

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук

На правах рукописи



Неуважаев Георгий Дмитриевич

**Разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей для
обоснования долговременной безопасности пункта глубинного
захоронения радиоактивных отходов (участок «Енисейский»)**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный руководитель: Уткин Сергей Сергеевич, доктор технических наук.

Официальные оппоненты: Кузьмин Евгений Викторович – доктор технических наук, главный специалист, Федеральное государственное унитарное предприятие «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»;

Расторгуев Иван Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Ведущая организация: Акционерное общество «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» (АО «ВНИИПромтехнологии»), г. Москва.

Защита состоится 21 сентября 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д002.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте <http://www.ibrae.ac.ru/contents/518/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.т.н.



В. Е. Калантаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Окончательная изоляция высокоактивных и среднеактивных долгоживущих РАО (а также ОЯТ, если топливо не перерабатывается) является актуальным вопросом для всех государств, использующих атомную энергию. На сегодняшний день международным научно-техническим сообществом признано, что наиболее эффективным и безопасным решением этой проблемы является захоронение в глубоких геологических формациях с соблюдением принципа многобарьерной защиты. Такой подход позволяет обеспечить пассивную долгосрочную изоляцию радионуклидов от биосферы. На фоне многочисленных проектов создания пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО), разрабатываемых в том или ином виде странами с развитой ядерной энергетикой, в России также ведется проектирование подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). В 2002-2005 годах под руководством АО «ВНИПИпромтехнологии» были проведены комплексные исследования на участке «Енисейский», расположенном в пределах ЗАТО г. Железногорска в Красноярском крае.

Процессы проектирования, сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО сопровождаются обязательными итерационными обоснованиями эксплуатационной и долговременной безопасности – сложными мультидисциплинарными процедурами систематического анализа всех возможных факторов, которые могут повлиять на безопасность системы захоронения. Основа этого анализа - выполнение прогнозных модельных расчетов на период потенциальной опасности радиоактивных отходов (РАО), что определяет высокую важность разработки и верификации соответствующих моделей.

Для подтверждения способности системы захоронения РАО ограничивать радиационное воздействие на население и окружающую среду важнейшими являются модели переноса радионуклидов, которые должны формироваться с возможностью учета процессов на разных пространственных и временных масштабах. Обычно выделяются: дальняя зона – участок от сотен метров до десятков километров до потенциальной зоны разгрузки подземных вод, ближняя зона – участок от нескольких метров до сотен метров в пределах ПГЗРО, и биосфера – поверхностные воды, атмосфера, почва, биота, население. Один из основных инструментов прогнозирования экологической приемлемости ПГЗРО – геофильтрационное-геомиграционное моделирование, так как именно оно формирует представление о миграции радионуклидов в ближней и дальней зоне, а также исходные данные для оценки их поступления в биосферу.

Непосредственно для выполнения моделирования на настоящий момент разработаны разные подходы, позволяющие рассматривать различные варианты описания процессов и среды. Практика разработки конкретных моделей для отдельных объектов показывает, что основная проблема заключается в их параметризации -это связано с наличием неопределенности в значениях требуемых параметров, вызванной их пространственно-временной вариабельностью и конечной точностью.

Таким образом, качество прогнозов в значительной степени определяется параметрическим обеспечением моделей, которое, в свою очередь, обусловлено не только количеством и качеством исходной релевантной информации, но и собственно методиками параметризации.

Вопрос параметризации возникает и с другой стороны. Важный аспект в обосновании безопасности, который появился на повестке сравнительно недавно (около 15 лет назад) – «проблема доверия» к значениям тех индикаторов безопасности, которые будут получены в результате численного моделирования на долгосрочный период после закрытия пункта захоронения. Поэтому сооружению непосредственно ПГЗРО предшествует строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), где проводятся натурные исследования, результаты которых позволяют сформировать основу для обеспечения достоверности обоснования безопасности. Наряду с демонстрацией реализуемости технологических процессов в реальных геологических условиях и с соблюдением реальных пространственных масштабов, обширный класс практических исследований в ПИЛ нацелен на изучение характеристик и свойств геологических пород и гидрогеологических характеристик на глубине и в условиях предполагаемого размещения ПГЗРО, которые являются исходными данными для создания гидрогеологических моделей.

