что фронт закачки «пришел» в наблюдательную скважину. *Первый замер соответствует времени 6/12/1970 (правда в это время была измерена концентрация, равная 4,8 г/л, в таком случае волюнтаристски было принято, что 6/3/1970 была получена концентрация 4 г/л).* Таким образом, от начала закачки до прихода фронта в наблюдательную скважину А-57 прошел период времени от 7/3/1969 до 6/3/1970.

Теперь необходимо понять, в какой момент происходит приход фронта в наблюдательную скважину А-57 аналитическим методом. Для этого используется следующая формула:

$$R = (Q \cdot t / \pi \cdot m \cdot n)^{1/2}$$

С помощью этой формулы можно оценить радиус влияния скважины.

Параметры, принятые в данной формуле, будут взяты из модели: средняя мощность пласта составляет 91,2 м, активная пористость – 0,02 (безразмерная). Далее, необходимо просуммировать дебиты в м³/сут, умноженные на количество дней в периоде, в течение которого происходила закачка с таким дебитом (таблица 3.6), вплоть до 6/3/1970. В сумме получилось, что в формулу вместо Q·t необходимо подставить значение, равное 47 114 м³. В результате подстановки данных в формулу радиус влияния получается равным 90,7 м, что практически соответствует расстоянию от нагнетательной до наблюдательной скважины, равному 92 м. *То есть модельное значение активной пористости, равное 0,02, в результате калибровки было выбрано вполне корректно.*

Итак, после приведенных аналитических расчетов стоит вернуться к тому, что концентрация в наблюдениях возросла от маленькой (1 г/л) до максимальной (8 г/л) за 1 месяц. Если бы дисперсии и диффузии не было, то логично было бы увидеть в наблюдениях сразу концентрацию, равную 8 г/л, – ту, что была в закачке в самом начале (получился бы резкий фронт без размазывания). Однако закачка с максимальной концентрацией была с июля по сентябрь 1969. Далее концентрация в закачке опустилась до 7,36 г/л (что тоже весьма высокое число, всего лишь на полграмма на литр ниже максимальной концентрации). Теперь логично назревает вопрос: почему так долго в наблюдательную скважину А-57 приходила концентрация на уровне 1-1,2 г/л (см. таблицу 3.5 – вплоть до конца мая 1970 – около года с начала закачки), а потом вдруг резко стала возрастать? Через полмесяца она стала равной 4,8 г/л (в 4 раза больше всего за полмесяца), потом 5,2 г/л, 6 г/л, 7,5 г/л и до максимальной, равной 8 г/л, концентрация в наблюдательной скважине возросла всего за 1 месяц.

В результате вышеозначенных наблюдений можно сделать вывод, что дисперсия приводит к размазыванию фронта в течение 1 месяца – того месяца, когда концентрация возрастала до максимального значения. А то, что было измерено раньше, предположительно, является следствием диффузионного переноса или, может быть, коллоидного.

Стоит также отметить, что расчетная кривая возрастает и убывает не столь резко, как фактическая (плавные пики супротив разрезанным и резким), что, в целом, логично, так как загрязнение, дойдя до скважины, казалось бы, не может резко в ней пропасть. Здесь видятся два вывода. Первый заключается в том, что скважина перед пробоотбором не прокачивалась (что является уже давно известным фактом на полигоне «Северный»); второй вытекает из первого – так как прокачка не производилась, то нитрат-ион в скважине уменьшился в результате

процесса нитрат-редукции, – этим можно объяснить движение наблюдаемой кривой концентрации нитрат-иона в скважине вниз. Без введения процесса нитрат-редукции повторить данные пики (резкие взлеты и падения) не представляется возможным.

Таблица 3.6 – Данные о дебите нагнетания в Н-8 (расчет для А-57)

Начало периода (мм/дд/гггг)	Конец периода (мм/дд/гггг)	Количество дней в периоде	Дебит, м ³ /сут	Концентрация в закачке, г/л	Закачка, м ³
6/3/1969	7/3/1969	30	0	8	0
7/3/1969	8/3/1969	31	427,387	8	13249
8/3/1969	9/3/1969	31	315,677	8	9786
9/3/1969	10/3/1969	30	0	8	0
10/3/1969	11/3/1969	31	673,065	8	20865
11/3/1969	12/3/1969	30	0	8	0
12/3/1969	1/3/1970	31	0	8	0
1/3/1970	2/3/1970	31	0	7,36	0
2/3/1970	3/3/1970	28	0	7,36	0
3/3/1970	4/3/1970	31	0	7,36	0
4/3/1970	5/3/1970	30	8,66667	7,36	260
5/3/1970	6/3/1970	31	95,2903	7,36	2954
				Сумма	47114

3.3.2 Скважина П-7

В данном разделе оценивается тот же приход фронта, но для наблюдательной скважины П-7. Судя по рисунку 3.11 и таблице 3.7, концентрация в районе 4 г/л в скважине П-7 встречается примерно 7/17/1970. Это дата является серединой периода с 7/3/1970 по 8/3/1970, во время которого было закачено 654,903 м³/сут отходов. Возьмем половину от дебита этой закачки (таблица 3.8).

В результате, число $Q \cdot t$ к этому периоду составило 84 583 м³. Но скважина П-7 отстоит от скважины Н-8 на расстоянии 61 м. Соответственно, для того чтобы фронт появился в этой скважине в нужное время, активная пористость должна составлять около 0,08. С предыдущими выводами (выводами и расчетами по скважине А-57) не совпадает. В принципе, такие высокие значения пористости вполне справедливы, так как пласт-коллектор сильно неоднороден. Также, стоит обратить внимание на выделенные оранжевым цветом значения: 4,6 г/л и 8,7 г/л. Эти замеры встречаются в один и тот же день, но на разных глубинах, которые отличаются всего на 15 м. То есть фронт (около 4 г/л) и максимальная концентрация (около 8 г/л) наблюдаются в одно и то же время, что также свидетельствует об очень сильном неоднородном строении пласта-коллектора.

Однако в данной модели принято осреднение параметров по всей толщине модельного слоя, поэтому значение, равное 0,02, полученное в результате калибровки модели, принято в итоговой версии модели.

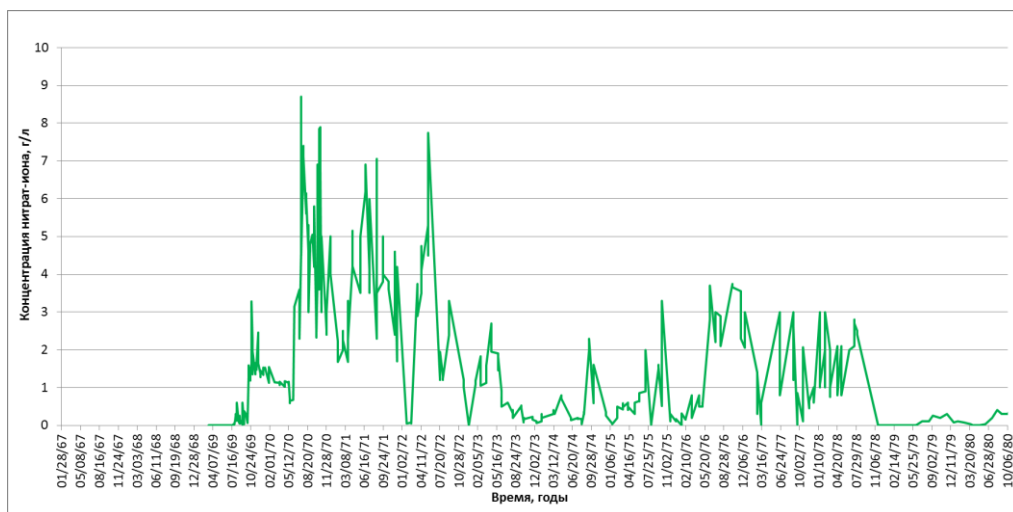


Рисунок 3.11 – Временной график фактической концентрации нитрат-иона в скважине П-7 (до 1980 г.)

Таблица 3.7 – Данные о фактических замерах концентрации нитрат-иона в скважине П-7

Дата (мм/дд/гггг)	Концентрация нитрат-иона	Глубина
06/05/70	0,670	200
06/05/70	0,724	215
06/05/70	0,760	230
06/12/70	3,150	200
06/12/70	3,050	215
06/12/70	3,150	230
07/08/70	3,600	200
07/08/70	2,330	215
07/08/70	2,300	230
07/17/70	4,600	200
07/17/70	8,700	215
07/17/70	4,500	230
07/28/70	6,900	200
07/28/70	7,400	215
07/28/70	7,100	230

Таблица 3.8 – Данные о дебите нагнетания в Н-8 (расчет для П-7)

Начало периода	Конец периода	Количество дней в периоде	Дебит, м ³ /сут	Концентрация в закачке, г/л	Закачка, м ³
6/3/1969	7/3/1969	30	0	8	0
7/3/1969	8/3/1969	31	427,387	8	13249

Начало периода	Конец периода	Количество дней в периоде	Дебит, м ³ /сут	Концентрация в закачке, г/л	Закачка, м ³
8/3/1969	9/3/1969	31	315,677	8	9786
9/3/1969	10/3/1969	30	0	8	0
10/3/1969	11/3/1969	31	673,065	8	20865
11/3/1969	12/3/1969	30	0	8	0
12/3/1969	1/3/1970	31	0	8	0
1/3/1970	2/3/1970	31	0	7,36	0
2/3/1970	3/3/1970	28	0	7,36	0
3/3/1970	4/3/1970	31	0	7,36	0
4/3/1970	5/3/1970	30	8,66667	7,36	260
5/3/1970	6/3/1970	31	95,2903	7,36	2954
6/3/1970	7/3/1970	30	943,333	7,36	28300
7/3/1970	8/3/1970	14	654,903	7,36	9169
				Сумма	84583

3.3.3 Естественный поток

Для понимания влияния регионального потока ниже приведена карта гидроизогипс в естественном режиме для центральной части II пласта-коллектора, построенная по фактическим замерам уровней в наблюдательных скважинах (рисунок 3.12), и модельная карта гидроизогипс (рисунок 3.13).

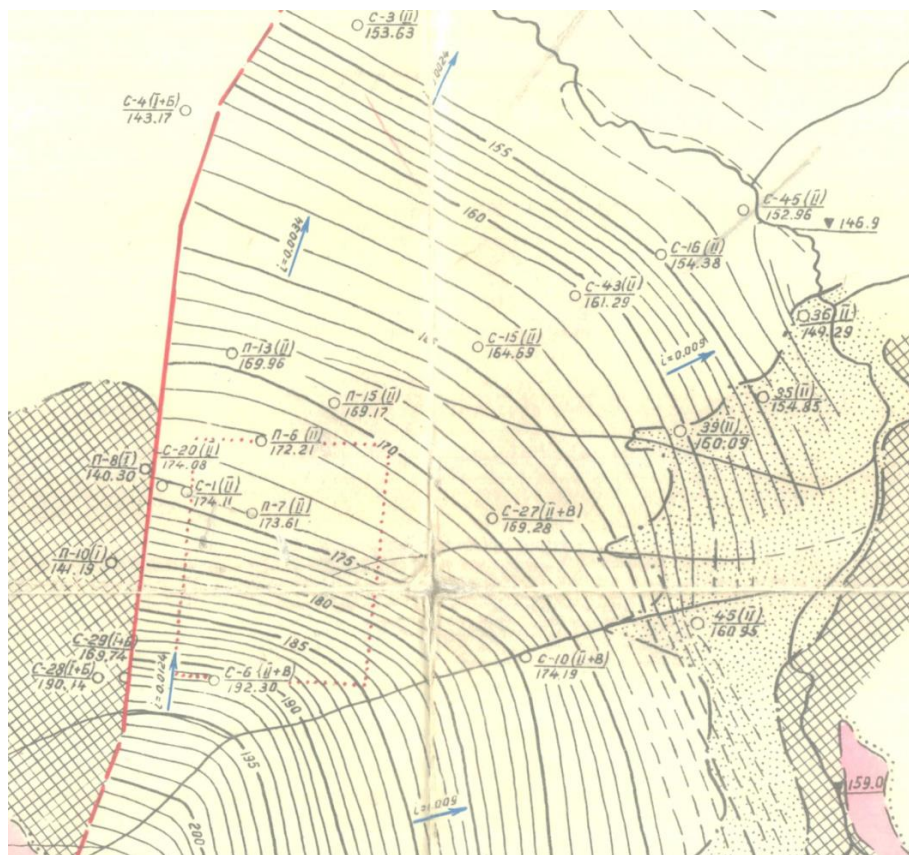


Рисунок 3.12 – Карта гидроизогипс II горизонта (естественный режим)

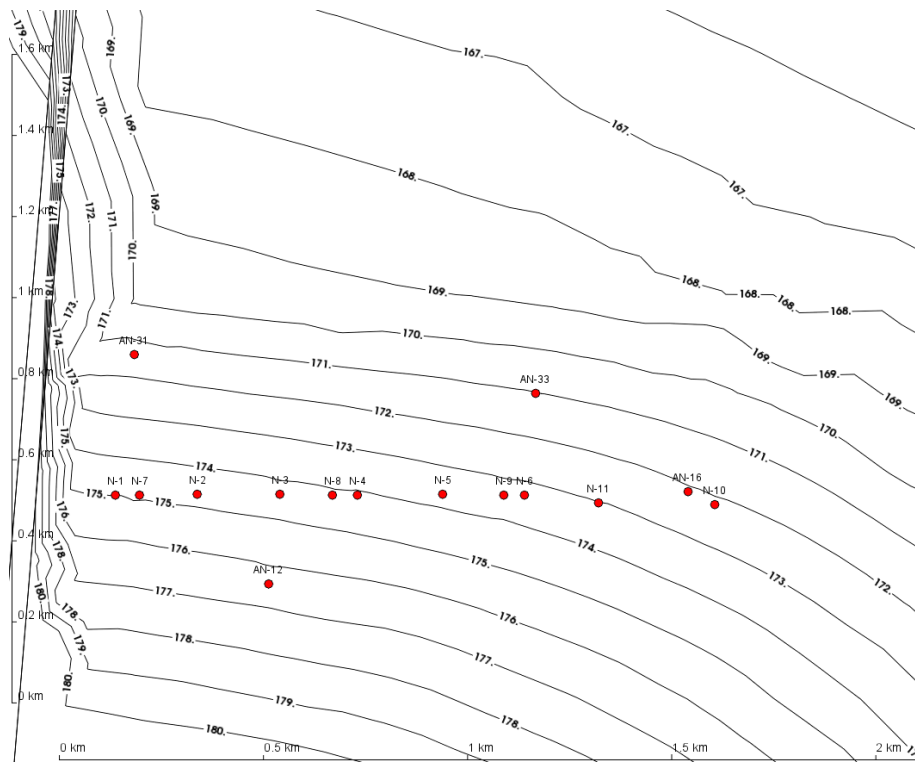


Рисунок 3.13 – Модельное распределение гидроизогипс во II горизонте (естественный режим, до начала закачки)

Градиент потока, согласно карте гидроизогипс, во II горизонте в районе скважин закачки составляет около 0,01, что вполне согласуется с модельной картой гидроизогипс: градиент по данным модели составляет около 0,009-0,01.

Как уже было сказано в разделе 2.1.4, в пределах опущенного блока поток подземных вод II горизонта характеризуется скоростью движения 10-15 м/год и разгружается в долине р. Б. Тель [55].

Скорость потока вычисляется следующим образом:

$$V=kI,$$

Коэффициент фильтрации в зоне неоднородности в районе скважин принят равным 0,1 м/сут. Градиент напора составляет 0,01. В результате скорость получается равной 0,001 м/сут или 0,365 м/год. Для получения действительной скорости фильтрации необходимо полученную выше скорость разделить на активную пористость, равную 0,02. В результате, скорость потока получается равной 18,25 м/год, что немного выше характерных скоростей, согласно [55] Если же брать значение активной пористости, равное 0,03, то действительная скорость получится равной около 12,2 м/год, что попадает в вышеуказанный диапазон. При пористости 0,08, вычисленной по данным скважины П-7, скорость составит всего 4,5 м/год. Такая пористость корректна только для очень локальных зон неоднородности, направленных на учет фильтрационной неоднородности в разрезе. Однако в ПС ГЕОПОЛИС каждый из пластов-

коллекторов представляет собой один модельный слой, поэтому значение активной пористости, равное 0,02, принято в итоговой версии модели.

3.3.4 Моделирование с измельчением расчетной сетки

Для понимания влияния размера ячеек сетки на точность расчетов проведен расчет с измельчением сетки в области нагнетательных скважин, и попадающих в эту область наблюдательных скважин (рисунки 3.14-3.15). Произведено большее сгущение сетки к нагнетательным скважинам (радиус ячейки сетки, в которую попадает скважина, – 2 м против 20 м в модели с неизмельченной сеткой); временной шаг составил 1 сутки (против 10 суток в модели с неизмельченной сеткой), расчет производился до 1/3/1972.

Результаты сравнения решений для скважины А-57, полученных на разных сетках, приведены на рисунке 3.16.

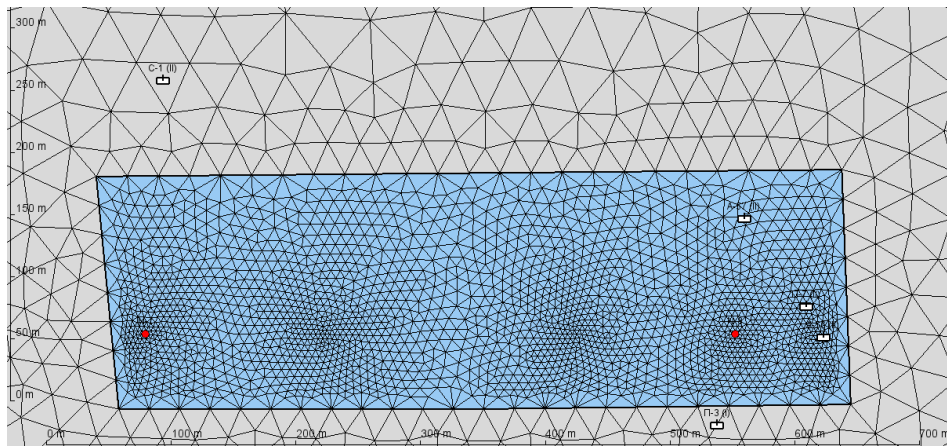


Рисунок 3.14 – Область (синий цвет) с измельченной сеткой

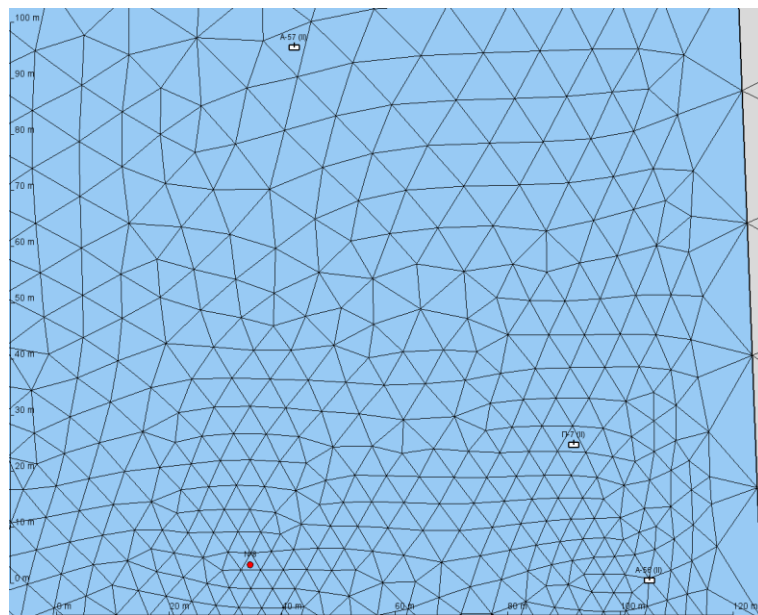


Рисунок 3.15 – Расположение нагнетательной скважины Н-8 и наблюдательных скважин А-56, П-7 и А-57 в области с измельченной сеткой



Рисунок 3.16 – Сравнение расчетных кривых концентрации нитрат-иона в скважине А-57 на разных сетках

Глобальных и кардинальных изменений модельной концентрации в скважине А-57 не наблюдается. Фронты пришли в то же время, концентрация стала немногим выше — на 0,5-1 г/л. Кажется, что в данном случае настоящая дисперсия доминирует над численной дисперсией, поэтому снижение численной малозаметно. Стоит провести сравнение двух моделей (модель без измельчения сетки и модель с измельчением сетки) с отключенными процессами диффузии и дисперсии.

3.3.5 Сравнение моделей без диффузии и дисперсии на разных сетках

В результате проведенного моделирования без учета процессов дисперсии и диффузии можно сделать вывод, что модельная концентрация на мелкой сетке выше модельной концентрации на грубой сетке приблизительно на 1 г/л для скважины А-57 (рисунок 3.17). Помимо этого из рисунка 3.17 следует, что максимальная модельная концентрация достигается раньше – июль 1970 на сетке с измельчением против ноября 1970 на крупной сетке.

Что касается скважины П-7, то тут разницу заметить очень трудно (рисунок 3.18). Отличие лишь в том, что на мелкой сетке первое появление концентрации в скважине происходит четко вровень с первым замером фактической концентрации (разница в появлении на разных сетках составляет, буквально, один день). В остальном разница вовсе несущественна.



Рисунок 3.17 – Сравнение расчетных кривых концентрации нитрат-иона в скважине А-57 на разных сетках без учета процессов диффузии и дисперсии



Рисунок 3.18 – Сравнение расчетных кривых концентрации нитрат-иона в скважине П-7 на разных сетках без учета процессов диффузии и дисперсии

Если сравнить между собой скважины А-57 и П-7, а точнее разницу в модельной концентрации в этих скважинах на крупной и мелкой сетке, то видно следующее: для скважины А-57 разница в некоторых пиках оказалась на уровне 1 г/л, а для скважины П-7 разницы практически нет, хотя путь от нагнетательной скважины до наблюдательной скважины П-7 составил на мелкой сетке 28 ячеек, а на крупной – всего 2 ячейки. Скважина А-57 находится ниже по потоку, а скважина П-7 практически перпендикулярна ему (рисунок 3.15).

То же самое подтверждается и в скважине А-56 (рисунок 3.19), которая находится строго на восток (расположение скважин приведено на рисунке 3.15) от нагнетательной скважины Н-8: разницы в величине концентрации практически нет; разница присутствует только во времени появления концентрации в скважине.



Рисунок 3.19 – Сравнение расчетных кривых концентрации нитрат-иона в скважине А-56 на разных сетках без учета процессов диффузии и дисперсии

Таким образом, напрашивается вывод о существенном влиянии регионального потока.

К тому же, модель с измельченной сеткой не дает каких-то глобальных и кардинальных изменений по сравнению с моделью без измельчения. Стоит отметить, что эвристический расчет модели на грубой сетке занимает около 2 часов с 1967 по 2020 год, а модели с измельченной сеткой – около 2 часов с 1967 по 1972 год, то есть примерно в 10 раз медленнее при приблизительно идентичном результате.

3.4 Особенности расчетного гидрогеологического обоснования безопасности ПГЗ ЖРО (на примере полигона «Северный»)

3.4.1 Архитектура ПС ГЕОПОЛИС

ПС ГЕОПОЛИС представляет собой программу для прогнозного и эвристического гидрогеологического (геофильтрационного и геомиграционного) трехмерного моделирования площадки расположения полигона закачки ЖРО «Северный» [76, 77].

ГЕОПОЛИС состоит из трех компонент: непосредственно модели [78], в которой определена геометрия расчетной области, параметры геологических сред, начальные и граничные условия, режимы работы скважин и т.д., и которая разрабатывается в рамках настоящей диссертации; расчетного модуля, в качестве которого используется код GeRa/V1

[29-31], разработанный совместно ИБРАЭ РАН и ИВМ РАН; базы данных мониторинга полигона «Северный», используемой для верификации модели на данных натуральных измерений (рисунок 3.20).

Моделирование осуществляется посредством численного решения системы дифференциальных уравнений, состоящей из уравнений фильтрации и массопереноса. Дискретизация производится на многогранных сетках (призмы, пирамиды, гексаэдры, тетраэдры) с помощью метода конечных объемов.

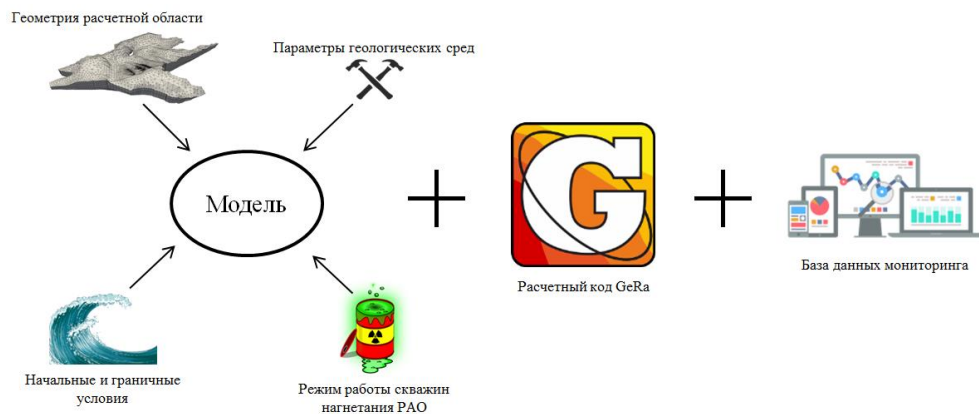


Рисунок 3.20 – Архитектура ПС ГЕОПОЛИС [76, 77]

3.4.2 Разработка трехмерной геофильтрационной-геомиграционной модели

Для того чтобы адекватно оценивать процессы фильтрации и массопереноса вблизи полигона «Северный», была принята вертикальная дискретизация модели, соответствующая основным геологическим подразделениям, выделенным при проведении гидрогеологических работ на полигоне [54, 68]. Следует отметить, что согласно исторически принятой вертикальной схематизации, на полигоне организована система закачки и мониторинга, т.е. фильтры скважин перфорированы в соответствии с выделенными геологическими подразделениями. В итоге модель была разбита на 10 слоев, соответствующих следующим водоносным горизонтам и разделяющим толщам (перечисление в порядке сверху вниз):

- слой 1: толща четвертичных отложений (Q);
- слой 2: разделяющая толща Д;
- слой 3: III водоносный горизонт;
- слой 4: разделяющая толща Г;
- слой 5: II водоносный горизонт;
- слой 6: разделяющая толща В;
- слой 7: разделяющая толща F;
- слой 8: разделяющая толща Б;
- слой 9: I водоносный горизонт;

- слой 10: разделяющая толща А.

Для определения пространственного распространения модельных слоев были обработаны данные из [52, 54, 68] по 123 скважинам, 15 разрезам и 10 структурным картам и картам мощностей. С колонок скважин оцифровывались абсолютные отметки подошв основных горизонтов и далее использовались для построения цифровых моделей подошв основных горизонтов. Для увеличения достоверности цифровых моделей были использованы также данные геологических разрезов, являющихся представлением об объекте работавших здесь ранее геологов. Разрезы оцифровывались следующим образом: через каждые 500 метров вдоль линии разреза ставилась опорная точка, в которой снимались данные об абсолютных отметках подошв выбранных слоев. Карта фактического материала с расположением скважин и опорных точек, снятых с разреза, показана на рисунке 3.21.

Структурные карты и карты мощностей, взятые из материалов геологических исследований [54, 68] также оцифровывались и использовались для построения цифровых карт мощностей и абсолютных отметок кровель горизонтов.

Показанный на рисунке 3.21 разлом при моделировании был реализован с помощью специальной дискретизации в области распространения этого тектонического нарушения и задания там низких фильтрационных свойств.

3.4.2.1 Фильтрационные параметры модели

Согласно проведенным гидрогеологическим исследованиям [52, 54, 68] в районе объекта в юрских отложениях, заполняющих Тельскую впадину, выделены три основных водоносных горизонта (I, II и III) и разделяющие толщи (А, Б, F, В, Г и D). Фрагмент гидрогеологического разреза, отражающего данную стратификацию, показан на рисунке 3.22 (линия разреза I-I представлена на рисунке 3.21). Однако, как следует из этого разреза, такое разделение достаточно условно.

При обосновании фильтрационных свойств расчетной модели были использованы данные опытно-фильтрационных работ, проведенных на объекте в 60-ые годы прошлого века [54, 68, 79]. Следует отметить, что наиболее достоверных опытов (кустовых откачек) в материалах, предоставленных заказчиком работы (ФГУП «НО РАО»), было всего два (результаты приведены в таблице 3.9).

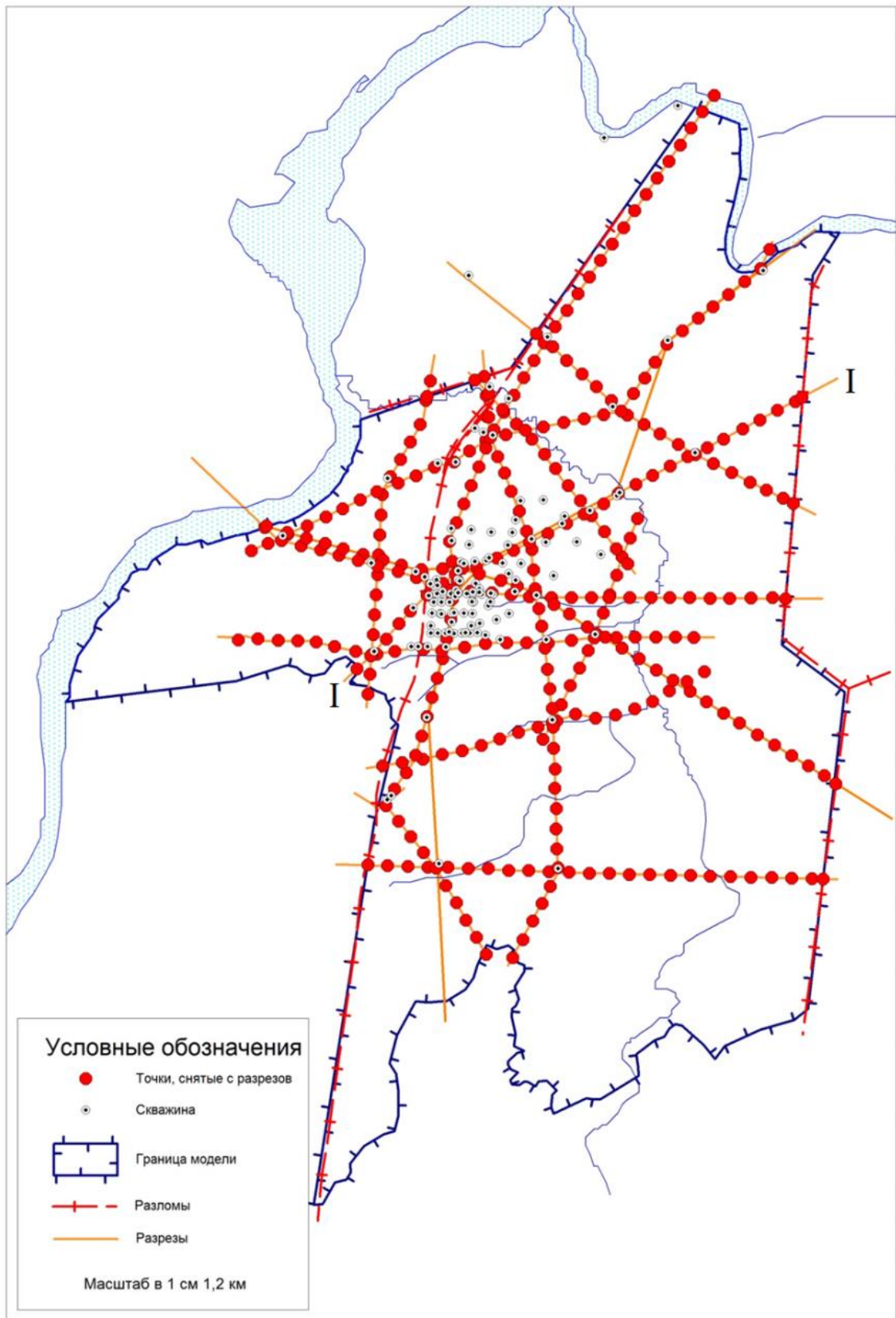


Рисунок 3.21 – Карта фактического материала с опорными точками для построения структурных карт модельных слоев

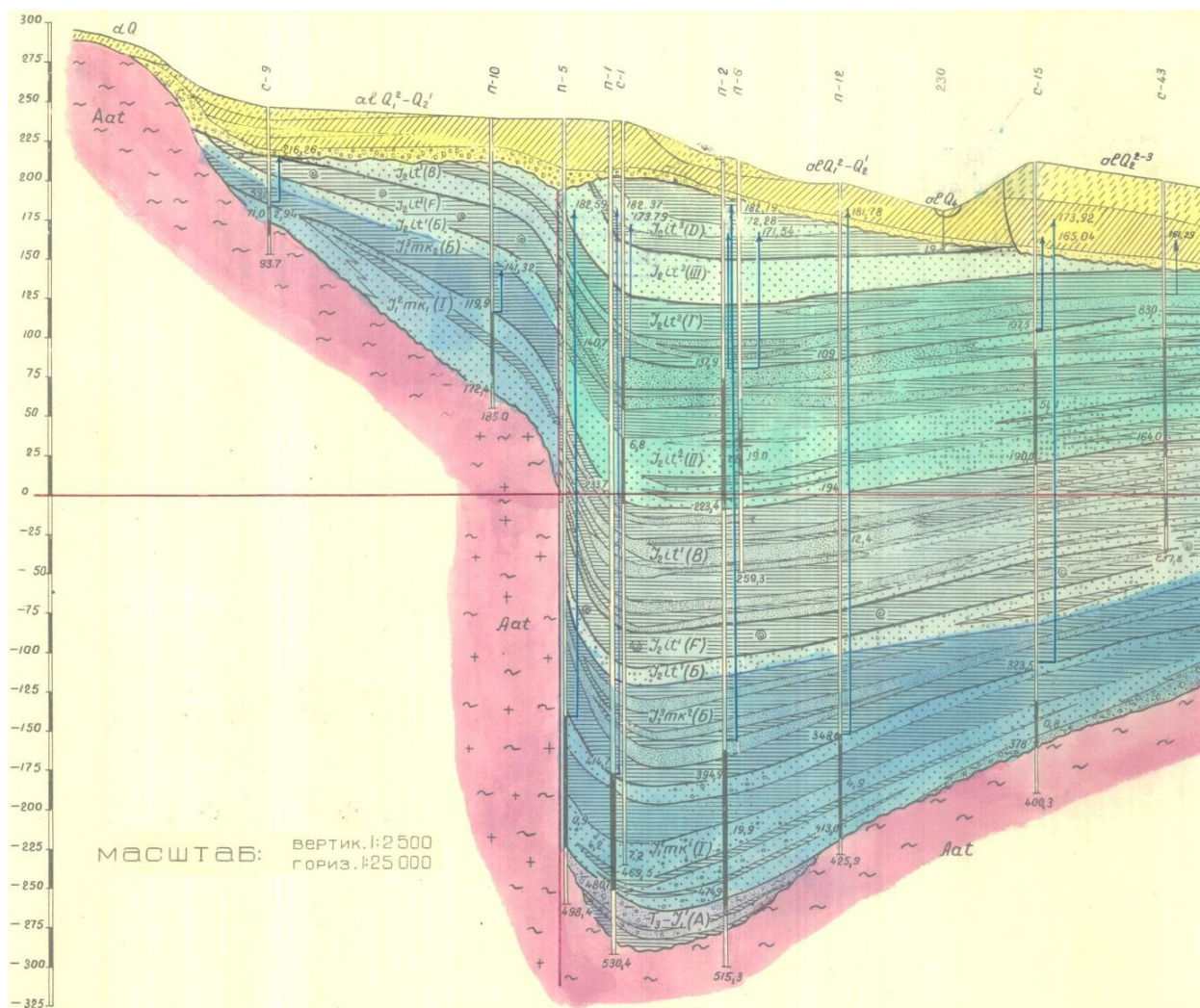


Рисунок 3.22 – Фрагмент гидрогеологического разреза по линии I-I [54]

Данных по одиночным откачкам было значительно больше (результаты приведены в таблице 3.10). Попытка использовать напрямую данные откачек для построения карт коэффициентов фильтрации с помощью интерполяции (данные по откачкам в скважинах в плане приведены на рисунках 3.23-3.24) не дала хороших результатов при калибровке модели [74], что может объясняться системными ошибками при проведении одиночных откачек, описанными ниже. Поэтому для получения распределения коэффициента фильтрации в модели использовались диапазоны значений коэффициента фильтрации, полученные в результате опытных откачек, и, далее, проводилась калибровка модели в рамках этих диапазонов.

Таблица 3.9. Средняя водопроницаемость и коэффициент фильтрации, определённые по кустовым откачкам

№ куста	Горизонт	Водопроницаемость средняя, м ² /сут	Эффективная мощность, м	Коэффициент фильтрации, м/сут
П-6	II	13,8	63	0,22
П-16	I	7,5	50	0,15

Таблица 3.10. Водопроницаемость и коэффициент фильтрации, определённые по одиночным откачкам

Скважина	Горизонт	Координаты		Водопроницаемость, м ² /сут	Мощность, м	Коэффициент фильтрации, м/сут
		X	Y			
Н-1	I	20827,98	22504,77	44,4	74,5	0,60
Н-2	I	21029,46	22505,28	42,14	79,5	0,53
Н-3	I	21231,15	22505,27	35,9	80,5	0,45
Н-4	I	21420,76	22504,21	40,29	89,5	0,45
Н-5	I	21630,11	22505,81	53,83	69,5	0,77
Н-6	I	21828,75	22505,02	54,22	68,5	0,79
Н-11	I	22010	22486	57,4	52,5	1,09
АН-2	I	21202,8	22286,35	38,3	79,5	0,48
АН-10	I	20805,56	22291,31	22,28	83,5	0,27
АН-16	I	22230,33	22511,32	65,7	51,5	1,28
АН-14	I	21800	22286,35	40,1	61	0,66
АН-18	I	22222,06	22303,37	81	60	1,35
Р-1	I	20732,62	21514,36	13,7	63,5	0,22
Р-2	I	20912,29	21513,7	26,15	71	0,37
Р-3	I	21106,7	21512,47	35,08	82	0,43
Р-4	I	21311,7	21508,95	88,45	85	1,04
Р-5	I	21512,25	21513,23	124,7	92	1,36
Р-6	I	21712,04	21514,01	126,49	86	1,47
Р-11	I	21896,45	21523,49	67,43	65,4	1,03
Р-12	I	22096,47	21468,05	42,6	62	0,69
А-5	I	22829,31	22552,67	0,21	53	0,004
А-15	I	22170,63	22197,22	53,51	59,5	0,90
А-19	I	20764,96	22011,63	23,19	60	0,39
А-22	I	21564,23	22012,19	59,9	75,4	0,79
А-23	I	21768,72	22008,86	63,15	80	0,79
А-24	I	20738,43	21704,24	7,6	67	0,11
А-25	I	20996,94	21993,52	35,4	74	0,48
А-26	I	21743,22	21699,11	107,8	67	1,61
А-27	I	21960,53	21759,3	67,97	66,5	1,02
А-32	I	21404,7	22855,8	34,3	77	0,45
А-37	I	22690	22000	39,5	58	0,68
А-45	I	21688,22	23719,36	6,3	75	0,08
П-1	I	20828,87	22685,56	8,18	72,5	0,11
П-2	I	21415,85	23075,05	12,03	97	0,12
П-3	I	21345,79	22431,38	15,2	74	0,21
П-4	I	20361,1	23047,03	26,4	67	0,39
П-8	I	20581,74	22916,62	42,8	74,5	0,57
П-9	I	19250	23260	45,7	37	1,24
П-10	I	20300,49	22142,23	34	52	0,65
П-11	I	21947,17	22628,35	15	87	0,17

Скважина	Горизонт	Координаты		Водопроницаемость, м ² /сут	Мощность, м	Коэффициент фильтрации, м/сут
		X	Y			
П-12	I	22113,59	23327,96	5	67	0,07
П-16	I	21554,98	23252,88	15,63	83	0,19
П-17	I	21313,64	22020,47	36,3	80	0,45
П-18	I	21251,91	21794,6	77,7	74	1,05
П-19	I	21193,2	21549,4	41,3	79	0,52
С-11	I	20940	15760	43,7	40	1,09
С-31	I	19650	17360	4	42,5	0,09
С-33	I	22675	27370	1,03	70	0,01
С-39	I	21830	26630	44,1	55	0,80
Н-7	II	20888	22505	15,3	59	0,26
Н-8	II	21360	22505	22,9	48	0,48
Н-9	II	21780	22505	25,4	45	0,56
Н-10	II	22295	22480	36,4	43,5	0,84
АН-31	II	20874	22847	14,1	50	0,28
АН-33	II	21856,85	22753,63	26,5	42	0,63
АН-34	II	22854,6	22834	11,5	39	0,29
Р-8	II	21744,55	24102,99	26	41	0,63
Р-9	II	22244,2	24037,3	40,14	40,5	0,99
Р-10	II	22768,31	24027,74	40,22	43	0,94
А-11	II	21003,24	22290,04	22,79	94	0,24
А-18	II	21766,4	22298,3	11,5	42	0,27
А-36	II	23793,2	22948	23,9	34,5	0,69
А-38	II	21480,36	23296,47	10,15	55	0,18
А-39	II	22521,7	23265,2	20,6	53,5	0,39
А-40	II	22981,2	23251,5	41,6	43	0,97
А-42	II	24975	23475	14,8	37,5	0,39
А-44	II	21251,41	22012,27	28,7	47	0,61
А-46	II	22656	23710,2	23,53	45,5	0,52
А-47	II	23605,1	23781,1	35,3	39	0,91
А-50	II	22850	24340	15	38	0,39
А-52	II	22975	24820	21,5	42,5	0,51
А-56	II	21430,73	22502,24	20,3	92	0,22
А-65	II	23540	24840	31,3	41	0,76
А-66	II	24070	24340	33,1	42,5	0,78
А-67	II	24370	23790	33,2	33,5	0,99
П-5	II	20690	22450	1,55	83	0,02
П-6	II	21508,74	23119,81	16,4	91	0,18
П-7	II	21417,35	22526,25	19,61	90	0,22
П-13	II	21251,88	23823,19	25,87	94	0,28
П-14	II	21942,89	22530,33	29,8	86	0,35
П-20	II	21459,52	22814,61	19,9	76,5	0,26
С-30	II	44590,03	25094,21	8,3	57	0,15

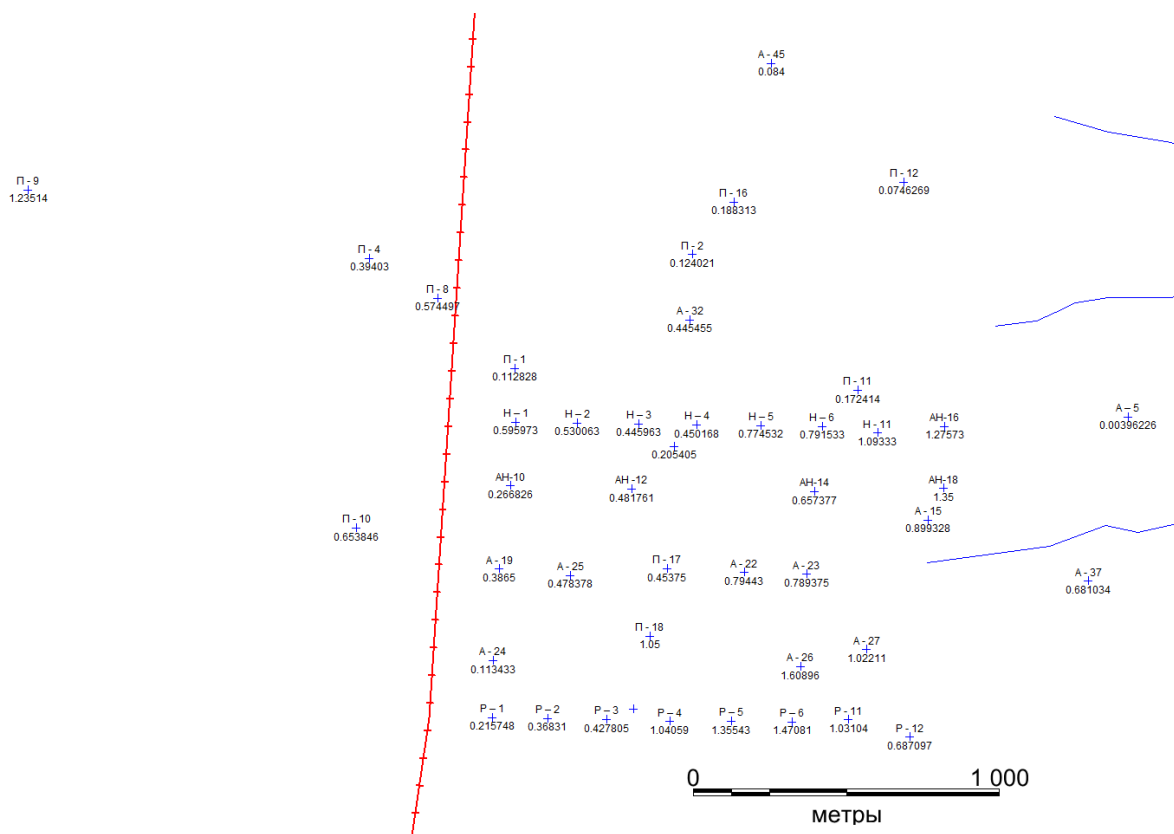


Рисунок 3.23 – Карта коэффициентов фильтрации по скважинам, определённых по одиночным откачкам в I горизонте

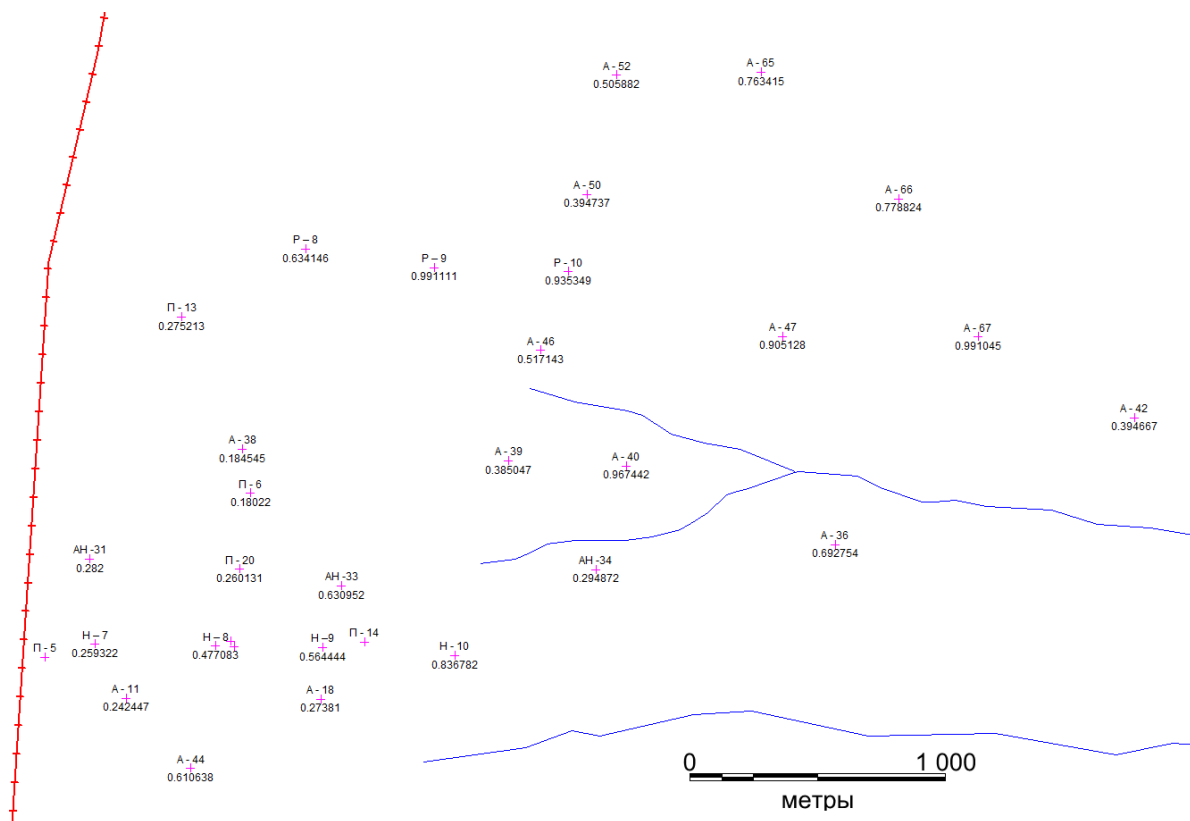


Рисунок 3.24 – Карта коэффициентов фильтрации по скважинам, определённых по одиночным откачкам во II горизонте

Результаты калибровки стационарной и нестационарной задач фильтрации привели к нижеописанным параметрам геологических слоёв и зонам неоднородностей в них (таблица 3.11, рисунки 3.25-3.29). При этом было получено удовлетворительное совпадение фактических и модельных данных (положения гидроизопьез в стационарном режиме, уровней – в нестационарном, см. раздел 4.3.1, 4.3.2). Параметры горизонтов представлены в таблице 3.11 (без учёта зон неоднородностей).