В концептуальную основу гидрогеологических моделей закладывается как разработка методических подходов к выбору математических основ описания среды (параметры, граничные и начальные условия), так и состав учитываемых процессов. Результаты, полученные в период выполнения поисковой и оценочной стадии работ по выбору участка размещения ПЗРО, позволяют выполнить и обосновать параметризацию гидрогеологических моделей.

Корректность концептуальной гидрогеологической модели и ее параметризация во многом определяют обоснованность результатов выполнения прогнозных модельных расчетов в целом и, соответственно, степень доверия к ним.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей обоснования безопасности ПГЗРО в части оценки динамики переноса радионуклидов до зоны разгрузки на примере участка «Енисейский».

Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи:

1. анализ существующих подходов к моделированию для описания геофильтрационных и геомиграционных процессов в различных типах вмещающих пород;
2. оценка влияния элементов геологического строения как части параметрического обеспечения модели на поток подземных вод на основе плановой геофильтрационной модели, реализованной методом аналитических элементов, и на основе профильной модели, выполненной в пределах участка «Енисейский»;

3. обработка и интерпретация результатов кустовой откачки из несовершенных скважин, разработка трехмерной модели, включающая обоснование таких аспектов параметрического обеспечения, как: пространственная неоднородность фильтрационных свойств; воспроизведение фактического хода откачки и определение фильтрационных параметров по результатам калибровки модели;

4. проведение опытно-фильтрационных исследований (ОФР) для определения фильтрационных параметров с использованием современных пневматических пакеров, позволяющих надежно изолировать проницаемые интервалы;

5. разработка вариантов трехмерной геофильтрационной-геомиграционной модели на основе различных подходов: с использованием блоковой структуры массива в рамках концепции пористой среды EPM (Equivalent Porous Medium) и DFM (Discrete Fracture Matrix) подхода, а также сопоставление полученных в различных вариантах геофильтрационных параметров.

На рисунке 1 приведена взаимосвязь решаемых задач и итоговый результат, полученный в ходе диссертационного исследования.

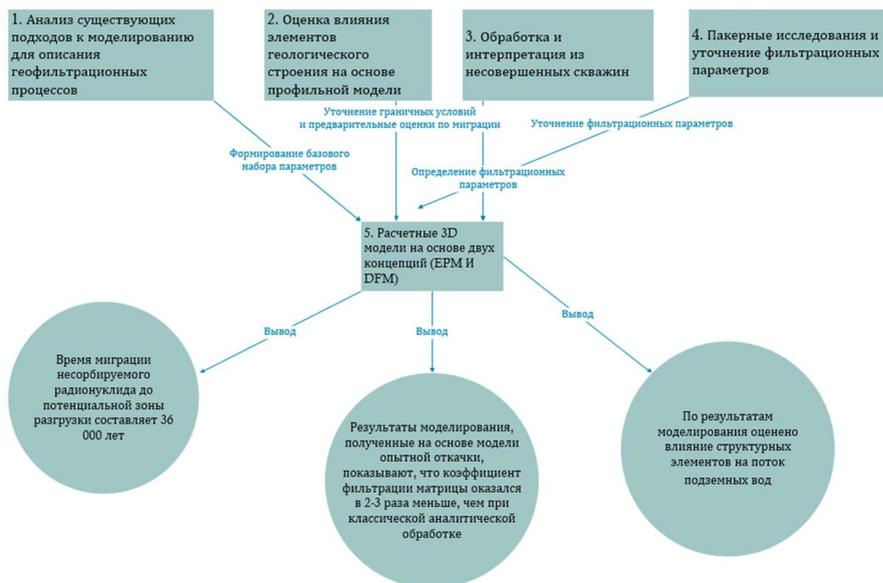


Рисунок 1 – Взаимосвязь рассматриваемых задач

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые при разработке геофильтрационной модели использована детальная геологическая модель с использованием элементов геологического строения, установленных на основании анализа результатов бурения скважин на участке «Енисейский». По результатам калибровки модели определены фильтрационные параметры основных элементов геологического строения.

2. Разработан алгоритм, предусматривающий оценку влияния структуры разрывных нарушений на направление потока подземных вод.