Таблица 3.11 – Коэффициенты фильтрации, принятые для модельных слоёв

№ слоя модели	Горизонт	Коэффициент фильтрации, м/сут	
		Горизонтальный	Вертикальный
1	Q	1,75	1
2	D	0,001	0,00005
3	III	0,26	0,26
4	G	0,0001	0,00005
5	II	0,35	0,001
6	W	0,001	0,00001
7	F	0,001	0,00001
8	B	0,001	0,00001
9	I	0,1	0,1
10	A	0,00001	0,00001

В слоях модели также присутствуют зоны неоднородности. Их форма и расположение были выбраны с учётом знаний о вертикальных перетоках между горизонтами и зонах питания горизонтов закачки, почерпнутых в результате детального изучения материалов отчётов за ранние годы (1965-1970 гг.). Диапазоны коэффициентов фильтрации в них были получены по результатам изучения обработки опытно-фильтрационных работ; итоговые значения коэффициентов фильтрации были выбраны по результатам их калибровки.

Зоны неоднородности в слоях 2 и 3 (D и III) показаны рисунке 3.25. То есть, данные зоны неоднородности заданы в долине р. Б. Тель и примыкающих к ней болотах для усиления связи II горизонта с рекой.

Параметры данных зон:

- горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,001,
- вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,001.

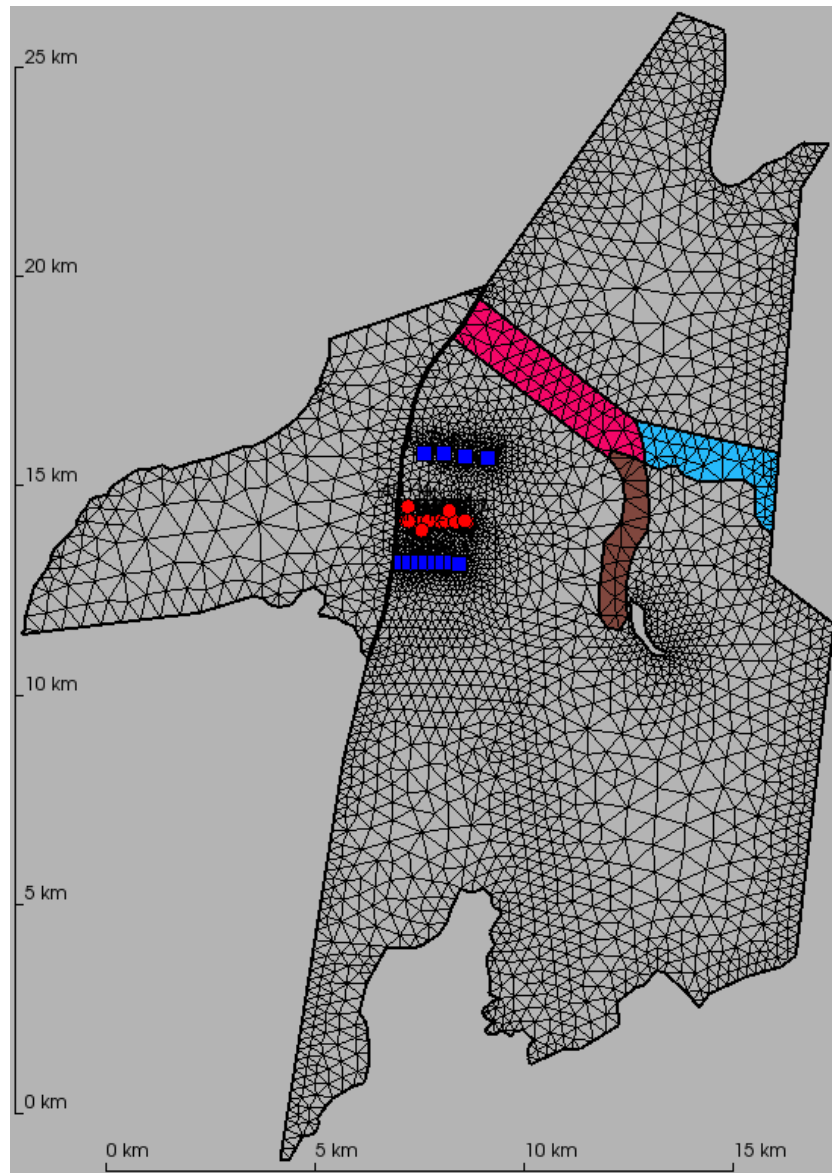


Рисунок 3.25 – Границы зон неоднородности в модельных слоях 2 и 3

Зона неоднородности в 4 слое (G) помимо таких же трёх зон, как и в вышележащих двух слоях (D и III) имеет ещё одну зону (рисунок 3.26, голубая область) для задания области питания второго горизонта на юге. Параметры этой зоны приведены ниже:

- горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,008,
- вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,008.

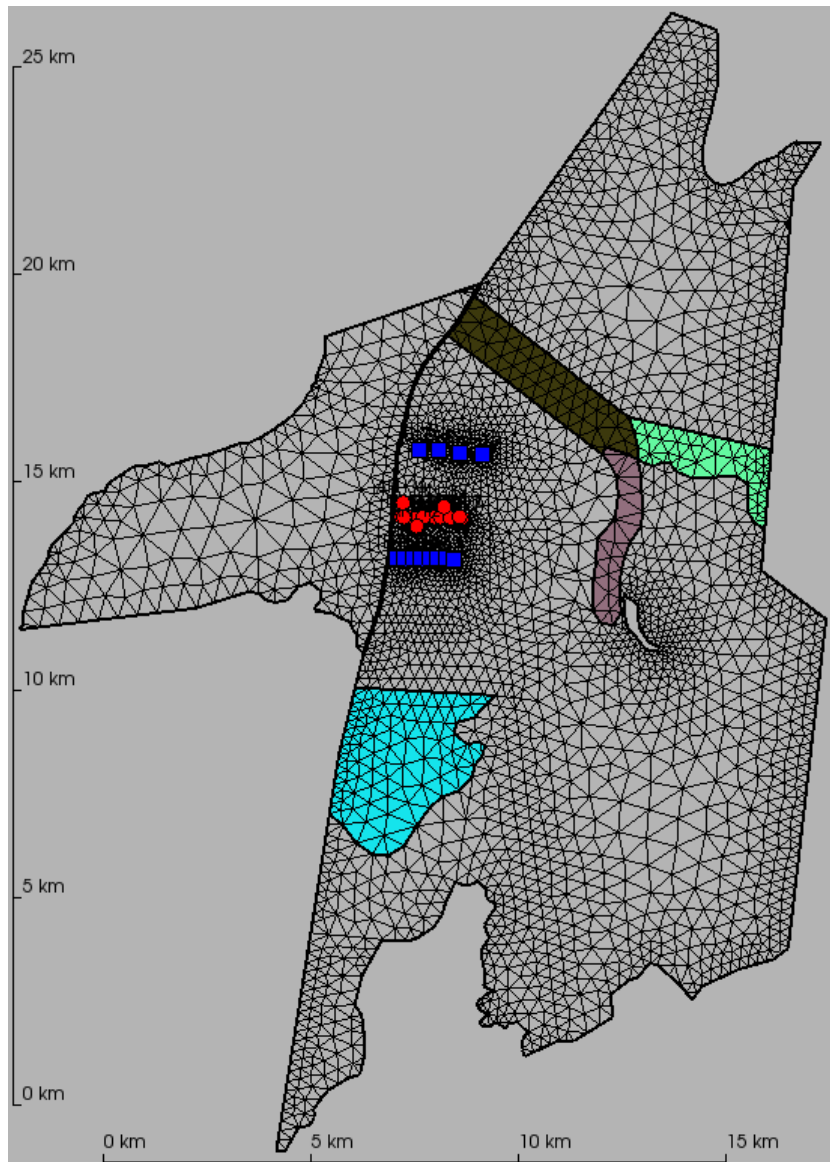


Рисунок 3.26 – Границы зон неоднородности в модельном слое 4

Зона неоднородности в 5 слое (горизонт II) приведена на рисунке 3.27. Жёлтая и бесцветная зоны имеют параметры II горизонта, как в таблице 3.11. Зона неоднородности (синяя) в центре расчётной области имеет следующие параметры:

- горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,1,
- вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,001.

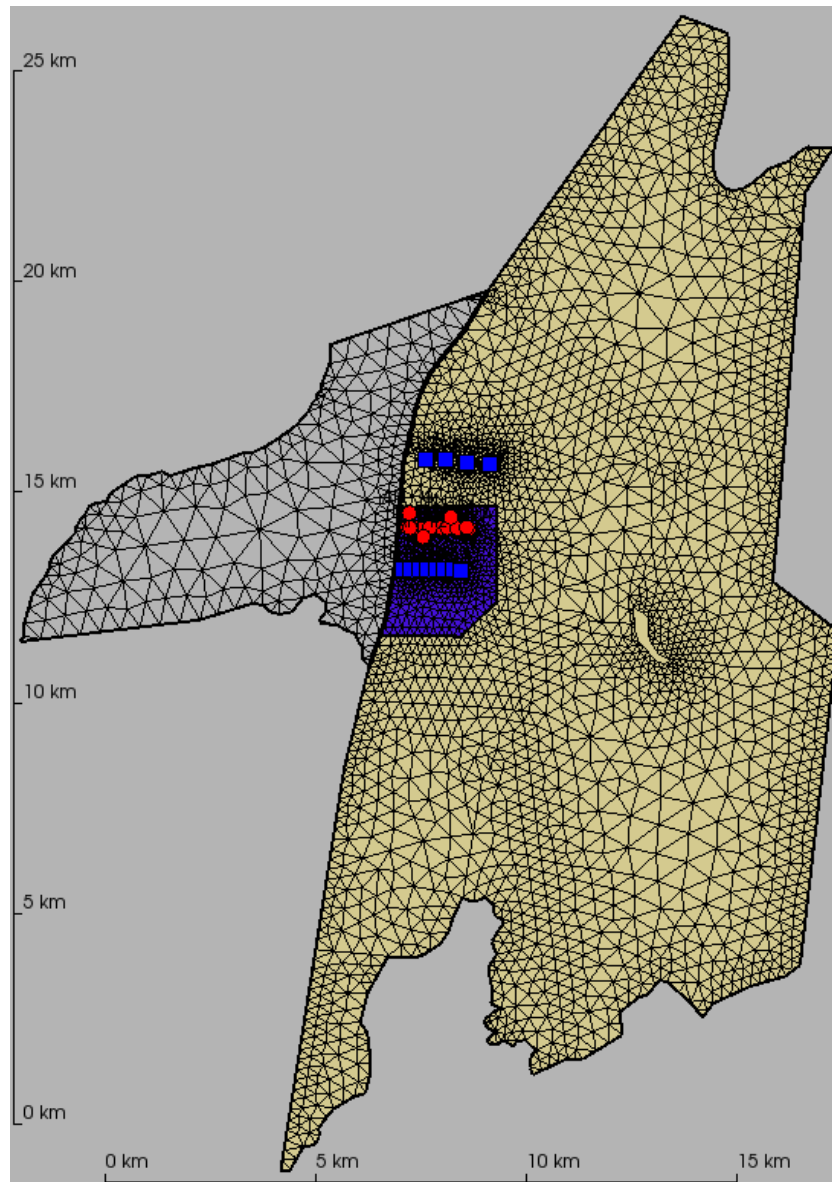


Рисунок 3.27 – Границы зон неоднородности в модельном слое 5

Зоны неоднородности в слоях 6-8 (W, F, B) представлены на рисунке 3.28. Зона 1 и зона 2 аналогичны по своим свойствам, имеют следующие параметры, а именно:

- горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,001,
- вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,00001.

Зона 3, зона 4 и зона 5 имеют повышенные свойства для создания области питания горизонта I. В данной области горизонт имеет питание согласно материалам отчёта [68]. По результатам калибровки модели для нее установлены следующие параметры:

- горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,001,
- вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,00008.

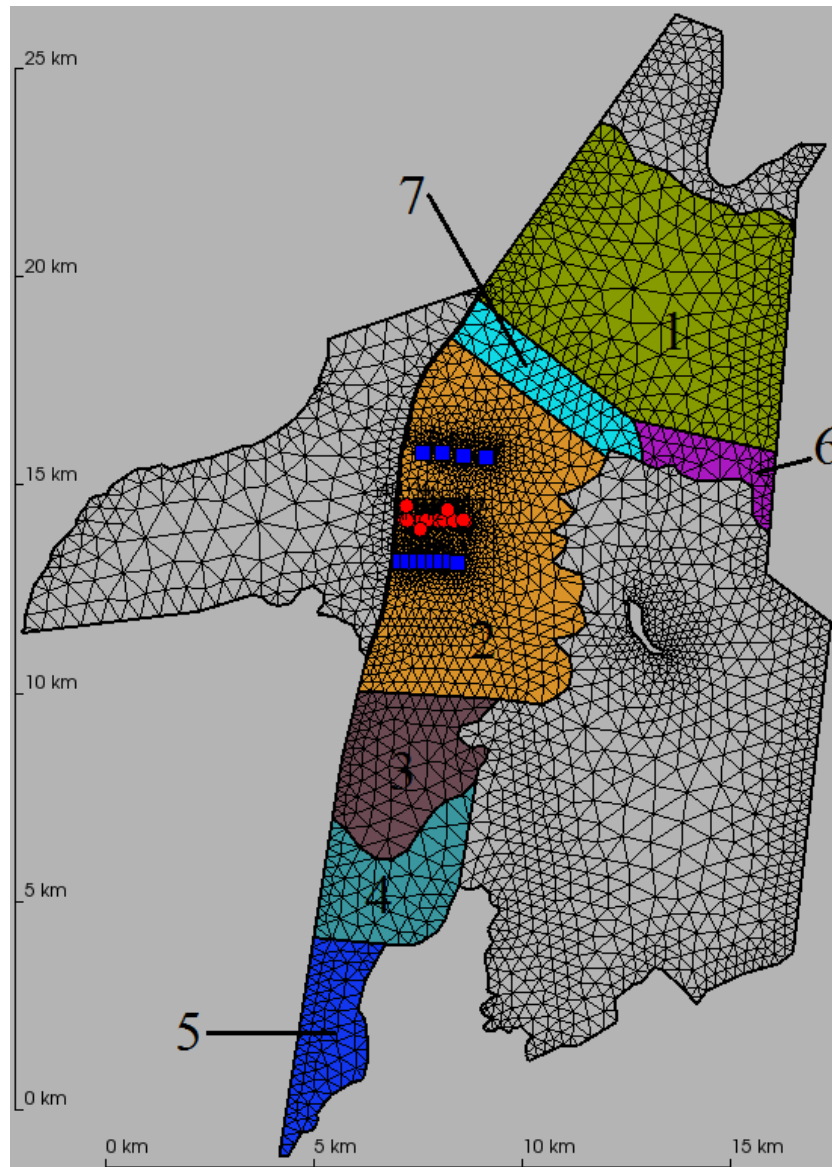


Рисунок 3.28 – Границы зон неоднородности в модельных слоях с 6 по 8

Бесцветная область (весь остальной горизонт) имеет свойства, как в таблице 3.11 для горизонтов W, F и B (одинаковые).

Зона 6 и зона 7 имеют следующие свойства:

- горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,002,
- вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,0002.

В горизонте I заданы зоны неоднородности, показанные на рисунке 3.29. Жёлтая зона имеет параметры согласно таблице 3.11 для I горизонта.

Фиолетовая зона имеет повышенные параметры горизонтального коэффициента фильтрации:

- горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,5,

— вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,5.

Светлая зона в разломной области (слева от разлома) имеет следующие параметры:

— горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,8,

— вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,8.

Тёмная зона в разломной области (слева от разлома) имеет следующие параметры:

— горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,01,

— вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут – 0,01.

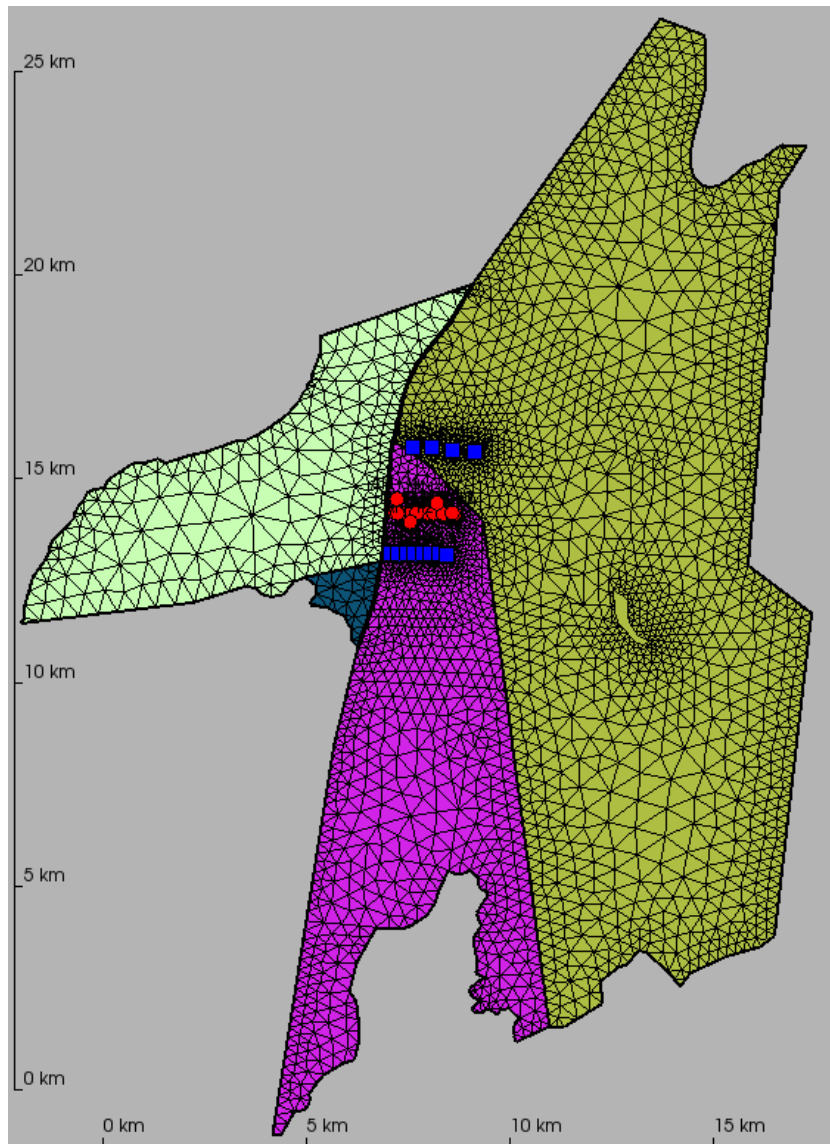


Рисунок 3.29 – Границы зон неоднородности в модельном слое 9

Если сопоставить принятые в модели коэффициенты фильтрации основных горизонтов (I и II) с данными кустовых откачек, то окажется, что модельные данные выше, так как большинство определений коэффициентов фильтрации по данным откачек лежит в заданных на

модели зонах неоднородности с высокими фильтрационными свойствами. Занижение фактических коэффициентов фильтрации связано с тем, что центральные скважины кустовых откачек были расположены вблизи непроницаемой границы – разлома, а обработаны откачки были графоаналитическим методом по поздним участкам прямых, когда влияние непроницаемой границы существенно. Это привело к занижению коэффициентов фильтрации, полученных при обработке откачек. Так как при моделировании разлом учитывался, то полученные на модели параметры являются более достоверными.

Если же сопоставить принятые в модели коэффициенты фильтрации основных горизонтов (I и II) с данными одиночных откачек, то окажется, что модельные данные попадают в диапазоны изменения коэффициентов фильтрации по одиночным откачкам:

— для I горизонта диапазон варьирования коэффициента фильтрации составляет от 0,004 м/сут до 1,61 м/сут;

— для II горизонта диапазон составляет от 0,02 м/сут до 0,99 м/сут.

Согласно таблице 3.10 отдельные одиночные откачки дают коэффициенты фильтрации, превышающие модельные. Это связано с двумя причинами. Одна из них обусловлена тем, что одиночные откачки были обработаны по данным восстановления без учета наследия откачки. Это допустимо только для начальных моментов восстановления. Но для обработки были выбраны поздние участки кривых восстановления. Другой причиной является наличие ложностационарных участков (выполаживаний) экспериментальных кривых, связанных со слоистым строением водовмещающей толщи. Это тоже приводит к завышению фильтрационных свойств при интерпретации опытов.

Также стоит отметить, что принятые в модели коэффициенты фильтрации лежат в диапазонах, описанных в [16]: в этой работе диапазон варьирования коэффициента фильтрации в опущенном блоке для I горизонта составляет от 0,3 м/сут до 1,6 м/сут, для II горизонта – от 0,1 м/сут до 2,2 м/сут.

В результате проверки проницаемости разлома в ходе откачек на полигоне в феврале-августе 1967 года был сделан вывод об отсутствии перетока из опущенного блока в приподнятый блок [79]. Коэффициент фильтрации локального разлома был принят равным $1 \cdot 10^{-7}$ м/сут в обоих направлениях по результатам калибровки модели по скважинам (см. раздел 4.2).

Принятые в модели коэффициенты фильтрации слабопроницаемых слоёв хорошо согласуются с таблицей результатов определения фильтрационных свойств разделяющих

глинистых горизонтов территории размещения полигона «Северный», взятой из [52] (таблица 3.12).

Таблица 3.12 – Результаты определения фильтрационных свойств разделяющих глинистых горизонтов в районе хранилища «полигон Северный»

№ п/п	Вид исследования	Коэффициенты фильтрации разделяющих (слабопроницаемых) слоёв, м/сутки		Примечание
		нижнего*	верхнего**	
1	По анализу естественного режима:			
1.1	аналитически	$0,7 \cdot 10^{-4}$ $1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$ $6 \cdot 10^{-4}$	
1.2	моделированием	$(1-3) \cdot 10^{-3}$ $(3-5) \cdot 10^{-4}$	$(3-4) \cdot 10^{-3}$ $(2-7) \cdot 10^{-4}$	у р. Б. Тель на водоразделе
2	По температурному методу	$1,1 \cdot 10^{-3}$ $0,5 \cdot 10^{-4}$	-	в центре участка
3	По лабораторным данным (монолиты глинистых прослоев)	$10^{-4} \div 10^{-6}$	$10^{-4} \div 10^{-6}$	

Примечание: */ нижний горизонт – это объединенные горизонты Б, Ф, и В;

**/ верхний горизонт – горизонт Г.

3.4.2.2 Емкостные параметры модели

Коэффициент принятой в модели упругой емкости пород приведён в таблице 3.13. Данные значения были выбраны после калибровки модели и ее верификации по фактическим данным; хорошо согласуются со значениями, приведёнными в [52].

Таблица 3.13 – Коэффициент упругой ёмкости, принятый для слоёв модели

№ слоя модели	Индекс геологического слоя	Коэффициент упругой ёмкости, m^{-1}
1	Q	$1 \cdot 10^{-4}$
2	D	$1 \cdot 10^{-5}$
3	III	$1 \cdot 10^{-5}$
4	G	$1 \cdot 10^{-5}$
5	II	$1 \cdot 10^{-6}$
6	W	$1 \cdot 10^{-5}$
7	F	$1 \cdot 10^{-5}$
8	B	$1 \cdot 10^{-5}$
9	I	$1 \cdot 10^{-6}$
10	A	$1 \cdot 10^{-5}$

3.4.2.3 Миграционные параметры модели

При проведении расчетов миграции были приняты нижеследующие параметры для всех слоёв модели:

- эффективный коэффициент диффузии равен $1 \cdot 10^{-5}$ м²/сут,
- коэффициент продольной дисперсии равен 10 м,
- коэффициент поперечной дисперсии равен 1 м,
- плотность пород равна 2000 кг/м³;

Коэффициент принятой в модели активной пористости пород приведён в таблице 3.14. Данные значения были получены в результате калибровки модели, частично взяты из работы [52].

Таблица 3.14 – Коэффициенты активной пористости и пористости матрицы, принятые для слоёв модели

№ слоя модели	Горизонт	Активная пористость среды, -	Пористость матрицы, -
1	Q	0,25	0
2	D	0,25	0
3	III	0,25	0
4	G	0,25	0
5	II	0,02	0,11
6	W	0,25	0
7	F	0,25	0
8	B	0,25	0
9	I	0,02	0,05
10	A	0,25	0

Коэффициент массообмена для эксплуатационных горизонтов равен $1 \cdot 10^{-5}$ сут⁻¹, принят по результатам калибровки фактических данных по скважинам (см. раздел 3.2).

3.4.2.4 Сорбционные параметры модели

На основе проведенных верификационных расчетов было принято следующее значение коэффициента сорбционного распределения для ⁹⁰Sr в I и II эксплуатационных горизонтах: в немобильной зоне K_d составляет 0,02 м³/кг (данное значение консервативно – на порядок ниже типичного значения для глин согласно [80, 81]), в каналах консервативно принят нулевой коэффициент распределения. Нитрат-ион считался несорбируемым.

Во всех остальных слоях модели K_d для ⁹⁰Sr консервативно принят 0,001 м³/кг [80].

3.5 Выводы к главе 3

Данная глава – основная исследовательская часть диссертационной работы. Исследование, направленное на создание неоднородных коэффициентов фильтрации модели, дало понимание отсутствия необходимости детального учета фильтрационной неоднородности на столь сложном объекте, и позволило с учетом знаний о местах питания и разгрузки эксплуатационных горизонтов вручную откалибровать фильтрационные параметры с приемлемой степенью неоднородности (окончательные фильтрационные параметры и зоны неоднородности приведены в следующей главе). Выбранные модельные значения позволили уточнить диапазоны параметров, определенные в [16].

Модель массопереноса в среде с двойной пористостью крайне необходима на объектах таких типов ввиду корректного отражения реальности распространения ореолов загрязнения в плане в неоднородных песчано-глинистых пластах-коллекторах. Сравнение результатов моделирования с применением однопористой модели и с применением двойной пористости показало, что в последнем случае фактическая картина распространения загрязнения по скважинам воспроизводится более точно. Приняты следующие параметры двойной пористости:

I пласт-коллектор: мобильная пористость – 0,02, немобильная пористость – 0,05;

II пласт-коллектор: мобильная пористость – 0,02, немобильная пористость – 0,11.

Коэффициент массообмена для обоих пластов-коллекторов принят равным $1 \cdot 10^{-5}$ сут⁻¹.

В третьем разделе главы приводится исследование по обоснованию фильтрационно-емкостных параметров модели на примере II пласта-коллектора. Значение активной пористости, равное 0,02 подтверждается детальным сравнением модельной и фактической концентраций в нескольких наблюдательных скважинах, расположенных достаточно близко от скважины нагнетания и «чувствующих» закачку именно от нее.

Разработанная модель состоит из 10 модельных слоев, включает в себя оба пласта-коллектора – горизонта закачки ЖРО, а также водоупорные слои территории размещения ПГЗ ЖРО «Северный».

4 Разработка трехмерной модели ПГЗ ЖРО полигон «Северный»

4.1 Анализ неопределенностей и достоверности фактических данных и рекомендации по организации мониторинга

В настоящем разделе проводится анализ исходных данных об объеме и составе закачиваемых в подземное пространство ЖРО и анализ данных мониторинга концентрации и удельной активности компонентов ЖРО в наблюдательных скважинах. Целью анализа является принципиальное понимание неопределенностей в исходных данных и возможностях воспроизведения результатов мониторинга на модели. Здесь, по взаиморасположению скважин, определяется, в зону влияния каких нагнетательных скважин попадают те или иные мониторинговые скважины, и далее оценивается адекватность соответствия наблюдений и закачки. Ниже представлен анализ для нитрат-иона. Данные по закачивающим скважинам имеют статус ДСП.

4.1.1 II эксплуатационный горизонт

Расположение нагнетательных и мониторинговых скважин показано на рисунке 4.1. Для анализа достоверности фактических данных по замерам концентрации нитрат-иона в наблюдательных скважинах были проанализированы графики дебита закачки по нагнетательным скважинам (скважины Н-7, Н-8, Н-9, Н-10, АН-31, АН-33) на II горизонт и графики концентрации нитрата натрия в закачиваемых в эти нагнетательные скважины растворах. Исходя из проанализированных данных был сделан вывод, что концентрация нитрат-иона в закачке во всех нагнетательных скважинах не снижается ниже 1-1,5 г/л в течение всего рассматриваемого времени эксплуатации полигона «Северный» – с 1967 по 2011 годы.

Фактические величины концентраций нитрат-иона в наблюдательной скважине П-20, расположенной ниже по потоку в сторону р. Кан (рисунок 4.1), позволяют усомниться в качестве этих замеров. Исходя из анализа графиков закачки был сделан вывод о достаточно регулярном поступлении стабильно высокой концентрации нитрат-иона в нагнетательную скважину Н-8, являющуюся ближайшей нагнетательной скважиной во II горизонте к наблюдательной скважине П-20. Дебит закачки в скважину Н-8 выглядит весьма регулярным (3-4 месяца в году всегда присутствует закачка) и высоким: в среднем 250-300 м³/сут. Однако в наблюдательной скважине П-20, при этом, наблюдалось непонятное падение концентрации нитрат-иона после 1980 года при сохранении стабильного дебита закачки.

Похожая ситуация наблюдается в ряде других скважин на II горизонт, а именно: в скважине А-18, которая располагается выше по потоку, скважине С-1 и скважине П-14. После 1980 года наблюдается снижение концентрации нитрат-иона в этих скважинах.

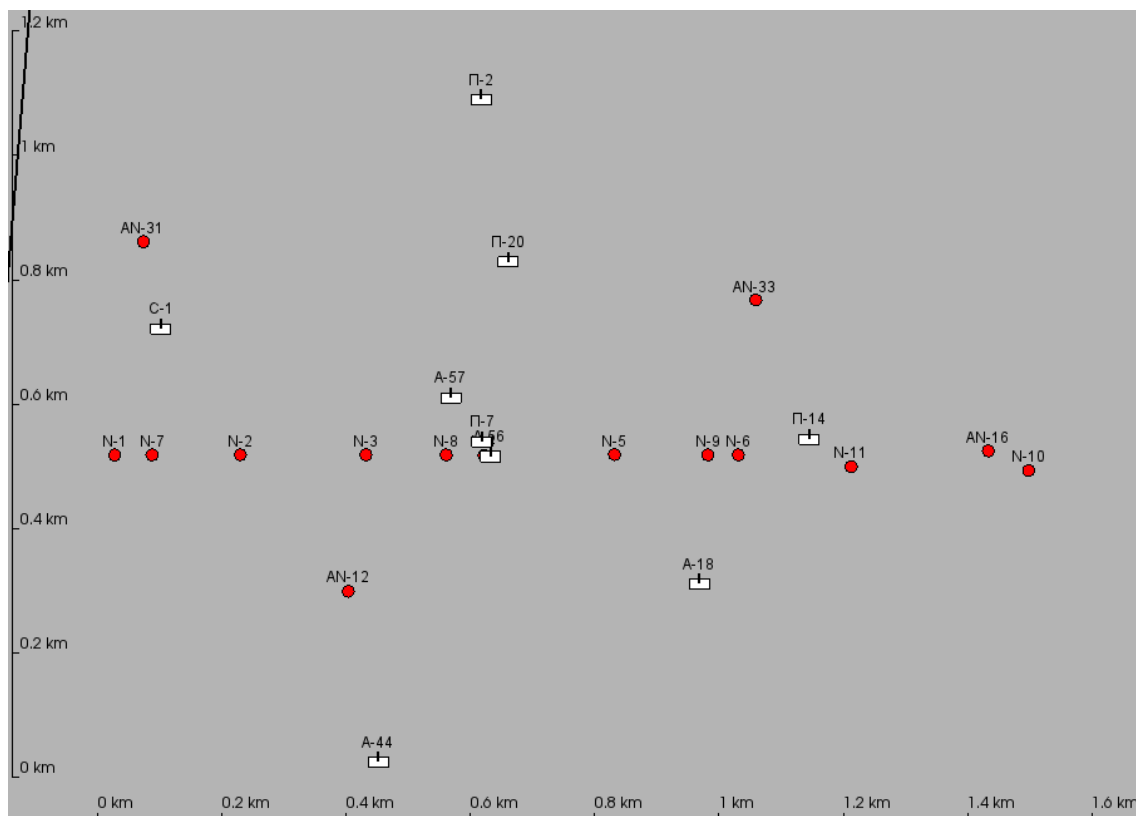


Рисунок 4.1. Схема расположения наблюдательных скважин II горизонта относительно нагнетательных скважин

Предположительной причиной снижения концентрации нитрат-иона в этих скважинах может быть их кольтматация и разрушение фильтровых зон со временем. Воспроизвести данный эффект в модели представляется затруднительным. Стоит также отметить, что перед пробоотбором скважины не прокачивались.

В скважине С-1, расположенной ниже по потоку от нагнетательной скважины Н-7, ожидается наиболее существенное влияние режима работы скважины Н-7 на результаты замеров. Согласно графику изменения дебита закачки от времени в нагнетательной скважине Н-7, закачка прекратилась после 1994 года. Однако концентрация нитрат-иона в скважине С-1 упала ещё в 1980 году. Одиночные замеры в середине 2006 года, превышающие ПДК в воде в 10-30 раз, предположительно связаны с закачкой в нагнетательную скважину АН-31, также находящуюся недалеко от скважины С-1.

В скважине А-18 падение концентрации нитрат-иона на позднем этапе представляется адекватным (с 1993 года по начало 2000-ых годов замеры отсутствуют, далее после 2002 года наблюдаются низкие концентрации), так как в нагнетательной скважине Н-9, ближайшей к А-18, закачка прекратилась. Однако в скважине П-14, которая также чувствительна к закачке в Н-9, падение концентрации нитрат-иона практически до нуля наблюдается с 1980 года. Наибольшее влияние на измерения в П-14 должны оказывать ближайшие скважины Н-9 и Н-10.

При том, что их режим работы мало изменяется после 1980-го года, резкое снижение наблюдаемой концентрации нитрат-иона в этой скважине необъяснимо.

Несколько скважин, П-7, А-56 и А-57, находятся поблизости от нагнетательной скважины Н-8 (рисунок 4.1), и максимальное влияние закачки на измерения в них ожидается именно от скважины Н-8. Скважины П-7 и А-56 расположены очень близко друг к другу – на расстоянии менее 30 метров (весьма малое расстояние на масштабах модели), примерно на одинаковом расстоянии от Н-8 (60-70 метров). В связи с этим пики наблюдаемых концентраций в этих скважинах должны приблизительно совпадать. Однако это не так. Пиковые значения отличаются примерно в два раза, что может быть следствием неоднородности пласта на масштабах десятков метров, однако такие неоднородности достоверно не могут быть определены и воспроизведены в модели.

Также замечено, что в нагнетательную скважину Н-8, по имеющимся данным, не производилась закачка в 1971-ом году. При этом в наблюдательной скважине П-7 по мониторингу пик в 1971-ом году наблюдается, по аналогии с 1972-ым. То же самое наблюдается в близлежащей скважине А-56 и необъяснимо исходными данными по закачке.

В скважине П-7 в первые 30 лет эксплуатации полигона пики концентраций нитрат-иона всегда были выше, чем в скважине А-56. После 2000 года ситуация кардинально изменилась: в П-7 концентрация упала до нуля, в А-56 и А-57 наблюдаются существенные значения концентрации нитрат-иона около 1 г/л. Последнее ставит под сомнение, как минимум, результаты замеров в скважине П-7. Естественно, они не могут быть воспроизведены моделью. При этом, в скважине А-56 можно наблюдать пик концентрации нитрат-иона 1 июня 2009 года, соответствующий 2,6 г/л. Если же посмотреть на график закачки нитрат-иона в скважину Н-8, то можно видеть, что, начиная с 2003 года, концентрация в закачке не превышала 2 г/л. Соответственно, данный пик не может быть повторен при заданных исходных данных. Также невозможно повторить и пик скважины А-57: 10.07.2002, фактическая концентрация нитрат-иона составляет 7,72 г/л.

Стоит выделить особенность, характерную для всех рядов наблюдений: графики демонстрируют пилообразную форму, вслед за пиками, наблюдающимися в периоды закачки, следуют падения концентрации, зачастую – до нуля. Причиной этого снижения концентрации в замерах предполагается застойный режим: отсутствие прокачки скважины при отборе проб, что в будущем необходимо выполнять. Производился отбор застоявшейся воды, в которой концентрация нитрат-иона могла уменьшиться вследствие нитрат-редукции или других процессов. То есть, в отсутствие прокачки скважин нельзя считать, что замеры в ней корректно отражают геохимическое состояние раствора в окружающем пласте.

4.1.2 I эксплуатационный горизонт

Из всех 87 скважин модели, имеющих замеры по нитрат-иону, всего 29 скважин имеют в своих наблюдениях уровни, хотя бы один раз превышающие ПДК по нитрат-иону в питьевой воде. Однако из этих 29 скважин регулярные замеры, превышающие ПДК, наблюдаются в только 21 скважине. В остальных 8 скважинах превышение ПДК наблюдается только в одном измерении, доверия к которому нет. В связи с этим было принято решение проводить верификацию модели с натурными данными по тем скважинам, в которых регулярно появлялись высокие концентрации (много выше УВ). Таких скважин на I горизонт всего десять. Из этих скважин по потоку, в сторону р. Кан, расположены лишь 4 скважины: П-1, А-4, П-11 и А-32 (рисунок 4.2), остальные расположены выше по потоку.

Заметим, что скважина А-4 расположена в непосредственной близости от нагнетательной скважины Н-6. Концентрация нитрат-иона в растворе, закачиваемом в скважину Н-6, не опускается ниже 90 г/л в течение всего времени эксплуатации полигона с 1967 г. по 2011 г. Однако малочисленные замеры концентрации нитрат-иона в скважине А-4 не превышают 6 г/л, что позволяет поставить замеры в наблюдательной скважине под сомнение. При анализе паспорта этой скважины выявлено, что она «обсажена глухой трубой», также отсутствие фильтра у этой скважины отмечается на разрезах.

Мониторинговая скважина П-11 расположена в зоне возможного влияния нагнетательных скважин Н-6, Н-11 (ближайшая), АН-16. На графике фактических данных измеренной концентрации нитрат-иона наблюдается резкий рост в 2009-2010 годах (до 80 г/л). Скважины Н-6 и Н-11 при этом работали без серьезных изменений режима, а АН-16 вовсе не функционировала с 2006 года до осени 2010 года. То есть, этот рост не соответствует имеющимся исходным данным о закачке.

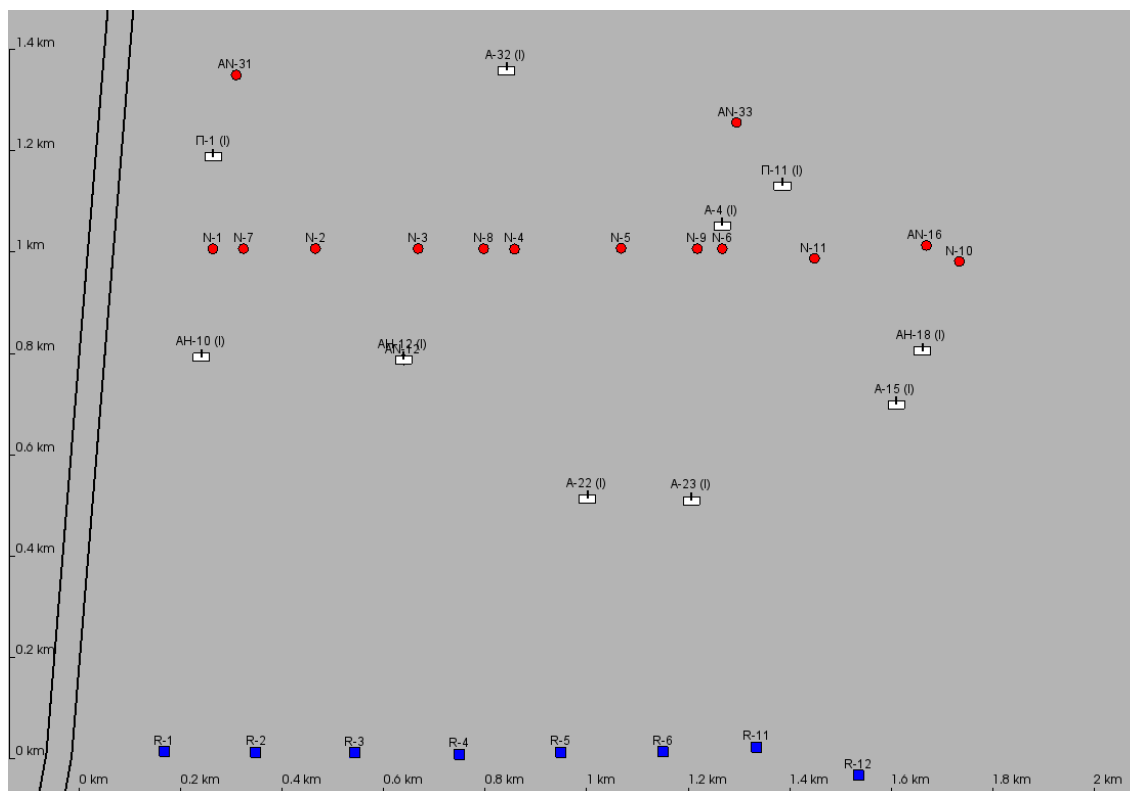


Рисунок 4.2. Схема расположения наблюдательных скважин I-го эксплуатационного горизонта относительно скважин закачки

4.2 Калибровка фильтрационных свойств Правобережного разлома в модели

В данном разделе приводятся результаты калибровки фильтрационных свойств Правобережного разлома в разработанной модели.

В качестве доказательства корректности низкой величины коэффициента фильтрации локального разлома (по данным полевых исследований – непроницаемый) в итоговой модели решено было взять три значения – 10^{-7} м/сут, 10^{-5} м/сут и 10^{-3} м/сут, и сравнить результаты моделирования стационарной задачи.

В разделе 4.3.1 приведены отклонения модельных напоров от фактических напоров для стационарной задачи со значением коэффициента фильтрации локального разлома, равным 10^{-7} м/сут (итоговое значение); стандартное отклонение модельных напоров от фактических по скважинам составило 3,1 м. При максимальном перепаде фактических напоров, равном 97 м, относительная погрешность геофильтрационной модели составила 3,2 %.

Для стационарной геофильтрационной модели с величиной коэффициента фильтрации локального разлома, равной 10^{-5} м/сут, стандартное отклонение модельных напоров от фактических по скважинам также составило 3,1 м, относительная погрешность геофильтрационной модели составила 3,2 % (таблица 4.1), как и для случая с коэффициентом фильтрации локального разлома, равным 10^{-7} м/сут.

Для стационарной геофильтрационной модели с величиной коэффициента фильтрации локального разлома, равной 10^{-3} м/сут, стандартное отклонение модельных напоров от фактических по скважинам составило 7,0 м, относительная погрешность геофильтрационной модели составила 7,3 % (таблица 4.2).

Таким образом, можно констатировать, что при повышении коэффициента фильтрации локального разлома с величины 10^{-7} м/сут до 10^{-5} м/сут геофильтрационная модель не претерпевает существенных изменений. Однако в итоговой модели принята величина, равная 10^{-7} м/сут, для наибольшей уверенности в непроницаемости разлома.

Таблица 4.1 – Расчёт отклонений модельных напоров от фактических напоров для стационарной задачи с коэффициентом фильтрации локального разлома равным 10^{-5} м/сут

Скважина	Горизонт	X	Y	Напор, м		Разность напоров, м
				Фактический	Модельный	
П-1	I	20828,9	22685,6	182,3	184,739	-2,4
П-10	I	20300,5	22142,2	141,1	141,845	-0,7
П-12	I	22113,6	23328	181,4	182,842	-1,4
П-13	II	21251,9	23823,2	170,0	166,527	3,5
П-15	II	22193,2	23391,8	169,2	167,096	2,1
П-2(I)	I	21415,8	23075,1	182,2	183,9	-1,7
П-3	I	21345,8	22431,4	182,3	185,116	-2,8
П-4	I	20361,1	23047	140,4	141,624	-1,2
П-6	II	21508,7	23119,8	172,2	168,47	3,7
П-7	II	21417,3	22526,3	173,6	173,826	-0,2
П-8	I	20581,7	22916,6	140,3	141,653	-1,4
П-9	I	19250	23260	140,4	141,537	-1,1
С-1	II	20901,8	22707,5	174,1	172,743	1,4
С-10	II	23610	21350	174,2	174,146	0,1
С-13	I	27320	26020	166,5	159,44	7,0
С-14	I	19660	25380	141,6	141,28	0,3
С-15	II	23243,7	23861,7	164,7	163,554	1,1
С-16	II	24700	24580	154,4	158,332	-3,9
С-17	I	26640	28820	156,2	155,723	0,5
С-2	II	25270	27170	158,7	151,888	6,8
С-21	II	23640	28910	150,9	151,215	-0,3
С-3	II	22280	26460	167,8	168,444	-0,6
С-31	I	19650	17360	197,9	200,861	-3,0
С-36	I	21360	25790	165,8	172,926	-7,1
С-37	I	22200	27670	140,8	141,29	-0,5
С-4	I	20910	25750	143,7	141,294	2,4
С-5	I	17050	23950	140,9	141,211	-0,3
С-6	II	21116,2	21165,9	192,3	186,967	5,3

Скважина	Горизонт	X	Y	Напор, м		Разность напоров, м
				Фактический	Модельный	
С-8	II	20630	19410	205,3	201,451	3,8
Стандартное отклонение модельных напоров от натуральных, м						3,1
Максимальный диапазон изменения натуральных напоров в пределах области расположения контрольных скважин, м						97
Относительная погрешность геофильтрационной модели, %						3,2

Таблица 4.2 – Расчёт отклонений модельных напоров от фактических напоров для стационарной задачи с коэффициентом фильтрации локального разлома равным 10^{-3} м/сут

Скважина	Горизонт	X	Y	Напор, м		Разность напоров, м
				Фактический	Модельный	
П-1	I	20828,9	22685,6	182,3	181,315	1,0
П-10	I	20300,5	22142,2	141,1	155,003	-13,9
П-12	I	22113,6	23328	181,4	179,527	1,9
П-13	II	21251,9	23823,2	170,0	166,983	3,0
П-15	II	22193,2	23391,8	169,2	167,422	1,8
П-2(I)	I	21415,8	23075,1	182,2	180,464	1,7
П-3	I	21345,8	22431,4	182,3	181,87	0,4
П-4	I	20361,1	23047	140,4	154,533	-14,1
П-6	II	21508,7	23119,8	172,2	168,985	3,2
П-7	II	21417,3	22526,3	173,6	174,642	-1,0
П-8	I	20581,7	22916,6	140,3	154,638	-14,3
П-9	I	19250	23260	140,4	154,117	-13,7
С-1	II	20901,8	22707,5	174,1	173,782	0,3
С-10	II	23610	21350	174,2	174,274	-0,1
С-13	I	27320	26020	166,5	158,382	8,1
С-14	I	19660	25380	141,6	153,788	-12,2
С-15	II	23243,7	23861,7	164,7	163,666	1,0
С-16	II	24700	24580	154,4	158,315	-3,9
С-17	I	26640	28820	156,2	154,563	1,6
С-2	II	25270	27170	158,7	151,799	6,9
С-21	II	23640	28910	150,9	151,108	-0,2
С-3	II	22280	26460	167,8	165,439	2,4
С-31	I	19650	17360	197,9	199,326	-1,4
С-36	I	21360	25790	165,8	169,069	-3,3
С-37	I	22200	27670	140,8	153,915	-13,1
С-4	I	20910	25750	143,7	153,904	-10,2
С-5	I	17050	23950	140,9	153,016	-12,1
С-6	II	21116,2	21165,9	192,3	188,244	4,1
С-8	II	20630	19410	205,3	201,84	3,5
Стандартное отклонение модельных напоров от натуральных, м						7,0

Скважина	Горизонт	X	Y	Напор, м		Разность напоров, м
				Фактический	Модельный	
Максимальный диапазон изменения натуральных напоров в пределах области расположения контрольных скважин, м						97
Относительная погрешность геофильтрационной модели, %						7,3

4.3 Верификация расчётной модели

4.3.1 Стационарная фильтрационная задача

В качестве начальных условий при моделировании геофильтрации на территории расположения полигона взято состояние на начало 1967 года, до начала закачки. Предполагалось, что до этого времени гидрогеологический режим площадки полигона являлся стационарным. Ключевым этапом подготовки геофильтрационной модели является калибровка стационарного состояния до начала закачки ЖРО.