3. Предложена новая методика по определению геофильтрационных параметров с помощью численного моделирования, которая позволяет улучшить качество и достоверность получаемых результатов.

4. Впервые проведен анализ поинтервальных исследований, по результатам которых определены фильтрационные характеристики, в том числе для каждого интервала, выделенные на основании анализа результатов геофизических исследований.

5. Впервые выполнены расчеты долговременной миграции радионуклидов в пределах участка «Енисейский» с учетом различных вариантов размещения разрывных нарушений, позволившие оценить влияние их местоположения на безопасность ПГЗРО. При выполнении расчетов использовались 3D модели на основе различных концепции описания геологической среды: дискретной среды (DFM – Discrete Fracture Matrix) и пористой среды (EPM – Equivalent Porous Medium).

Практическая значимость работы

В рамках диссертационного исследования разработаны и обоснованы расчетными, аналитическим и экспериментальными методами трехмерные модели, обеспечивающие возможность дальнейшего развития обоснования долговременной безопасности первого в России пункта глубинного захоронения РАО на примере участка «Енисейский».

Разработана методика по определению геофильтрационных параметров массива горных пород, позволяющая повысить степень их обоснованности при решении задач оценки безопасности ПГЗРО.

Результаты, полученные на специально разработанных моделях, уже используются для текущих версий оценки долговременной безопасности (ОДБ) ПГЗРО на участке «Енисейский».

Положения, выносимые на защиту

Модели для обработки и интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ (откачек и опытных нагнетаний в скважинах, пакерных поинтервальных исследований).

Алгоритм анализа гидрогеологических условий с применением численного моделирования для определения значимых для обоснования долговременной безопасности характеристик потока подземных вод, учитывающий особенности параметризации для различных элементов геологического строения

Перечень гидрогеологических параметров кристаллической среды, наиболее значимых для обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов и выводов диссертации подтверждается:

Применением стандартных современных методов расчета для геофильтрационных и геомиграционных задач, а также общепризнанных

международных программных средств при создании гидрогеологических моделей (Groundwater Modeling System, Modflow 6);

Использованием при проведении миграционного моделирования расчетного средства GeRa/V1, успешно прошедшего процедуру аттестации для использования при обосновании безопасности ОИАЭ;

Публикациями в реферируемых изданиях и рассмотрением на российских и международных научных конференциях;

Результатами проведения анализа чувствительности разрабатываемых моделей к их параметрам.

Личный вклад автора заключается в:

разработке профильной геофильтрационной и геомиграционной модели в пределах участка «Енисейский»;

разработке трехмерной геофильтрационной модели на основе блоковой структуры массива в рамках EPM (Equivalent Porous Medium) подхода;

разработке трехмерной геофильтрационной модели на основе DFM (Discrete Fracture Matrix) подхода;

разработке трехмерной модели в пределах двух кустов скважин 2Ц – P-2 – 2-2 и 7Ц – P-7 – 7-2 для несовершенных скважин и моделировании кустовой откачки в трещиноватой среде;

планировании и отладке оборудования, поиску корректных эксплуатационных режимов пакерной установки, поддающихся корректному анализу, выполненных на участке «Енисейский» и анализу, отбраковке и коррекции полученных результатов;

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на следующих научных семинарах и конференциях:

European Geosince Union (EGU) 2020 на сессии ERE 4.2 (Towards a safe nuclear waste repository – assessment of barrier integrity, geoscientific, technological, societal and regulatory challenges and approaches) с докладом 3D hydrogeological modeling of Deep Geological Disposal in the Nizhnekansky Rock massif. 2020.

XVI-XXI научные школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, г. Москва, 2017-2022 гг.;

Международная научная конференция студентов аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2018», «Ломоносов – 2019» «Ломоносов – 2020».

V научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск. 2016.

VI научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск. 2017.

16th International Symposium on Water-Rock Interaction and to 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference), Томск, Россия.

Школа-семинар «Моделирование гидрогеологических процессов: от теоретических представлений до решения практических задач», МГУ, Москва.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научных работ, из них 11 статей в специализированных изданиях, включая 5 статей в научных журналах, включенных в перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в

которых опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и 13 докладов на российских и международных конференциях и семинарах.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 107 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 101 страниц основного текста, включая 17 таблиц и 76 рисунков, в том числе, графики.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и решаемые задачи, показаны научная новизна работы и ее практическая значимость, даны сведения о структуре и объеме представленной работы, приведена информация об апробации результатов выполненных исследований и их публикациях.