Для стационарной геофильтрационной модели (время – 02.01.1967) были получены данные замеров напоров и карты гидроизопьез в I и II эксплуатационных горизонтах полигона. По итогам расчетов стационарной задачи были получены значения модельного напора в скважинах. Стандартное отклонение модельных напоров от фактических по скважинам составило 3,1 м. При максимальном перепаде фактических напоров, равным 97 м, относительная погрешность геофильтрационной модели составляет 3,2 %.

При верификации по скважинам были взяты только те из них, которые имели фильтр строго только в I или только во II эксплуатационных горизонтах. Скважины, захватывающие своей фильтровой частью слабопроницаемые покрывающие горизонты, не учитывались (например, С-2 с фильтром типа I+Б). Однако они отмечены на картах гидроизопьез, и по ним также возможно качественно оценить близость модели к реальности.

Таблица 4.3 – Расчёт отклонений модельных напоров от фактических напоров для стационарной задачи

Скважина	Горизонт	X	Y	Напор, м		Разность напоров, м
				Фактический	Модельный	
П-1	I	20828,9	22685,6	182,3	184,832	-2,5
П-10	I	20300,5	22142,2	141,1	141,495	-0,4
П-12	I	22113,6	23328	181,4	182,931	-1,5
П-13	II	21251,9	23823,2	170,0	166,526	3,5
П-15	II	22193,2	23391,8	169,2	167,095	2,1
П-2	I	21415,8	23075,1	182,2	183,993	-1,8
П-3	I	21345,8	22431,4	182,3	185,205	-2,9
П-4	I	20361,1	23047	140,4	141,281	-0,9

Скважина	Горизонт	X	Y	Напор, м		Разность напоров, м
				Фактический	Модельный	
П-6	II	21508,7	23119,8	172,2	168,468	3,7
П-7	II	21417,3	22526,3	173,6	173,819	-0,2
П-8	I	20581,7	22916,6	140,3	141,309	-1,0
П-9	I	19250	23260	140,4	141,202	-0,8
С-1	II	20901,8	22707,5	174,1	172,733	1,4
С-10	II	23610	21350	174,2	174,146	0,1
С-13	I	27320	26020	166,5	159,469	7,0
С-14	I	19660	25380	141,6	140,945	0,7
С-15	II	23243,7	23861,7	164,7	163,556	1,1
С-16	II	24700	24580	154,4	158,334	-3,9
С-17	I	26640	28820	156,2	155,755	0,4
С-2	II	25270	27170	158,7	151,891	6,8
С-21	II	23640	28910	150,9	151,219	-0,3
С-3	II	22280	26460	167,8	168,523	-0,7
С-31	I	19650	17360	197,9	200,907	-3,0
С-36	I	21360	25790	165,8	173,025	-7,2
С-37	I	22200	27670	140,8	140,945	-0,1
С-4	I	20910	25750	143,7	140,955	2,7
С-5	I	17050	23950	140,9	140,897	0,0
С-6	II	21116,2	21165,9	192,3	186,952	5,3
С-8	II	20630	19410	205,3	201,448	3,9
Стандартное отклонение модельных напоров от натуральных, м						3,1
Максимальный диапазон изменения натуральных напоров в пределах области расположения контрольных скважин, м						97
Относительная погрешность геофильтрационной модели, %						3,2

На рисунке 4.3 представлена гистограмма частоты встречаемости разницы между модельными и фактическими данными по скважинам на стационарный период.

В качестве эталонов были выбраны данные по скважинам на стационарный режим и фактические карты гидроизогипс I и II эксплуатационных горизонтов, построенные по этим данным и взятые из отчетов ДСП по полигону.

На рисунке 4.4 представлена диаграмма рассеяния на стационарный период времени по скважинам модели на I и II горизонт.

На рисунках 4.5–4.6 представлены результаты моделирования стационарной задачи для I горизонта. Модельные гидроизогипсы на рисунке 4.6 хорошо согласуются с данными фактических замеров уровня по скважинам.

На рисунках 4.7–4.8 представлены результаты моделирования стационарной задачи для II горизонта. Модельные гидроизогипсы на рисунке 4.8 хорошо согласуются с данными фактических замеров уровня по скважинам.

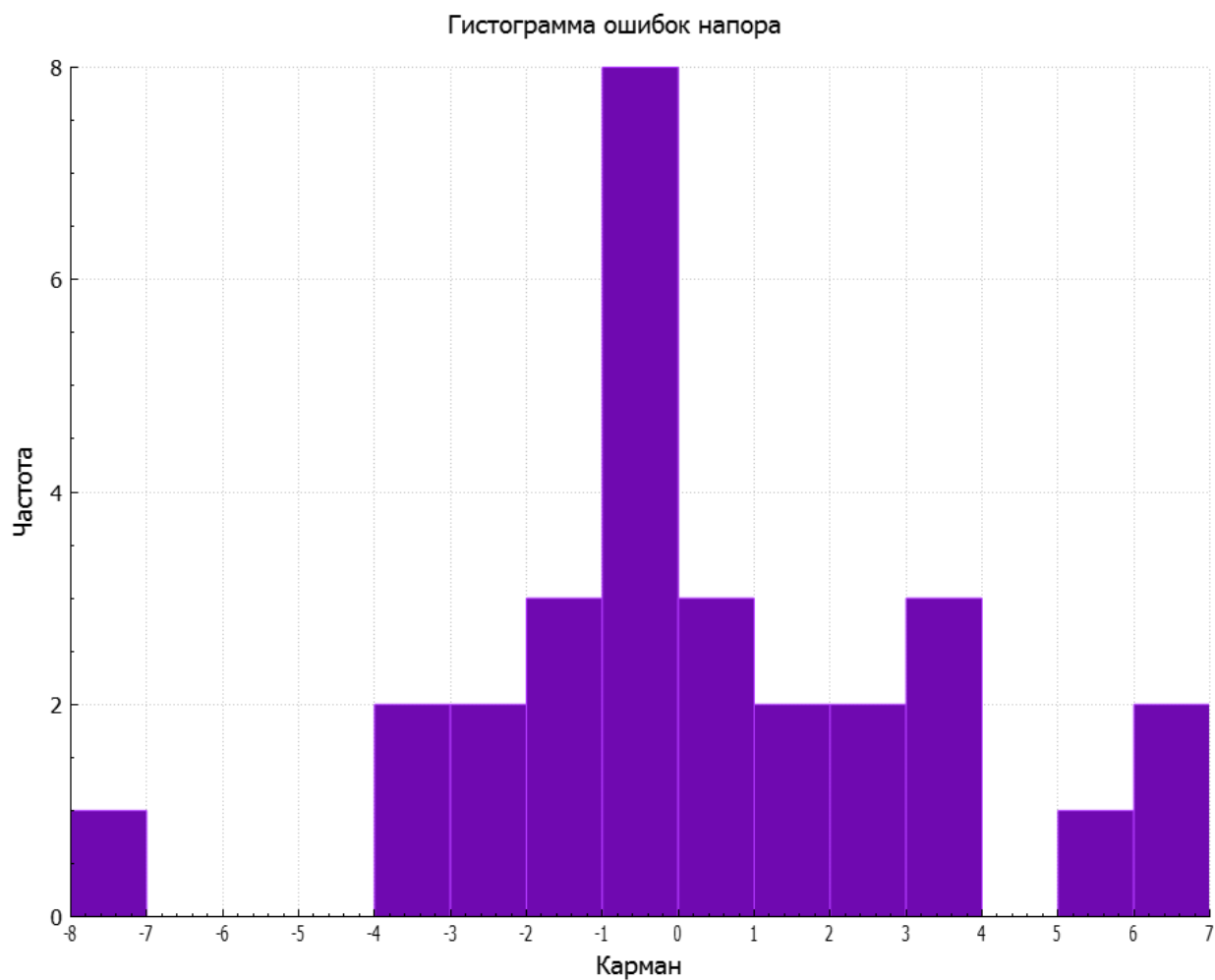


Рисунок 4.3 – Гистограмма частоты встречаемости разницы между фактическими и расчётными данными по скважинам на стационарный период

Сопоставление фактических и расчетных данных

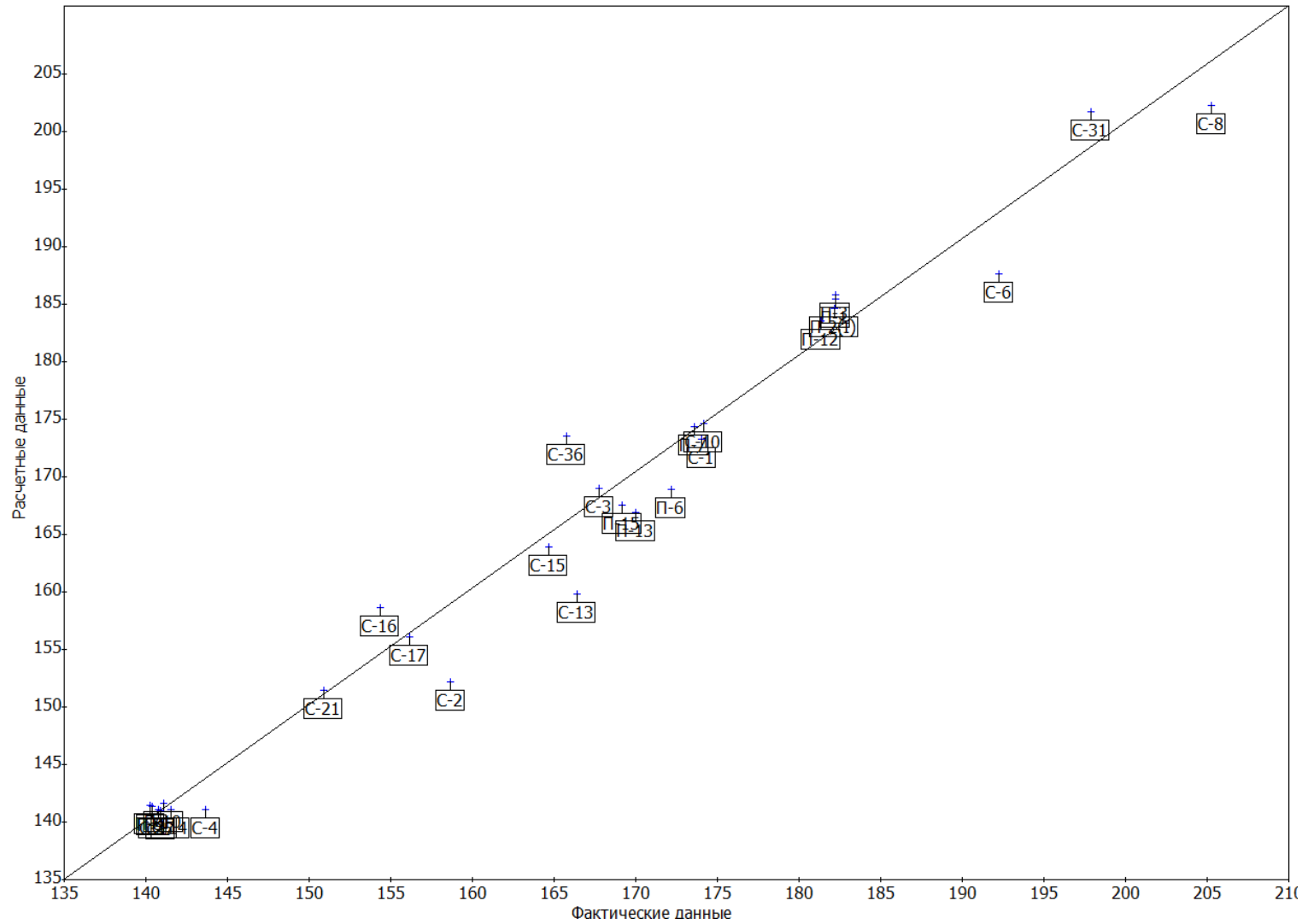


Рисунок 4.4 – График разброса напора по всем скважинам модели на стационарный период (02.01.1967, до начала закачки)

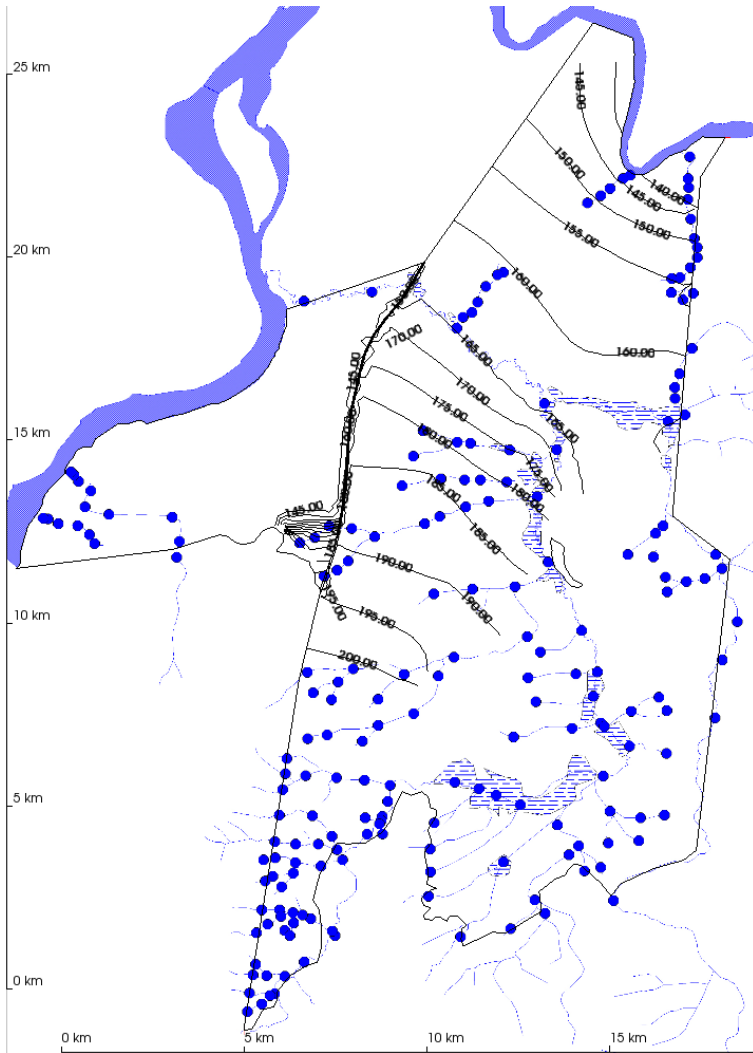


Рисунок 4.5 – Карта модельных гидроизогипс I горизонта в естественном режиме

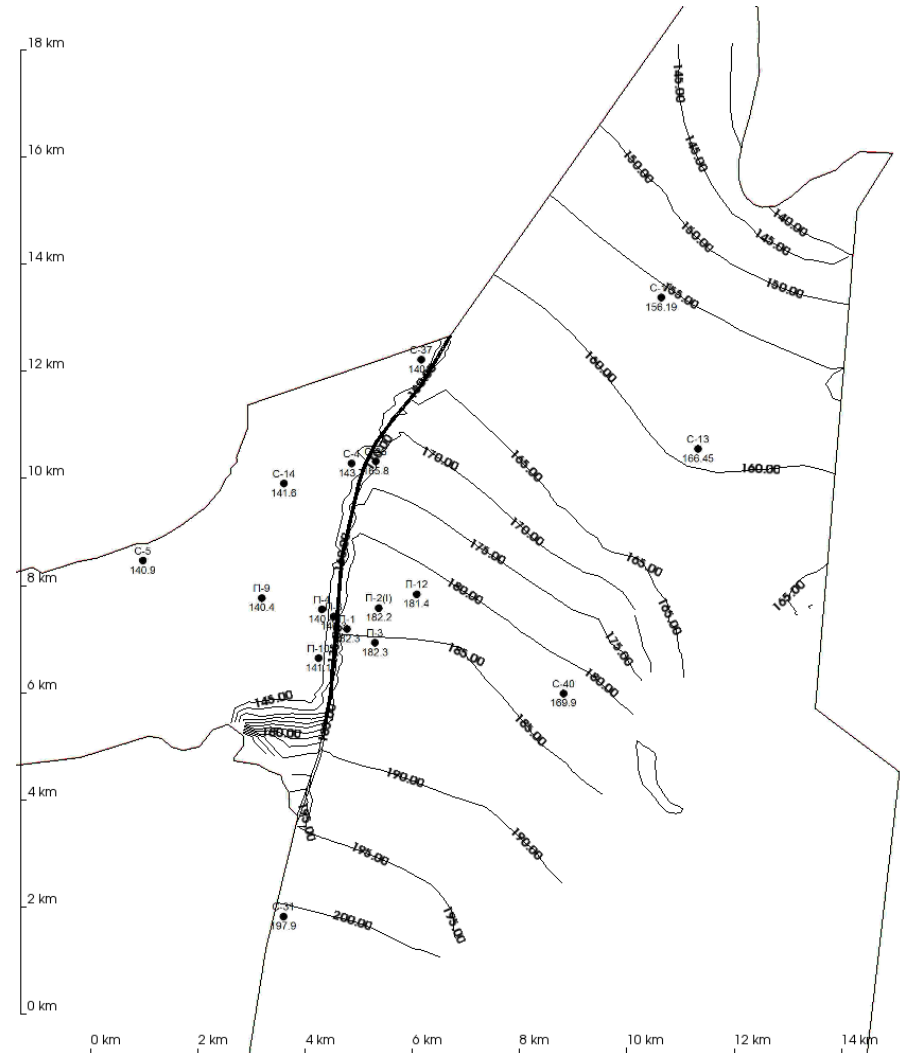


Рисунок 4.6 – Карта модельных гидроизогипс I горизонта в естественном режиме (сопоставление со скважинами)

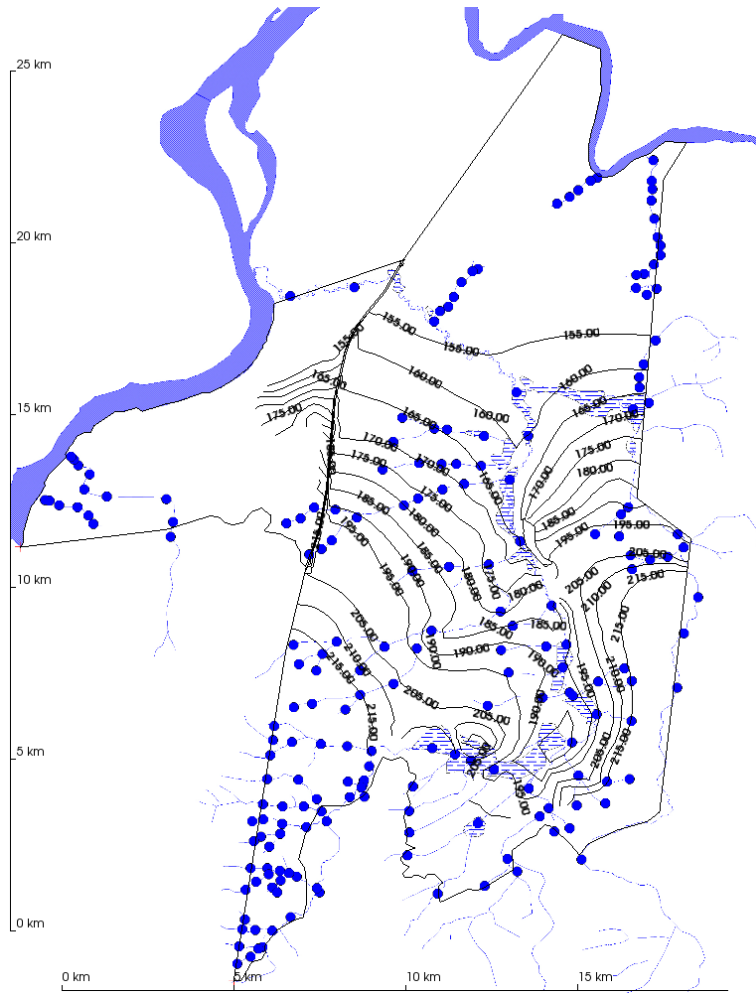


Рисунок 4.7 – Карта модельных гидроизогипс II горизонта в естественном режиме

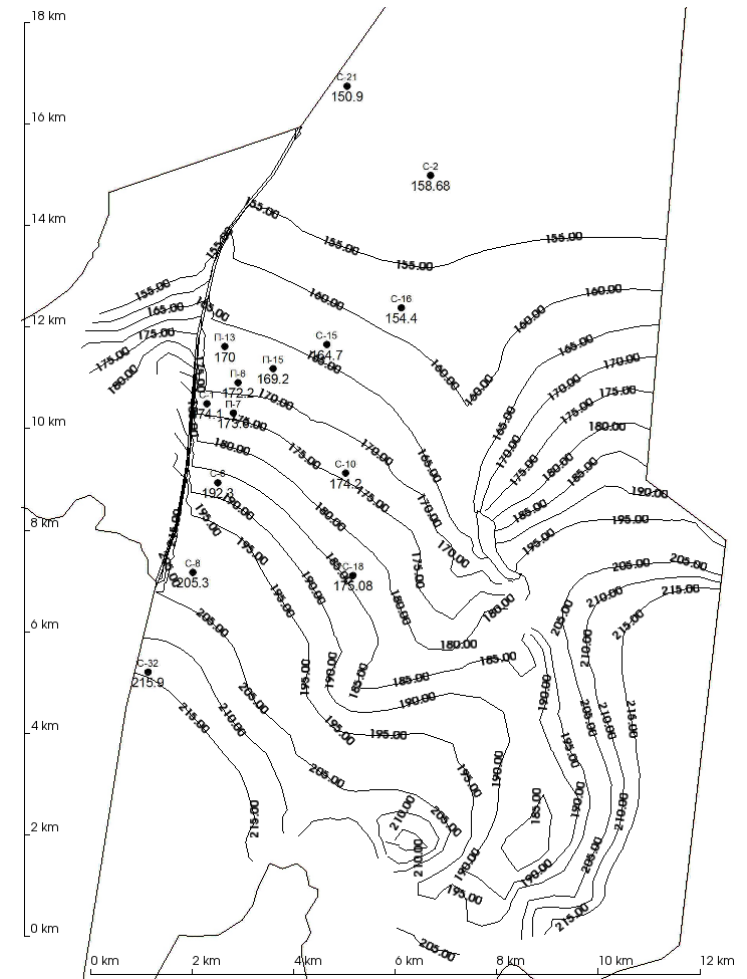


Рисунок 4.8 – Карта модельных гидроизогипс II горизонта в естественном режиме (сопоставление со скважинами)

4.3.2 Нестационарная фильтрационная задача

В ПК GeRa/V1 производится расчёт величин, позволяющих провести количественную оценку сопоставления результатов расчётов с фактическими данными, а именно – средней абсолютной ошибки и среднего квадратического из ошибки (RMS).

Рассчитываются данные величины по нижеследующим формулам.

Средняя абсолютная ошибка (с.а.о.):

$$MA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |cal_i - obs_i|$$

Среднее квадратическое из ошибки:

$$RMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)^2 \right]^{1/2}.$$

Суммирование в этих формулах производится по всем временным моментам, в которых сделаны наблюдения. Если на данное время не приходится в точности один из шагов расчета, расчёт интерполируется из двух ближайших шагов, для которых расчёт выполнен.

Для оценки качества геофильтрационной модели, а также для оценки погрешности сопоставления по скважинам модельных и фактических данных применяется подход с использованием значения масштабированного среднего квадратического ошибки (SRMS) [82]. Рассчитывается данный параметр по следующей формуле:

$$SRMS = \frac{RMS}{\Delta H} \cdot 100\%,$$

где ΔH – разница между минимальным и максимальным фактическим напором на данной территории. Для моделируемой площадки ΔH составляет 97 м.

В соответствии с подходом, описанным в [82], качественной моделью с удовлетворительным сопоставлением с фактическими данными считается та, в которой значения масштабированного квадратного корня из среднеквадратичной ошибки отвечают условию $SRMS \leq 10\%$; причём эта численная характеристика должна выполняться и для каждой скважины в отдельности, и для всех скважин сразу.

Из 90 скважин модели на I и II эксплуатационные горизонты приходятся 80 с имеющимися продолжительными рядами наблюдений. Из этих 80 скважин превышение значения SRMS, равного 10 %, наблюдается в 7 скважинах (отмечены жёлтым цветом в таблице 4.4), что составляет около 9 % от общего количества скважин. Среднее значение SRMS по всем скважинам составляет 5,4 %.

Таблица 4.4 – Расчётные значения дисперсии, средней абсолютной ошибки, RMS и SRMS по скважинам в модели полигона «Северный»

№ п/п	Скважина	Горизонт	Дисперсия	С.а.о.	RMS	SRMS	X	Y
1	A-1	III	2,14	9,02	9,14	9,42	20856	22507,9
2	A-11	II	13,07	2,72	3,80	3,91	21003,2	22290
3	A-140	II	39,63	4,17	6,39	6,59	20775,5	22293,5
4	A-15	I	13,84	4,86	5,99	6,18	22170,6	22197,2
5	A-18	II	12,51	2,64	3,67	3,79	21766,4	22298,3
6	A-19	I	21,51	5,03	6,67	6,88	20765	22011,6
7	A-2	I	488,71	21,65	26,48	27,30	21028,4	22554,5
8	A-22	I	15,80	3,99	5,39	5,56	21564,2	22012,2
9	A-23	I	13,65	4,51	5,68	5,85	21768,7	22008,9
10	A-24	I	18,05	5,32	6,63	6,84	20738,4	21704,2
11	A-25	I	13,83	3,28	4,65	4,80	20996,9	21993,5
12	A-26	I	15,26	5,51	6,67	6,87	21743,2	21699,1
13	A-27	I	10,93	4,42	5,41	5,57	21960,5	21759,3
14	A-32	I	2,93	1,38	2,18	2,24	21404,7	22855,8
15	A-36	II	1,84	1,01	1,37	1,41	23793,2	22948
16	A-37	I	7,24	4,36	4,99	5,15	22690	22000
17	A-38	II	13,71	8,74	9,49	9,78	21480,4	23296,5
18	A-39	II	4,94	3,48	4,11	4,23	22521,7	23265,2
19	A-4	I	159,92	10,50	12,65	13,04	21829	22550
20	A-40	II	2,95	3,47	3,84	3,96	22981,2	23251,5
21	A-44	II	15,48	3,19	3,98	4,10	21251,4	22012,3
22	A-45	I	10,53	2,15	3,25	3,35	21688,2	23719,4
23	A-46	II	5,62	3,10	3,77	3,88	22656	23710,2
24	A-47	II	7,74	2,20	2,81	2,90	23605,1	23781,1
25	A-48	III	6,99	4,10	4,88	5,03	21173,4	23822,4
26	A-5	I	6,50	8,85	9,19	9,48	22829,3	22552,7
27	A-50	II	1,14	1,57	1,90	1,96	22850	24340
28	A-56	II	21,02	3,40	4,70	4,85	21430,7	22502,2
29	A-57	II	20,22	4,23	5,42	5,59	21367,8	22596,7
30	A-64	II	5,04	5,89	6,31	6,50	22623,8	24047
31	АН-10	I	12,09	2,69	4,15	4,28	20805,6	22291,3
32	АН-12	I	13,28	3,82	5,08	5,23	21202,8	22286,3
33	АН-14	I	11,52	2,98	4,18	4,31	21800	22286,3
34	АН-16	I	11,99	4,51	5,49	5,66	22230,3	22511,5
35	АН-18	I	7,67	3,36	4,21	4,34	22222,1	22303,4
36	АН-31	II	19,86	6,85	8,13	8,38	20874	22847
37	АН-33	II	8,95	3,81	4,54	4,69	21856,8	22753,6
38	АН-34	II	2,73	2,86	3,29	3,39	22854,6	22834
39	Д-1	II	4,98	5,04	5,49	5,66	21832	23302
40	Д-1a	III	0,15	2,80	2,83	2,91	21842,4	23286,9

№ п/п	Скважина	Горизонт	Дисперсия	С.а.о.	RMS	SRMS	X	Y
41	Д-2	II	7,94	3,16	4,06	4,19	22677	23001
42	Д-3	II	3,82	3,65	4,04	4,17	21604	21526
43	Д-4	II	2,80	1,45	1,85	1,91	22372	21851,4
44	Н-10	II	12,07	2,88	3,90	4,02	22295	22480
45	Н-4	I	7,65	13,05	13,34	13,75	21420,8	22504,2
46	П-1	I	11,52	2,63	3,93	4,05	20828,9	22685,6
47	П-11	I	12,94	3,18	4,42	4,55	21947,2	22628,3
48	П-12	I	7,94	2,54	3,52	3,63	22113,6	23328
49	П-13	II	7,44	3,71	4,44	4,58	21251,9	23823,2
50	П-14	II	24,97	3,82	5,04	5,19	21942,9	22530,3
51	П-15	II	4,47	2,53	2,93	3,02	22193,2	23391,8
52	П-16	I	10,33	2,47	3,49	3,59	21555	23252,9
53	П-17	I	16,06	5,36	6,58	6,79	21313,6	22020,5
54	П-18	I	11,80	3,61	4,74	4,89	21251,9	21794,6
55	П-19	I	11,47	3,99	5,08	5,24	21193,2	21549,4
56	П-2	II	23,03	9,89	10,99	11,33	21415,8	23075,1
57	П-2(I)	I	0,00	1,79	1,79	1,85	21415,8	23075,1
58	П-20	II	42,84	9,16	9,83	10,13	21459,5	22814,6
59	П-21	III	0,13	1,41	1,46	1,50	21336,5	22498,3
60	П-24	III	1,04	2,16	2,25	2,32	21630,3	23717,4
61	П-3	I	10,92	3,86	4,90	5,05	21345,8	22431,4
62	П-6	II	41,94	8,34	10,39	10,71	21508,7	23119,8
63	П-7	II	74,05	5,93	8,70	8,97	21417,3	22526,3
64	П-9	I	0,00	0,65	0,65	0,67	19250	23260
65	С-1	II	23,39	6,31	7,85	8,09	20901,8	22707,5
66	С-10	II	0,00	0,05	0,05	0,06	23610	21350
67	С-13	I	0,00	6,98	6,98	7,20	27320	26020
68	С-15	II	4,72	2,95	3,60	3,71	23243,7	23861,7
69	С-16	II	0,00	3,93	3,93	4,06	24700	24580
70	С-17	I	0,00	0,44	0,44	0,45	26640	28820
71	С-2	II	0,00	6,79	6,79	7,00	25270	27170
72	С-20	II	35,96	9,90	11,31	11,66	20724,3	22746,8
73	С-21	II	0,00	0,32	0,32	0,33	23640	28910
74	С-26	I	12,65	4,63	5,67	5,85	22461,4	21354,2
75	С-27	II	4,86	2,66	3,45	3,56	23364,5	22462,8
76	С-3	II	0,00	0,72	0,72	0,75	22280	26460
77	С-31	I	0,00	3,01	3,01	3,10	19650	17360
78	С-36	I	0,00	7,23	7,23	7,45	21360	25790
79	С-6	II	15,15	5,02	5,59	5,77	21116,2	21165,9
80	С-8	II	0,00	3,85	3,85	3,97	20630	19410

На рисунках 4.9–4.10, представлены сопоставления фактических и модельных уровней по двум скважинам I и II горизонта. Наблюдаемое на этих рисунках расхождение фактических и модельных данных связано с неопределенностью исходных данных по расходам, параметрам геологических сред, а также с ошибками аппроксимации задачи (причины перечислены в порядке их важности, по мнению автора).

Для понимания масштабов неопределённостей в данных мониторинга приведём пример, когда расхождение расчетных и модельных значений оказалось очень велико (соответственно, и рассчитанное значение SRMS привлекло пристальное внимание). Более детальное исследование данных мониторинга напоров в скважинах П-4, П-8 и П-10 вызвало большие сомнения: в один и тот же период времени напоры в них выросли приблизительно на 50 м без каких-либо оснований (на примере скважины П-4 на рисунке 4.11; фактический уровень – прерывистая линия, модельный уровень – сплошная линия; по скважинам П-8 и П-10 наблюдается аналогичная картина). Значения SRMS по этим скважинам приведены в таблице 4.5. Столь резкое, более чем на 50 метров, поднятие уровня по всем трём скважинам в одно и то же время является результатом какой-то ошибки в измерениях напоров. Эти и подобные скважины были исключены из рассмотрения при расчете погрешности.

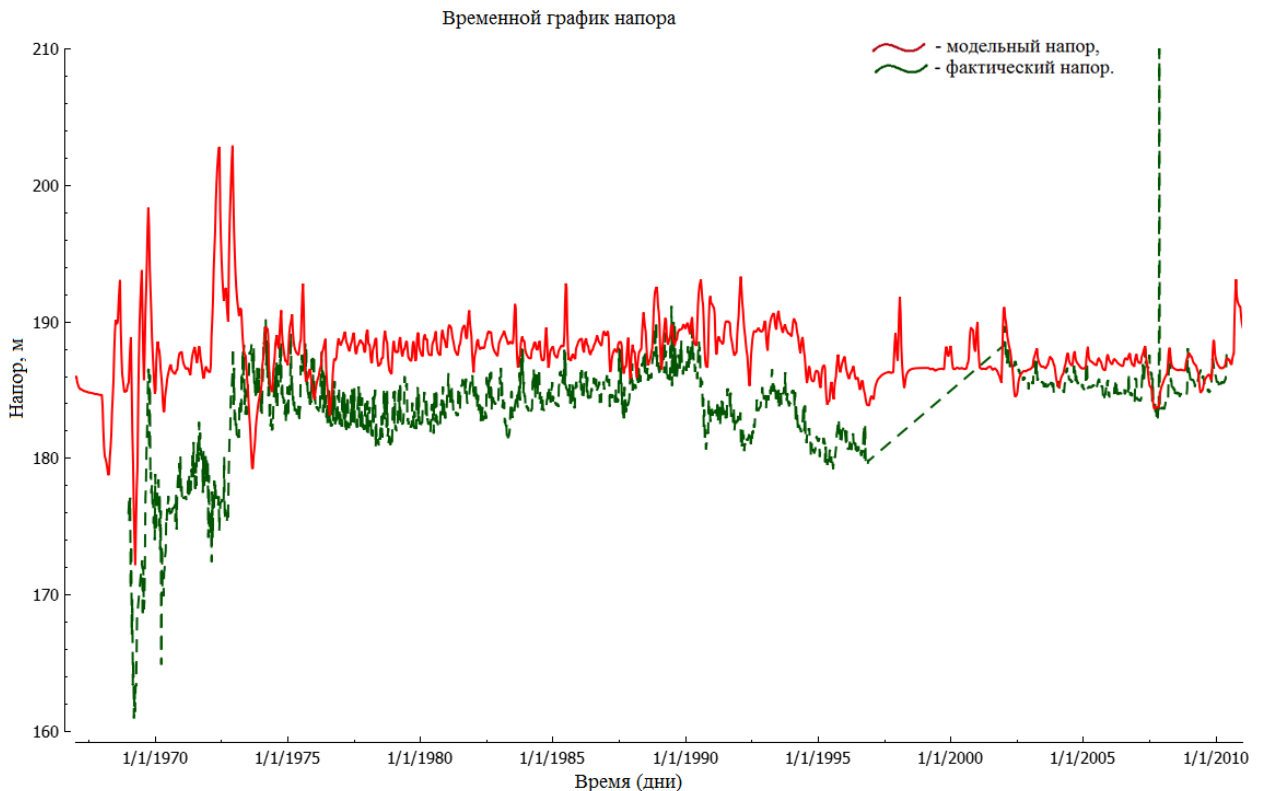


Рисунок 4.9 – Сопоставление модельных уровней с фактическими для скважины А-23 (I горизонт)

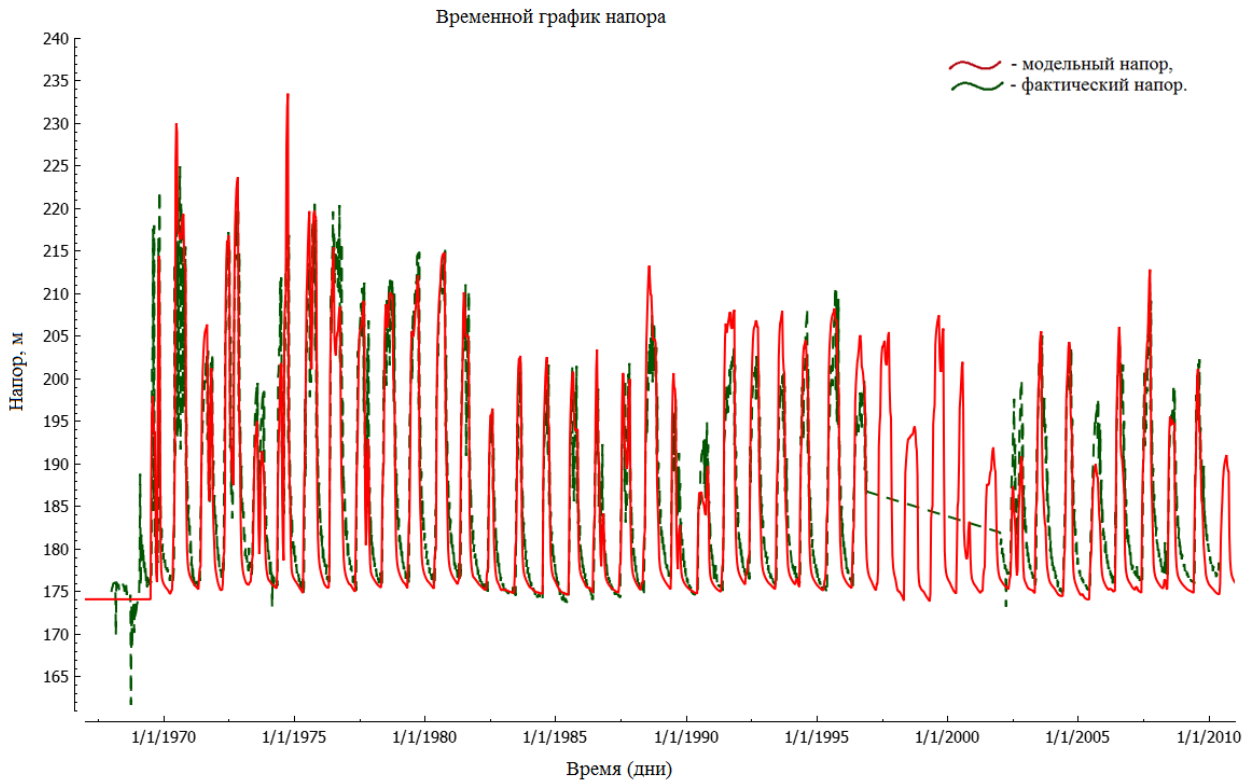


Рисунок 4.10 – Сопоставление модельных уровней с фактическими для скважины А-56 (II горизонт)

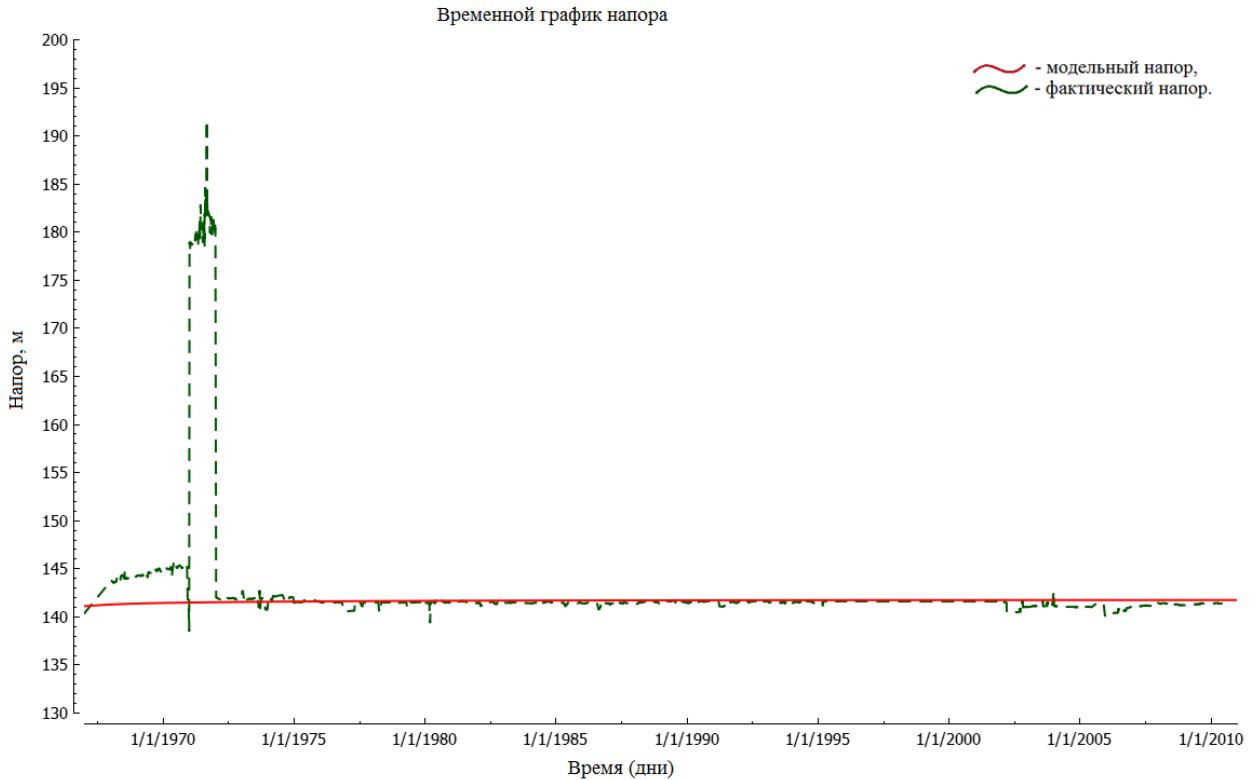


Рисунок 4.11 – Пример сопоставления модельных уровней с фактическими по заразломной скважине П-4 с резким необоснованным выпадом фактического уровня

Таблица 4.5 – Расчётные значения дисперсии, средней абсолютной ошибки, RMS и SRMS по скважинам с предположительно некорректными данными

№ п/п	Скважина	Горизонт	Дисперсия	С.а.о.	RMS	SRMS	X	Y
1	П-4	I	164,94	5,31	13,70	14,12	20361,1	23047
2	П-8	I	173,08	5,42	14,15	14,59	20581,7	22916,6
3	П-10	I	375,01	8,04	20,56	21,20	20300,5	22142,2

4.3.3 Миграционная задача

Расчеты миграции были выполнены для двух компонент отходов – NO_3^- (нитрат-ион) и ^{90}Sr , поскольку только эти данные могли быть определены в результате анализа доступных материалов по истории эксплуатации полигона «Северный» достаточно достоверно. Необходимо отметить, что и в этих данных, а также в результатах мониторинга по выбранным компонентам, зачастую наблюдается несоответствие, описанное в разделе 4.

Результаты распространения нитрат-иона на 2010 год и сопоставление с натурными данными по скважинам на 2010 г. представлены на рисунках 4.12–4.13 для горизонтов I и II соответственно. По рисункам 4.12–4.13 можно констатировать удовлетворительное сопоставление фактических данных по скважинам с модельным ореолом. Результаты показывают консерватизм модели, как в первом, так и во втором горизонтах. Исключением является скважина А-44, которая находится во втором горизонте выше по потоку (значительно южнее) относительно нагнетательных скважин. Причины обнаружения в ней достаточно высоких значений концентрации нитрат-иона непонятны. Возможно, появление в них компонентов отходов связано с высокими давлениями нагнетания, приведшими к гидроразрыву пласта, вследствие чего образовались высокопроницаемые зоны в южном направлении от нагнетательной скважины Н-8. Однако, поскольку данная скважина находится выше по региональному потоку, миграция отходов в ее направлении не нарушает консерватизма модели ГЕОПОЛИС, поскольку это приводит к замедлению миграции загрязнения в региональном потоке и выхода в зону разгрузки.

Стоит отметить, что при моделировании не учитывается процесс биодegradации нитрат-иона [61-62], что способствует повышению консерватизма модели, и, возможно, обуславливает превышение модельных уровней над фактическими уровнями. Наблюдающиеся в измерениях скачки концентрации в скважинах (резкий подъем после закачки с последующим спадом практически до нуля) могут быть объяснены биодegradацией нитрат-иона в воде, находящейся в скважине, а также тем, что измерения проводились без должной прокачки скважин. Ввиду больших неопределенностей в измерениях при верификации модели по концентрации нитрат-

иона учитываются только те скважины, в которых были зафиксированы существенные концентрации нитрат-иона, превышающие его ПДК в воде (45 мг/л).

Результаты распространения ^{90}Sr на 2010 год представлены на рисунках 4.14–4.15.