В первой главе приведен обзор использующихся в настоящее время подходов к моделированию для геофильтрационных и геомиграционных процессов в различных типах вмещающих пород, выполнен анализ способов их параметрического обеспечения. Сделан вывод о имеющихся проблемах в методах параметрического обеспечения геофильтрационных моделей, использующихся при обосновании безопасности ПГЗРО. Требуется развитие методов, опираясь при этом на возможности получения реальных данных.

В разделе 1.1 рассмотрены основные особенности гидрогеологического моделирования в различных типах вмещающих пород (глинах, солях и кристаллических породах).

Модели, позволяющие адекватно моделировать миграционные процессы в глинистых формациях в основном выполнены в рамках концепции пористой среды, которая позволяет учитывать основные процессы по миграции, включая: сорбцию, диффузию, адвекцию, дисперсию.

Отличительные особенности гидрогеологического моделирования в кристаллических породах заключаются в том, что зачастую необходимо проводить расчеты как в рамках моделей сплошной среды, так и на основе концепции дискретной среды. На первых этапах моделирования, наиболее оптимальными методами расчета течения в трещиновато-пористой среде является модель эквивалентной пористой среды (EPM), а для более детально исследованного участка строят модель сети дискретных трещин DFN (Discrete Fracture Network).

В разделе 1.2 приведены основные процессы эволюции ПГЗРО с точки зрения гидрогеологии. Факторы, определяющие безопасность ПГЗРО, целесообразно разделить на две крупные группы: природные и техногенные. В ходе нормальной эволюции ПГЗРО ожидается изменение гидрогеологических условий объекта и параметры среды преимущественно за счет изменения различных климатических и тектонических условий. Для того, чтобы можно было спрогнозировать такие изменения, необходимо начинать с разработки сценариев и моделируемых процессов. В рамках каждого сценарного варианта также присутствует неопределенность параметров. Обобщая

рассматривавшийся в международной практике факторы гидрологического/гидрогеологического отклика на геологические изменения можно отметить, что крупномасштабные геологические изменения могут оказывать влияние на региональный поток подземных вод. В кристаллических слабопроницаемых породах гидрогеологические изменения могут влиять и на направление потока непосредственно через пункт захоронения, и вокруг него. Такие процессы могут быть связаны с изменениями в химическом составе воды, что может повлиять на вынос радионуклидов и других веществ из ПГЗРО в геосферу.

В разделе 1.3 рассмотрены особенности разработки модели фильтрации и миграции в трещиноватых средах, вследствие необходимости учета различных масштабов моделей и организации передачи информации между ними. В разделе описывается мировой опыт моделирования с использованием моделей на различных масштабах (дальняя зона и ближняя зона) и связи между ними.

В разделе 1.4, завершающем обзорную главу, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, вытекающие из выполненного анализа существующих подходов по параметрическому обеспечению геофильтрационных моделей.

Во второй главе с использованием разработанного метода параметризации фильтрационной модели с использованием аналитических элементов и профильной модели выполнена оценка влияния геологических структурных элементов на поток подземных вод в пределах участка «Енисейский».

В разделе 2.1 конкретизированы необходимые для разработки расчетной модели геологические и гидрогеологические условия территории. На основании ранее выполненных работ выделяются основные гидрогеологические подразделения:

- а) локально обводненный неоген-четвертичный горизонт;
- б) относительно водоносную зону экзогенной трещиноватости архейских пород;
- в) слабопроницаемую толщ архейских пород.

Существующие на сегодня различные предположения относительно действительного направления движения подземных вод в пространстве представляют собой существенную неопределенность, требующую обоснованного решения. Это обусловлено, в первую очередь, представительностью данных, полученных в ходе опытно-фильтрационных работ, определяемых методикой проведения этих исследований, а также другими причинами, которые, так или иначе, повлияли на полученный результат.

В разделе 2.2 приведена схематизация гидрогеологических условий и приводится решение задачи плановой фильтрации методом аналитических элементов. Приведены результаты сравнения оценки роли различных геологических структурных элементов, в том числе даек, зон дробления, разрывных нарушений, а также их совместного влияния на поток подземных вод.