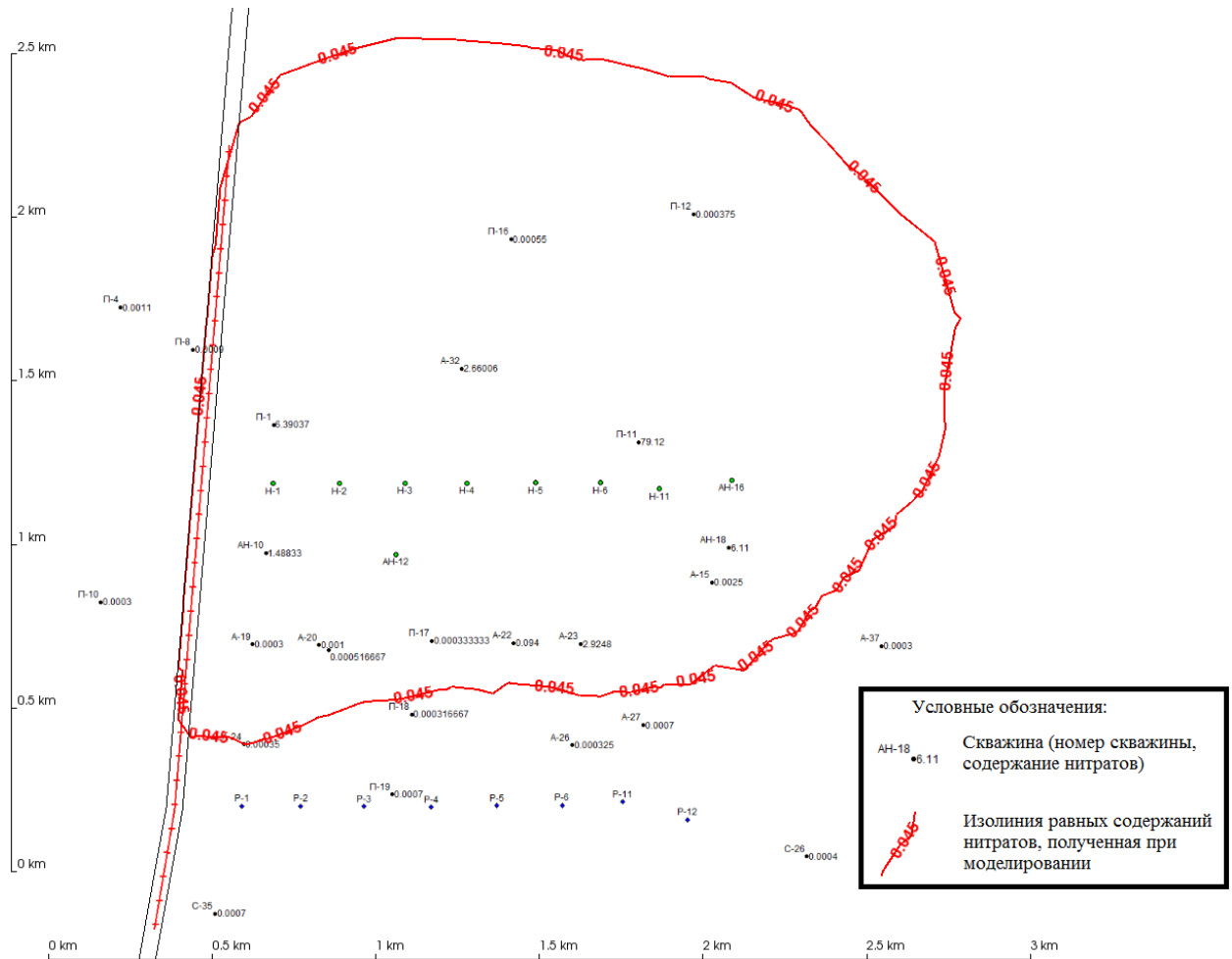


Рисунок 4.12 – Сопоставление полученного на модели ореола нитрат-иона (NO_3^-) с фактическими данными по скважинам на 2010 год (горизонт I)

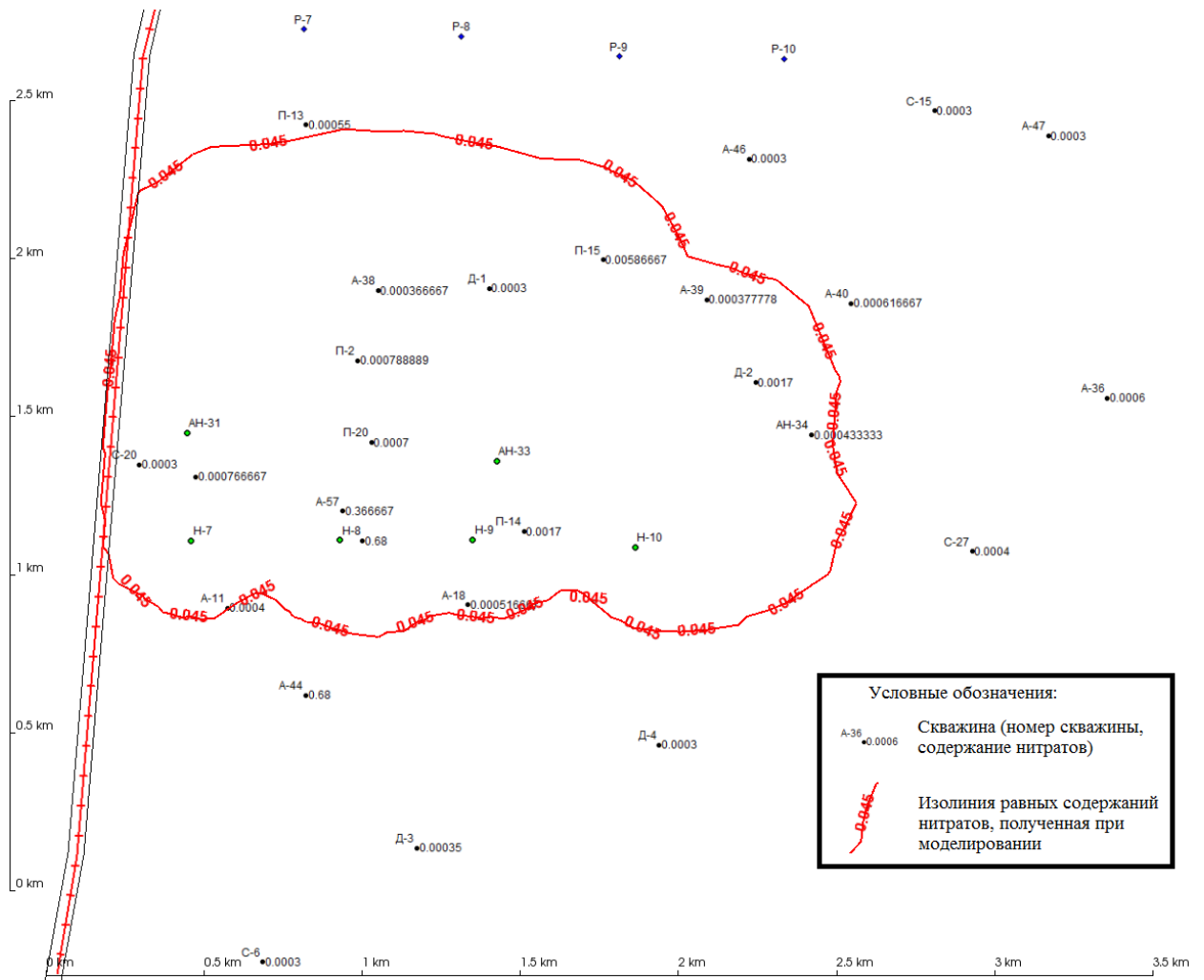
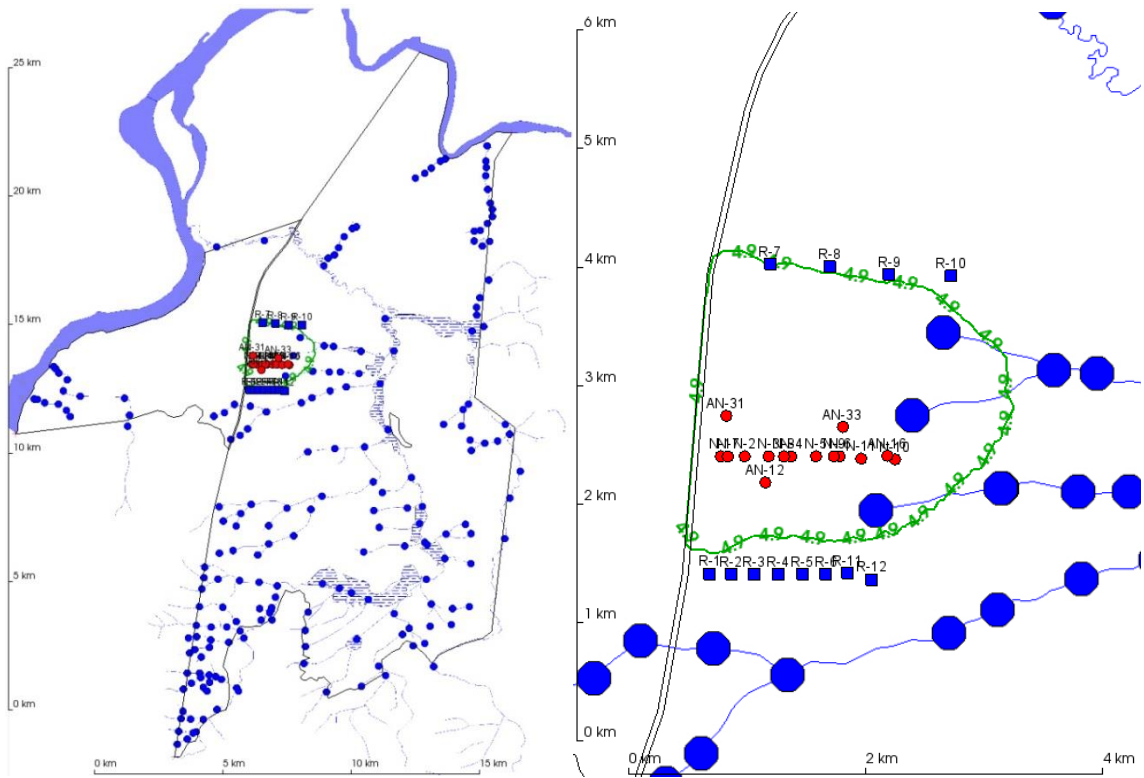
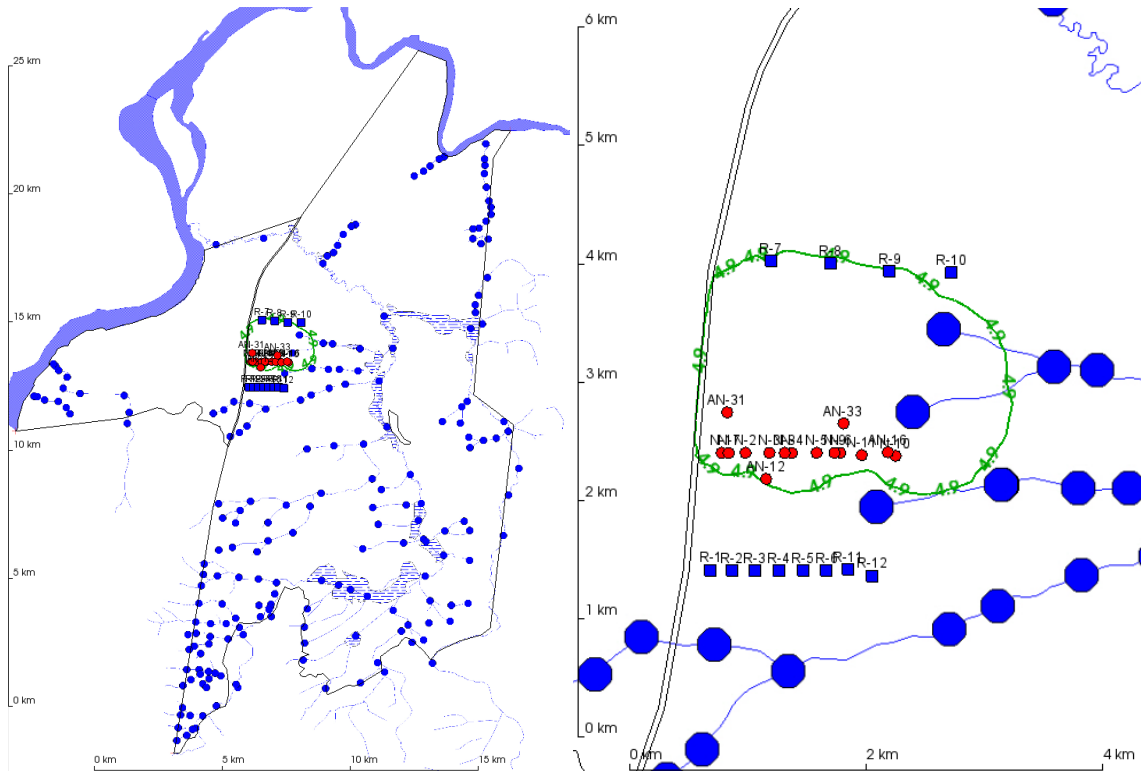


Рисунок 4.13 – Сопоставление полученного на модели ореола нитрат-иона (NO_3^-) с фактическими данными на 2010 год (горизонт II)



слева – крупномасштабно, справа – врезка

Рисунок 4.14 – Контур ореола УВ в питьевой воде по ^{90}Sr (4,9 Бк/л, согласно [83]) в I горизонте модели на 2010 год



слева – крупномасштабно, справа – врезка

Рисунок 4.15 – Контур ореола УВ в питьевой воде по ^{90}Sr (4,9 Бк/л, согласно [83]) во II горизонте модели на 2010 год

На рисунках 4.16–4.17 представлено по одной скважине с сопоставлением фактических и модельных концентраций нитрат-иона для I и II горизонтов. По результатам этих сопоставлений можно констатировать консерватизм модели (превышение расчётной концентрации над фактической концентрацией во всех скважинах) и консервативно ранний приход фронта. В других скважинах модели ситуация аналогичная, вышеупомянутые скважины приведены для примера.

На рисунках 4.18–4.19 представлено по одной скважине с сопоставлением фактических и модельных активностей ^{90}Sr для I и II горизонта. По результатам этих сопоставлений можно констатировать консерватизм модели (превышение расчётной концентрации над фактической концентрацией во всех скважинах) и консервативно ранний приход фронта. В других скважинах модели ситуация аналогичная, вышеупомянутые скважины приведены для примера.

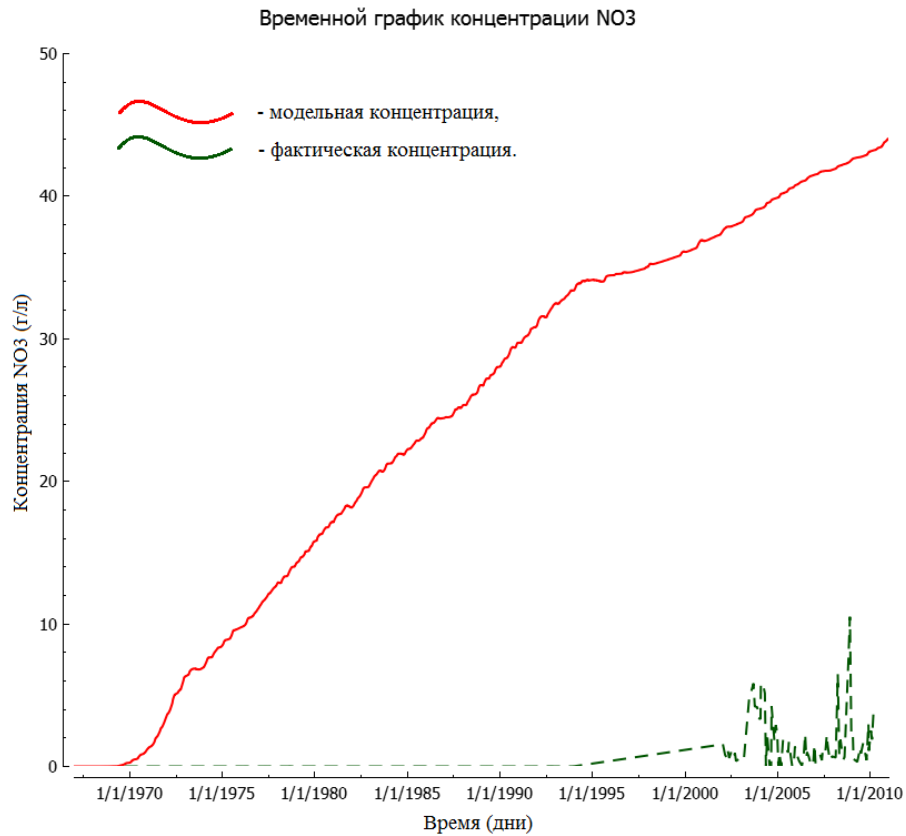


Рисунок 4.16 – Сопоставление модельной и фактической концентраций нитрат-иона в скважине А-32 (I горизонт)

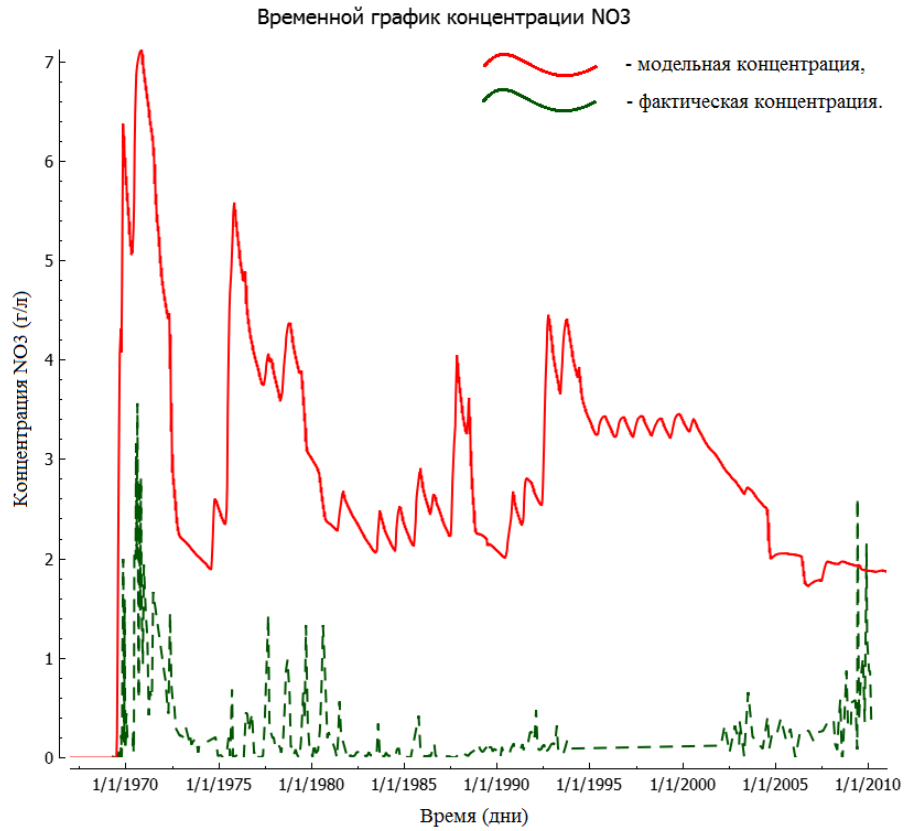


Рисунок 4.17 – Сопоставление модельной и фактической концентраций нитрат-иона в скважине А-56 (II горизонт)

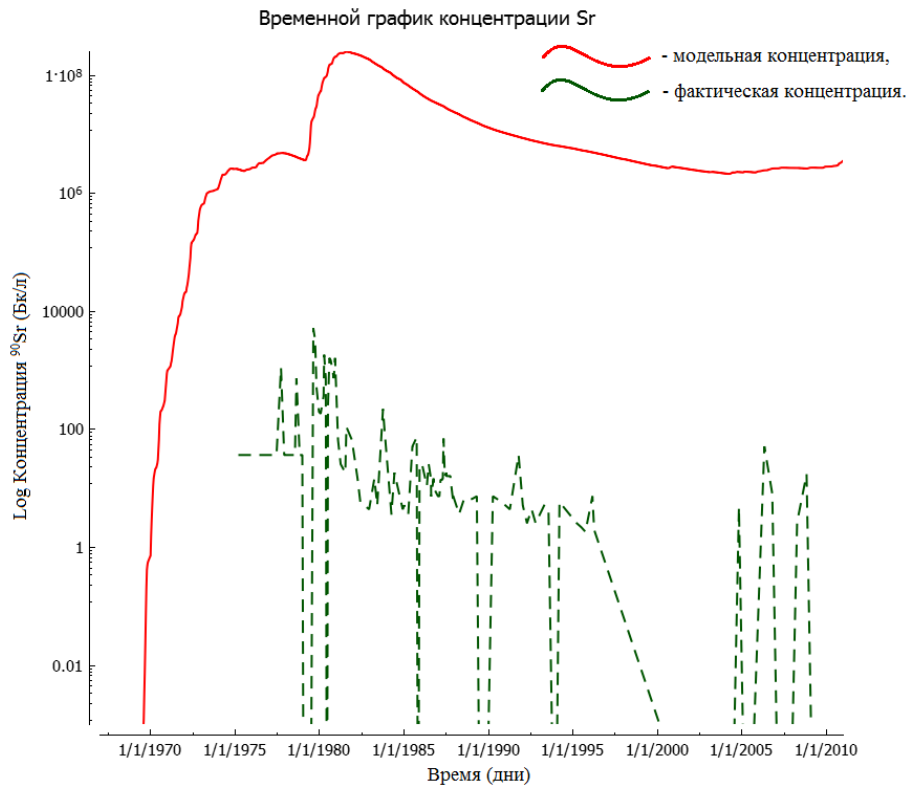


Рисунок 4.18 – Сопоставление модельной и фактической удельных активностей ⁹⁰Sr в скважине П-11 (I горизонт)

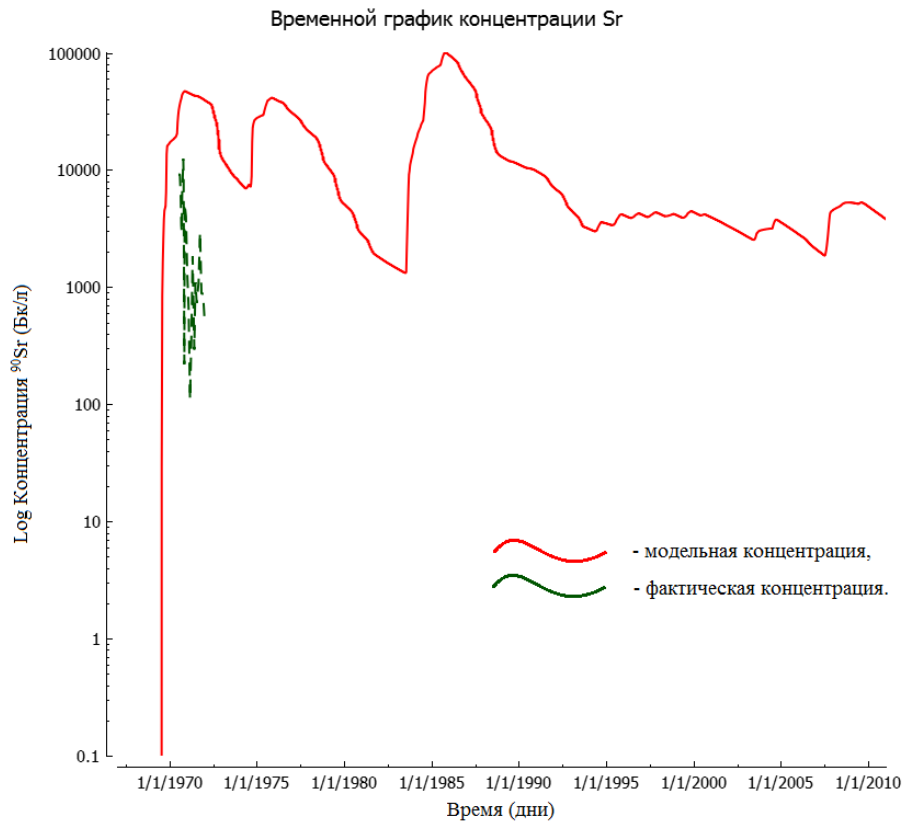


Рисунок 4.19 – Сопоставление модельной и фактической удельных активностей ^{90}Sr в скважине А-57 (II горизонт)

Консерватизм в модельных оценках характерен для подходов к радиационной защите и безопасности объектов использования атомной энергии. В данном случае, несмотря на чрезмерный консерватизм по ^{90}Sr , результаты таковы, что к 2010 г. ореол, соответствующий уровню вмешательства в питьевой воде (4900 Бк/м^3), далек от границ горного отвода недр. Модельная активность в скважинах, отстоящих от места закачки на 300 метров, превышает фактическую активность на порядки. Однако, ввиду неопределенности и недостаточной изученности возможного механизма коллоидного переноса, в данном случае предпочтительны именно консервативные оценки модели. Однако, даже с консервативными оценками, можно говорить о безопасности объекта по данному радионуклиду.

Прогнозные расчеты могут быть выполнены и для более широкого спектра радионуклидов, находящихся в отходах (Ru, Cs, Co, Se, Pu, U). Ограниченность данных мониторинга и знаний о количестве этих компонент в закачке затрудняет проведение верификации расчета миграции этих компонент по натурным данным.