В разделе 2.3 приведены основные результаты моделирования переноса радионуклидов на профильной модели в дальней зоне (на рисунке 2 приведена модельная реализация геологического разреза, на котором представлена геологическая модель дальней зоны). Отличительная особенность геофильтрационной модели заключается в том, что при выделении элементов геологического строения (ЭГС) учитывались данные по модулю трещиноватости и принадлежности к типу породы (гнейс, дайка). Для 7 ЭГС определялся коэффициент фильтрации посредством калибровки модели. Профиль, по которому построена модель, выбран в соответствии с предполагаемым направлением потока подземных вод.

Результаты расчетов геофильтрационной модели после ее калибровки демонстрируют удовлетворительное совпадение с натурными данными напоров, рисунок 3. Для таких пород, как дайки и гнейсы, установлена прямая связь коэффициента фильтрации и модуля трещиноватости.

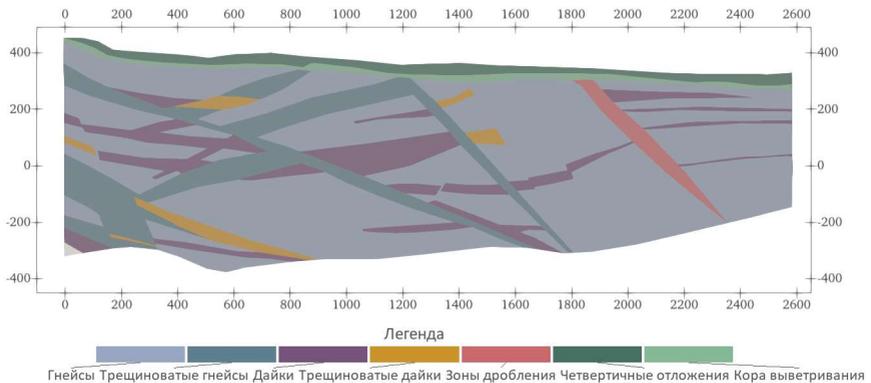


Рисунок 2 – Профильная модель дальней зоны

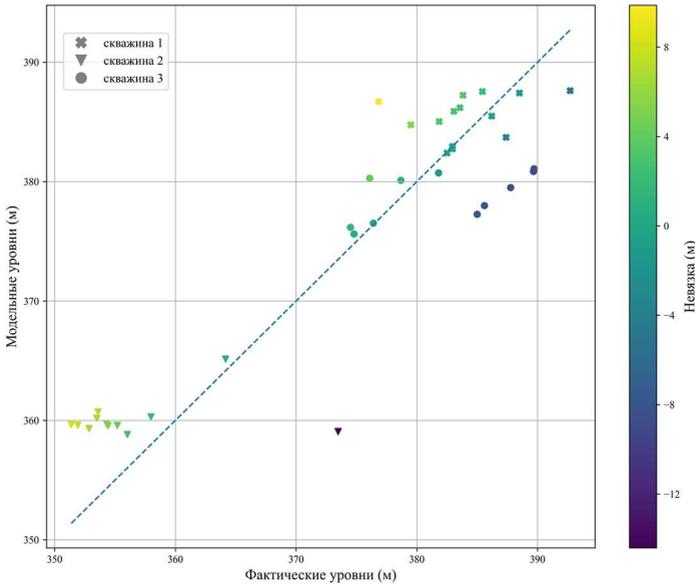


Рисунок 3 – Сопоставление фактических и модельных значений после калибровки профильной модели

В заключении к главе 2 сформулированы выводы, что разработанный метод параметризации фильтрационной модели позволил:

- на основе использования плановой геофильтрационной модели, выявить существенное влияние структурных элементов на поток подземных вод;
- обнаружить закономерности для значений проницаемости для различных структурных элементов, связанные с уровнем трещиноватости.

В третьей главе рассматриваются методы параметрического обеспечения фильтрационной модели. Один основан на определении параметров, характеризующих фильтрацию в породе по аналитической обработке и интерпретации кустовых откачек из несовершенных скважин. Другой подход к определению фильтрационных параметров основан на калибровке трехмерной фильтрационной модели для области в пределах двух кустов скважин 2Ц – Р-2 – 2-2 и 7Ц – Р-7 – 7-2.

В разделе 3.1 дан анализ геологического строения участка по результатам бурения скважин, где были проведены первичные опытно-фильтрационные работы (ОФР) на специально подготовленных двух однолучевых кустах скважин: 2Ц – Р-2 – 2-2 и 7Ц – Р-7 – 7-2.

В разделе 3.2 приводится графоаналитическая обработка кустовых откачек. Обработка проводилась по схеме Тейса для изолированного напорного однородного пласта, не ограниченного в плане, с одной опытной скважиной и с

постоянным расходом. Данная методика пригодна для наблюдательных скважин, т.к. только на их графиках выделялись участки, которые подчинялись логарифмической зависимости, что не наблюдалось на графиках для центральных скважин. Это объясняется влиянием скин-эффекта центральной скважины, который возникает из-за различия фильтрационных параметров между прискважинной зоной и водовмещающими отложениями водоносного горизонта.

В разделе 3.3 приведена модельная интерпретация и трехмерное моделирование ОФР. Для моделирования использовался модуль Multi-Node Well (MNW2) программы Groundwater Modeling System 10.4¹. С его помощью можно задать несовершенные по степени и характеру вскрытия скважины, модельная реализация которых требует подробной вертикальной дискретизации, когда скважина реализуется в нескольких модельных слоях. Общий вид модели приведен на рисунке 4. Параметры модели, которые подвергались калибровке, приведены в таблице 1.

По результатам моделирования был установлен набор параметров, при котором рассчитанные на модели изменения уровня подземных вод в скважинах при откачке максимально совпадали с наблюдаемыми в натурном исследовании. На рисунке 5 приведены результаты сопоставления фактических и модельных значений. В таблице 1 приведены полученные значения параметров моделей.

Таблица 1 – Параметры моделей

Геологический элемент	Модель куста 2Ц-2Р		Модель куста 7Ц-7Р	
	Коэф. фильтр. (м/сут)	Удельн. водоотдач а Ss (1/м)	Коэф. фильтр. (м/сут)	Удельн. водоотдач а Ss (1/м)
Гнейс (матрица)	1×10^{-4}	1×10^{-7}	$5,1 \times 10^{-3}$	1×10^{-7}
Зоны повышенной трещиноватости 1	5×10^{-3}	$5,0 \times 10^{-7}$	1×10^{-2}	1×10^{-7}
Зоны повыш. трещиноватости 2	8×10^{-4}	1×10^{-7}	-	-
Дайки	-	-	1×10^{-5}	1×10^{-7}
Кора выветривания	5×10^{-3}	1×10^{-7}	1×10^{-2}	1×10^{-7}

¹ Leonard F.Konikow, George Z. Hornberger, Keith J. Halford R.T.H. Revised Multi-Node Well (MNW2) Package for MODFLOW Ground-Water Flow Model Techniques and Methods 6 – A30 // Methods. 2009. С. 80.