Для объяснения причин расхождений результатов расчетов с данными натурных измерений в разделе 4 проведен анализ достоверности исходных данных по закачке и данных

мониторинга, который демонстрирует ряд несоответствий в самих исходных данных, которые не могут быть устранены.

4.4 Выводы к главе 4

В данной главе проведен анализ неопределенностей и достоверности фактических данных, позволивший отбраковать ряд скважин и исключить их из верификации модели ввиду необоснованных и некорректных замеров величин напоров и концентраций загрязнителей в них.

В результате анализа фактических данных, очевидно, что измеренная в скважинах концентрация нитрат-иона не подлежит применению при калибровке модели ввиду отсутствия прокачки скважин при отборе проб; застоявшаяся вода в скважине не дает реальную концентрацию нитрат-иона в пласте-коллекторе. Данный факт в совокупности с пониманием существования процесса нитрата редукции [61-62] говорит о важности учета такого процесса, что и планируется сделать при дальнейших работах над этим объектом.

Помимо необходимости прокачки скважин перед пробоотбором отдельно стоит отметить нерегулярность замеров активностей радионуклидов – ^{90}Sr , ^{137}Cs и др. Чрезвычайно сложно по такому количеству имеющихся данных вести какую-либо разумную верификацию разработанной миграционной модели.

Калибровка фильтрационных свойств Правобережного тектонического нарушения и верификация модели по натурным данным подтвердила проведенные полевые исследования по обоснованию его непроницаемости. Коэффициент фильтрации локального разлома принят равным 10^{-7} м/сут. Данное значение привело к наилучшему сопоставлению модельных и фактических значений напоров в скважинах.

Для стационарной фильтрационной модели (02.01.1967, до начала закачки ЖРО на полигоне) стандартное отклонение модельных напоров от фактических по скважинам составило 3,1 м. При максимальном перепаде фактических напоров, равным 97 м, относительная погрешность геофильтрационной модели составила 3,2 %. Для нестационарной фильтрационной модели применялся подход оценки качества модели по масштабированному среднему квадратическому ошибке (SRMS). Из 90 скважин модели на I и II эксплуатационные горизонты приходится 80 скважин с имеющимися продолжительными рядами наблюдений. Из этих 80 скважин превышение значения SRMS, равного 10 %, наблюдалось в 7 скважинах, что составляет около 9 % от общего количества скважин. Среднее значение SRMS по всем скважинам составило 5,4 %. Результаты разработки и расчета фильтрационной модели описаны в статье [84].

Результаты расчетов эпигнозной миграционной задачи показывают консерватизм модели, как для первого, так и для второго пласта-коллектора для обеих моделируемых компонент - нитрат-иона и ^{90}Sr .

Заключение

Работа посвящена созданию полноценно трехмерной постоянно действующей геофильтрационной-геомиграционной модели пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ПГЗ ЖРО) полигон «Северный».

Разработанная модель учитывает ряд процессов, имеющих место на территории расположения объекта: напорно-безнапорную фильтрацию, адвективно-диффузионный-дисперсионный массоперенос с учетом сорбции и радиоактивного распада. Собранные воедино из разных источников знания о природной среде объекта вместе с набором процессов, смоделированных в GeRa/V1, позволили создать полноценную трехмерную модель объекта, учесть геофильтрацию и геомиграцию в природной среде расположения объекта, откалибровать модель, и выполнить на ее основе эпигнозные расчеты. Отклонения от фактических скважинных данных подтвердили корректность разработанной фильтрационной модели и консерватизм миграционной модели, и позволили аттестовать модель в составе программного средства ГЕОПОЛИС в Ростехнадзоре (модель в совокупности с расчетным ядром представляет собой первое аттестованное программное средство для таких объектов) для последующего применения в различных задачах:

1. управление эволюцией и работами по закрытию ПГЗ ЖРО полигон «Северный»;
2. продление лицензии на эксплуатацию объекта;
3. получение прогнозных расчётов на длительный период (долговременная безопасность);
4. исследование долговременных последствий аварийных ситуаций на данном и, возможно, аналогичных объектах [53, 85].

Разработанная модель является ключевым индикатором программы работ по устранению замечаний миссии МАГАТЭ и позволяет выполнить следующие задачи, решаемые в ходе реализации программы: разработку программных средств для реализации математических моделей, их верификацию и аттестацию; обоснование критериев приемлемости ЖРО для захоронения на основе оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО. По результатам эпигнозных расчетов написана статья о геофильтрационном моделировании с обоснованием и верификацией выбранных геофильтрационных модельных параметров.

Дальнейшие исследования предполагают учет процессов плотностной конвекции, нитрат-редукции и коллоидного переноса.

Список сокращений

БД – база данных

ВАО – высокоактивные отходы

ГЭС – гидроэлектростанция

ДСП – для служебного пользования

ЖРО – жидкие радиоактивные отходы

МАГАТЭ – международное агентство по атомной энергии

НАО – низкоактивные отходы

НИОКР – Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

НТС – Научно-технический совет

ОИАЭ – объект использования атомной энергии

ООБ – отчет по обоснованию безопасности

ОФР – опытно-фильтрационные работы

ПДК – предельно допустимая концентрация

ПГЗ ЖРО – пункт глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов

ПЗРО – пункт захоронения радиоактивных отходов

ПС – программное средство

РАО – радиоактивные отходы

РК – расчетный код

РОСНЕДРа – Федеральное агентство по недропользованию РФ

САО – среднеактивные отходы

ФГУП – Федеральное государственное унитарное предприятие

ФЗ – Федеральный закон

ФЦП – Федеральная целевая программа

ЭВМ – электронная вычислительная машина

ЭГДА – электрогидродинамическая аналогия

ЯРОО – ядерные и радиационно опасные объекты

Список использованных источников

1. Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу, утверждённые Указом Президента Российской Федерации от 13 октября 2018 г. № 585.
2. НП-100-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов (НП-100-17)», утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 июня 2017 г. № 218.
3. НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности (НП-055-14)», утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379.
4. НП-064-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии (НП-064-17), утв. приказом Ростехнадзора от 30 ноября 2017 г. № 514.
5. Федеральный закон от 21 февраля 1992 г. № 2395-1 «О недрах».
6. IAEA 2006. Fundamental Safety Principles. IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna (2006). На рус.яз. Основопологающие принципы безопасности. Серия изданий по безопасности № SF-1. МАГАТЭ, Вена (2007).
7. IAEA 2011. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности № SSR-5. МАГАТЭ, ВЕНА, 2011.
8. IAEA 2012. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency. SSG-23. Vienna, 2012.
9. IAEA 2011. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency. SSG-14. Vienna, 2011.
10. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии».
11. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
12. Постановление от 15 июля 1992 г. N 3314-1 «О порядке введения в действие положения о порядке лицензирования пользования недрами».
13. Программа расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию и оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ «Международное экспертное

рассмотрение практики глубокой закачки жидких радиоактивных отходов в Российской Федерации» и обоснования концепции их закрытия, Москва, 2015 г.

14. Дорофеев А. Н., Савельева Е. А., Уткин С. С., Понизов А. В. и др. Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО // Радиоактивные отходы. — 2017. — No 1. — С. 54 — 63.
15. Scott E. M. (ed.). Modelling radioactivity in the environment. — Elsevier, 2003. 438 p. ISBN: 9780080536651.
16. Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. — 256 с.
17. Compton K. L., Novikov V. and Parker F. L. Deep Well Injection of Liquid Radioactive Waste at Krasnoyarsk-26. Volume I. / International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, Vol. I, RR-00-1, 2000, 113 p.
18. Compton K. L., Novikov V. and Parker F. L. Deep Well Injection of Liquid Radioactive Waste at Krasnoyarsk-26: Analysis of Hypothetical Scenarios. Volume II / International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, Vol. II, RR-01-01, 2001, 74 p.
19. International Peer Review of the Deep Well Injection Practice for Liquid Radioactive Waste in the Russian Federation «Final Report of the IAEA International Review Team. July 2013», IAEA, Vienna, September, 2020.
20. Федеральный закон «О ратификации Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами», Москва, 2005.
21. The First National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management prepared for the fifth Review Meeting in frames of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management, Moscow, 2005.
22. The Second National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management prepared for the fifth Review Meeting in frames of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management, Moscow, 2008.
23. The Third National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management prepared for the fifth Review Meeting in frames of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management, Moscow, 2011.

24. The Fourth National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management prepared for the fifth Review Meeting in frames of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management, Moscow, 2014.
25. The Fifth National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management prepared for the sixth Review Meeting in frames of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management, Moscow, 2017.
26. Материалы самооценки для предоставления международным экспертам в рамках миссии МАГАТЭ по оценке безопасности российской технологии подземного захоронения жидких радиоактивных отходов. В 4-х книгах – М.: ИБРАЭ РАН, 2013 г. – 245 с.
27. Линге И.И., Уткин С.С., Хамаза А.А., Шарафутдинов Р.Б. Опыт применения международных требований по обоснованию долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов: проблемы и уроки // Атомная энергия. – 2016. – Вып. 120. – С. 201 – 208.
28. Крюков О.В., Хаперская А.В., Дорофеев А.Н., Ферапонтов А.В, Кудрявцев Е.Г., Линге И.И., Уткин С.С., Дорогов В.И., Шарафутдинов Р.Б., Позин А.В., Василишин А.Л. Выполнение обязательств России в рамках Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2019. № 1(6). С. 25—36.
29. Капырин И. В., Иванов В.А., Копытов Г.В., Уткин С.С. Интегральный код GeRa для обоснования безопасности захоронения РАО // Горный журнал – 2015 – №10 – С. 44-50.
30. Капырин И. В., Сушкин В. В., Расторгуев А. В., Никитин К. Д. Верификация моделей ненасыщенной фильтрации и переноса в зоне аэрации на примере расчетного кода GeRa. Вопросы атомной науки и техники, серия «Математическое моделирование физических процессов», – 2017 – №1 – С. 60-75.
31. Сушкин В.В., Капырин И.В., Григорьев Ф.В. Оценка эффективности барьера «стена в грунте» при создании приповерхностных пунктов консервации и захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 96—105. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-96-105.
32. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. – Под общей редакцией Е.В. Евстратова, А.М. Агапова, Н.П. Лаверова, Л.А. Большова, И.И. Линге. – 2012 г. – 356 с. – Т1.

33. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий. — Под общей редакцией И. И. Линге и А. А. Абрамова. — 2017 г. — 187 с.
34. РД 51-31323949-48-2000. Гидрогеоэкологический контроль на полигонах закачки промышленных сточных вод. Методическое руководство под редакцией В.П. Ильченко. М.: 2000.
35. Болтыров В. Б., Медведев О. А. Подземное захоронение жидких промышленных отходов как технология обеспечения экологической безопасности территорий Уральского региона // *Civil Security Technology* – Vol. 7 – 2010 – № 4 (26).
36. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Развитие системы обращения с радиоактивными отходами в России. – Под общей редакцией Большова Л.А., Лаверова Н.П., Линге И.И. – Москва: 2013. – 392 с. – Т.2.
37. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика: учебник / В.М. Шестаков. – М.: КДУ, 2009. – 334 с.: ил., табл.
38. Panday S., Langevin C.D., Niswonger R.G., Ibaraki M., and Hughes J.D. MODFLOW-USG version 1: An unstructured grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 2013, book 6, chap. A45, 66 p.
39. Šimůnek, J., K. Huang, and M. Th. van Genuchten, The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0, Research Report No. 144, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 164 pp., 1998.
40. Diersch H. J. G. FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system // Reference manual. Berlin, Germany: WASY GmbH. (Cité aux pages 20 et 102.). – 2005.
41. Freedman V.L. et al. A high-performance workflow system for subsurface simulation // *Environmental Modelling & Software* – 2014 – Vol.55 – Pp.176-189.
42. Токарев И.В., Зубков А.А., Румынин В.Г., Поздняков С.П. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. Исследование водообмена в многослойной системе изотопными методами. Водные ресурсы. 2009, том 36, № 3, с. 363-374.
43. Данилов В.В., Зубков А.А., Истомин А.Д., Носков М.Д. Моделирование распространения фильтрата жидких радиоактивных отходов в пластах-коллекторах. Геоинформатика. 2007, № 4, с. 36-43.

44. Захарова Е. В., Андрющенко Н. Д. и др. Инженерные барьеры безопасности при выводе из эксплуатации объектов ядерного топливного цикла. ARGILLASTUDIUM-2017. Материалы Пятой Российской Школы по глинистым минералам – 2017 – С. 50-54.
45. Лаверов Н.П., Величкин В.И. и др. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 5: Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. – М.: ИГЕМ РАН; ИФЗ РАН, 2008. – 280 с.: ил.
46. НП-019-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности», утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 июня 2015 г. № 242.
47. Отчёт «Подземное захоронение жидких радиоактивных отходов. Моделирование на ЭГДА режимов эксплуатации подземного хранилища I горизонта участка «Северный» / Предприятие п/я А-3487, Москва, 1967 г.
48. Отчёт «Подземное захоронение жидких радиоактивных отходов. Использование II водоносного горизонта участка «Северный» / Предприятие п/я А-3487, Москва, 1967 г.
49. Отчет «Прогнозирование миграции жидких РАО с учетом различия плотностей и вязкостей отходов и подземных вод», ВНИИПИПТ, 1994, арх. N-A-300-94.
50. Букаты М. Б., Зуев В.А., Трифонов Н.С., Агафонова М.А. Отчет о НИР «Расчеты и моделирование режимов захоронения отходов в 2011-2020 гг., прогноз распространения компонентов отходов», ТПУ, 2009. – 178с.
51. Зуев В.А., Букаты М.Б., Хафизов Р.Р. Гидрогеологические условия подземного захоронения радиоактивных отходов на полигоне «Северный» (Красноярский край) // ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2008. № 6, с. 531-546.
52. Обоснование продления проектных сроков эксплуатации глубокого хранилища «ПОЛИГОН СЕВЕРНЫЙ» ФГУП «ГОРНО-ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» до 2020 г., ОАО «ВНИПИПромтехнологии», Москва, 2009 г.
53. Сускин В. В., Савкин М. Н., Уткин С. С., Коновалов В. Ю., Понизов А. В. Применение эмпирического и расчетного методов при оценке возможных нарушений нормальной эксплуатации на объектах захоронения жидких РАО // Радиоактивные отходы. 2020. No 1 (10). С. 22—34.
54. Отчёт о результатах детальных гидрогеологических исследований, проведенных на участке «Б» в 1964 – 1966 гг. Авторы: Гончаров А.В., Кривошеев В.П., Ботев Н.А., 1966.

55. Гунин В.И. Прогноз миграции жидких радиоактивных отходов при глубинном захоронении на полигоне «Северный» // Материалы 6-й Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике, (Улан-Удэ, 25-29 сентября 2005 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2006. С. 159-166.
56. Мальковский В.И., Пэк А.А. Влияние коллоидов на перенос радионуклидов подземными водами // Геология рудных месторождений, 2009, том 51, №2, с. 91-106.
57. Мальковский В.И., Пэк А.А. Влияние естественной конвекции на стабилизацию ореола загрязнения в естественных ловушках при подземном захоронении жидких отходов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2012, №3, с. 237-244.
58. Косарева И.М., Сафонов А.В. и др. Вопросы оценки биогенного преобразования состава РАО, инкорпорированных в глубинный пласт-коллектор // Вопросы радиационной безопасности, №3, 2007.
59. Назина Т.Н., Сафонов А.В., Косарева И.М. и др. Микробиологические процессы в глубинном хранилище жидких радиоактивных отходов «Северный» // Микробиология. – 2010. – т. 79. – № 4. – С. 551–561.
60. Захарова Е.В., Каймин Е.П. и др. Экспериментальные и модельные исследования коллоидного транспорта радионуклидов в водоносных горизонтах (применительно к условиям глубинного захоронения жидких РАО на полигоне Сибирского химического комбината). 1. Адсорбция радионуклидов на коллоидных частицах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2007, №1, с. 39-50.
61. Safonov A.V., Kosareva I.M. et al. ECOLOGICAL ASPECTS OF LIQUID RADWASTE CONFINEMENT IN THE SEVERNYYI DEEP REPOSITORY. Atomic Energy, Vol. 111, No. 2, December, 2011.
62. Сафонов А.В., Косарева И.М., Ершов Б.Г. Влияние денитрифицирующих микроорганизмов на безопасность длительного хранения радиоактивных отходов. ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ № 3, 2011.
63. D.V.Anuprienko, I.V.Kapyrin. Modeling groundwater flow in unconfined conditions: numerical model and solvers' efficiency. Lobachevskii Journal of Mathematics, 2018, Vol. 39, No. 7, pp. 867–873.
64. H. J. Diersch, FEFLOW: Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer Science & Business Media, 2013.

65. A. W. Harbaugh et al. MODFLOW-2000, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. Report. U. S. Geological Survey (92), p. 134 (2000).
66. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука. – 2011. – 1158с.
67. Šimůnek J., van Genuchten M. T. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS //Vadose Zone Journal. – 2008. – Vol. 7. – No. 2. – Pp. 782-797.
68. Отчёт о результатах комплексной гидрогеологической съёмки масштаба 1:50000 на участке «Б». Авторы: Гончаров А.В., Носухин А.В.
69. Гриневский С.О. Влияние рельефа на изменение инфильтрационного питания подземных вод. Вестник Московского Университета, серия 4 Геология, N 1,стр. 54-60, 2015.
70. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика. Теория и практика. Наука, Москва, 2010.
71. Отчеты о результатах эксплуатации полигона «Северный» за разные годы: с 1970 по 2009. Железногорск.
72. Doherty J (2010), PEST - Model-independent parameter estimation. Version 12. Water-mark Computing. Australia. Downloaded from <http://www.pesthomepage.org/>.
73. Сускин В.В. Учёт влияния неоднородности при обосновании модели полигона захоронения ЖРО. Сборник трудов XV научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2014. с. 196-199.
74. Савельева Е.А., Сускин В.В., Расторгуев А.В., Позизов А.В. Моделирование пространственной неоднородности осадочного пласта в районе пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Горный журнал – 2015 – №10 – С. 21-25.
75. Feehley, Zheng, Molz. A dual-domain mass transfer approach for modeling solute transport in heterogeneous aquifers: Application to the Macrodispersion Experiment (MADE) site. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 36, NO. 9, PAGES 2501-2515, SEPTEMBER 2000.
76. Иванов В.А., Капырин И.В., Расторгуев А.В., Савельева Е.А., Сускин В.В. Расчётный комплекс «Геополис» для обоснования безопасности пункта глубинного захоронения РАО. Сборник тезисов докладов 10-й юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». 2015. с. 62.
77. Suskin V.V., Kapyrin I.V., Rastorguev A.V., Kononov V.Yu. «THREE-DIMENSIONAL MODELLING OF THE LIQUID RADIOACTIVE WASTE INJECTION SITE "SEVERNYI" USING GEOPOLIS SOFTWARE» Book of abstracts of 17th International Conference on Chemistry and

Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration 2019), pp. 143-144.

78. Сускин В.В., Иванов В.А. Разработка геофильтрационно-геомиграционной модели полигона захоронения ЖРО «Северный». Тезисы докладов VII съезда по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность). 2014. с. 340.

79. Отчёт о результатах детального изучения областей разгрузки вод I горизонта участка «Б» в 2-х томах. Авторы: Гончаров А.В., Кривошеев В.П. 1967 г. Том 1. Текст. 56 с.

80. Thibault D.H., Sheppard M.I. and Smith P.A. A critical compilation and review of default soil solid/liquid partition coefficients, Kd, for use in environmental assessments. Whiteshell Nuclear Research Establishment Pinawa, Manitoba, Canada, 1990.

81. Radionuclide sorption from the safety evaluation perspective. Nuclear Energy Agency, October, 1991.

82. GROUNDWATER FLOW MODELLING GUIDELINE. Aquaterra Consulting Pty Ltd, November, 2000.

83. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».

84. Сускин В.В., Капырин И.В., Расторгуев А.В. Программное средство «ГЕОПОЛИС»: геофильтрационное моделирование пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов полигона «Северный». Горный журнал. 2021. № 5, с. 91-97.

85. Сускин В.В., Савельева Е.А. Моделирование аварийных сценариев на полигоне захоронения ЖРО «Северный». Сборник трудов XVIII научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2017. с. 142-144.

Основные публикации по теме диссертации

1. Савельева Е.А., Сускин В.В., Расторгуев А.В., Позизов А.В. Моделирование пространственной неоднородности осадочного пласта в районе пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. **Горный журнал**. 2015. № 10, с. 21-25.
2. Сускин В.В., Капырин И.В., Расторгуев А.В., Никитин К.Д. Верификация моделей ненасыщенной фильтрации и переноса в зоне аэрации на примере расчетного кода GeRa. **ВАНТ. Серия ММФП**. 2017. № 1, с. 60-75.
3. Сускин В.В., Савкин М.Н., Уткин С.С., Коновалов В.Ю., Позизов А.В. Применение эмпирического и расчетного методов при оценке возможных нарушений нормальной эксплуатации на объектах захоронения жидких РАО // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 22—34. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-22-34.
4. Сускин В.В., Капырин И.В., Григорьев Ф.В. Оценка эффективности барьера «стена в грунте» при создании приповерхностных пунктов консервации и захоронения РАО // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 96—105. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-96-105.
5. Сускин В.В., Капырин И.В., Расторгуев А.В. Программное средство «ГЕОПОЛИС»: геофильтрационное моделирование пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов полигона «Северный». **Горный журнал**. 2021. № 5, с. 91-97.
6. Сускин В.В. Учёт влияния неоднородности при обосновании модели полигона захоронения ЖРО. Сборник трудов XV научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2014. с. 196-199.
7. Сускин В.В., Иванов В.А. Разработка геофильтрационно-геомиграционной модели полигона захоронения ЖРО «Северный». Тезисы докладов VII съезда по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность). 2014. с. 340.
8. Сускин В.В., Иванов В.А., Капырин И.В., Позизов А.В. Разработка геофильтрационно-геомиграционной модели пункта захоронения ЖРО «Железногорский». Тезисы докладов XXII международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов». 2015. электронный сборник.
9. Иванов В.А., Капырин И.В., Расторгуев А.В., Савельева Е.А., Сускин В.В. Расчётный комплекс «Геополис» для обоснования безопасности пункта глубинного захоронения РАО. Сборник тезисов докладов 10-й юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». 2015. с. 62.

10. Неуважаев Г.Д., Капырин И.В., Болдырев К.А., Сускин В.В. Применение расчётного кода GeRa в практических задачах оценки безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов различных типов. Тезисы докладов VI научного семинара «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск. 2017. с. 17.
11. Suskin V.V., Kapyrin I.V., Rastorguev A.V. Modeling unsaturated groundwater flow and transport in the vadose zone using GeRa code. 5th International Conference, Hydrus Software Applications to Subsurface Flow and Contaminant Transport Problems. ISBN: 978-80-213-2749-8. 2017, p. 44.
12. Сускин В.В., Савельева Е.А. Моделирование аварийных сценариев на полигоне захоронения ЖРО «Северный». Сборник трудов XVIII научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2017. с. 142-144.
13. Григорьев Ф.В., Капырин И.В., Коньшин И.Н., Копытов Г.В., Сускин В.В. Развитие интегрального кода GeRa для обоснования безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. Сборник тезисов докладов V международной научно-технической конференции «Информационные проекты и технологии ядерной энергетики» МНТК-НИКИЭТ-2018, с. 182.
14. Сускин В.В., Капырин И.В., Расторгуев А.В. Возможности ПС ГЕОПОЛИС для моделирования ПГЗ ЖРО полигона «Северный». Сборник трудов XIX научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2018. с. 167-170.
15. Suskin V.V., Kapyrin I.V., Rastorguev A.V., Konovalov V.Yu. «THREE-DIMENSIONAL MODELLING OF THE LIQUID RADIOACTIVE WASTE INJECTION SITE "SEVERNYI" USING GEOPOLIS SOFTWARE» Book of abstracts of 17th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration 2019), pp. 143-144.