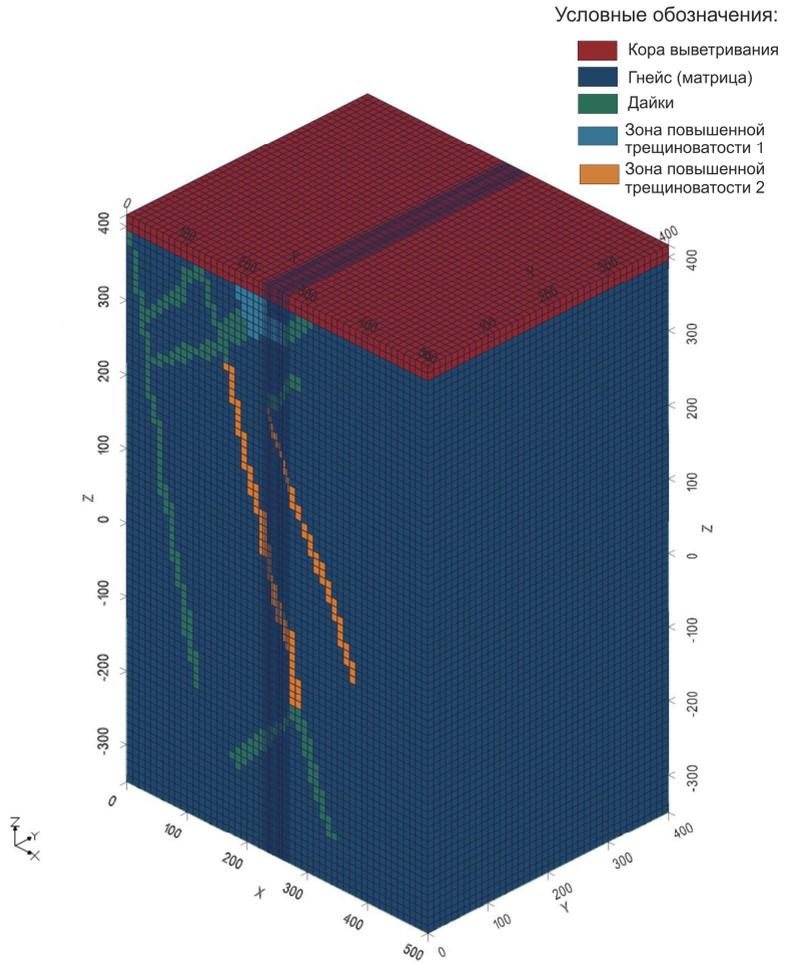


Рисунок 4 – Трехмерная модель опытной откачки из скважины 7Ц на участке «Енисейский».

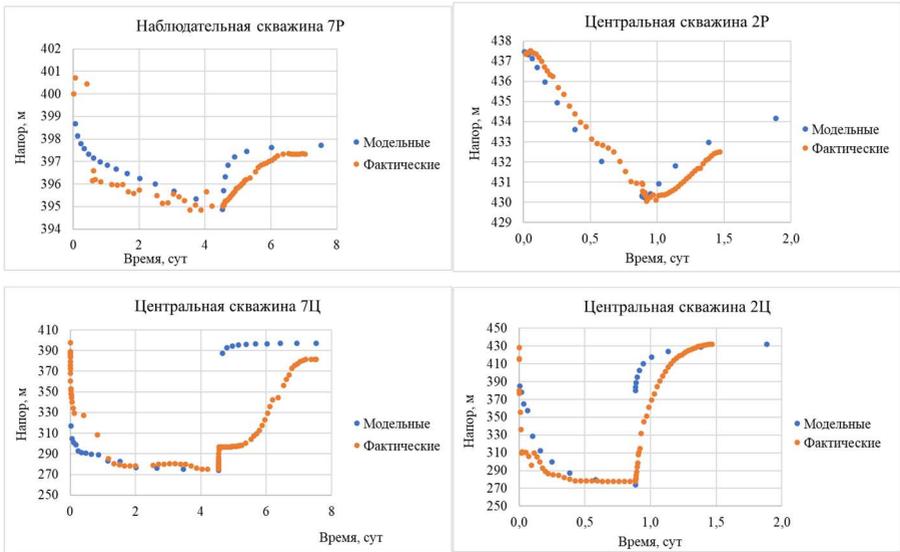


Рисунок 5 – Сравнение расчетных и наблюдаемых понижений уровня подземных вод в кустах скважин 7Ц-7P и 2Ц-2P

Результаты, представленные в главе 3 показывают, что:

- численное моделирование позволяет более детально учесть условия трещиноватой толщи, где существует возможность задать детально структурные элементы, чем при аналитической обработке. Итоговая оценка показывает, что коэффициент фильтрации матрицы оказался в 2-3 раза меньше, чем при аналитической обработке;

- при сравнении графиков водопонижений, рассчитанных на модели и наблюдавшихся при выполнении откачек, можно сделать вывод о том, что модель в целом повторяет фактический ход откачки.

Трехмерное численное моделирование позволяет определить фильтрационные свойства основных структурных элементов, которые являются наиболее важными гидрогеологическими характеристиками массива, они необходимы для построения геофильтрационных моделей, являющихся, в свою очередь, основой для последующих геомиграционных прогнозов.

В главе 4 приведена методика проведения и результаты пакерных полевых исследований, направленных на получение информации, призванной улучшить качество параметризации фильтрационной модели. Автор принимал активное участие в планировании и проведении полевых исследований, в период с июля по август 2021 года, а затем организовывал и осуществлял обработку и интерпретацию полученных результатов.

В разделе 4.1 приведен обзор предшествующих работ по изучению фильтрационных характеристик горных пород на участке «Енисейский» и зарубежный опыт таких исследований на объектах-аналогах, на основе которых

сделан вывод о необходимости дополнительных исследований в части проведения опытно-фильтрационных работ. Связи с принципиальной важностью для целей работы в разделе также описаны характерные особенности использованного оборудования (на рисунке 6 приведена схема использованного двухпакерного снаряда) и разработанная методика с участием автора, с помощью которой были выполнены исследования.

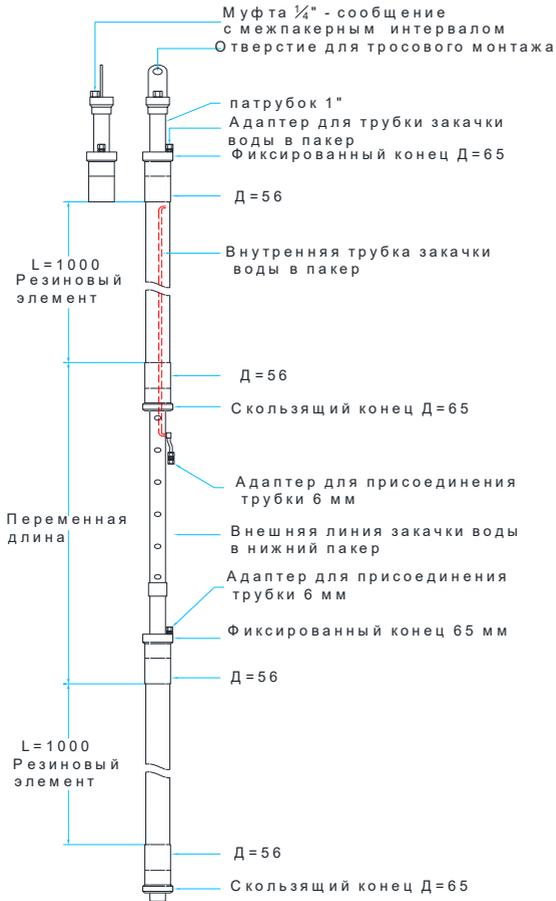


Рисунок 6 – Схема двухпакерного снаряда (L – длина резинового элемента, D – диаметр пакерного элемента)

В разделе 4.2. приводится интерпретация поинтервальных исследований, выполненных при участии автора на скважине, пробуренной на участке «Енисейский». Полевые данные были обработаны на основе аналитического решения Б.С. Шержукова для мгновенного налива в несовершенную скважину.

Результаты интерпретации данных представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры интервалов

№ п/п	Интервал, м	$km,$ $m^2/сут$	ζ	$\mu, *10^{-5}$	$k, м/сут, *10^{-4}$	
					2021 г.	2010 г.
1	250 - 700	0,0194	0	3	0,431	4,3
2	250-586,7	0,0147	0,1	80	0,437	4,7
3	497,6 – 507,6	0,002	0,1	8	2	-

Отличительные особенности полученных результатов по сравнению с 2010 годом заключается в том, что было применено новое современное оборудование, а для обработки использовалось аналитическое решение Б.С. Шержукова, и, вероятно, полученные значения уровней и коэффициентов фильтрации в 2010 г. являются осредненными величинами без конкретной принадлежности.

Основные выводы по главе 4 заключаются в следующем:

- коэффициент фильтрации для горных пород, залегающих в интервале от 250 до 700 м на порядок меньше по сравнению с аналитической обработкой, выполненной на оценочной стадии;

- опытные работы показали, что двухпакерный снаряд при использовании в кристаллических породах обеспечивает надежную изоляцию изучаемых интервалов, что исключает перетоки подземных вод и даёт наиболее достоверную величину при определении фильтрационных характеристик.

В главе 5 представлено описание моделирования процессов геофильтрации и геомиграции для участка «Енисейский».

В разделе 5.1 приведено описание моделей и показаны результаты трехмерного моделирования на основе концепции сплошной среды (EPM – equivalent porous medium) и дискретной среды (DFM – discrete fracture matrix), выполненные на специальной разработанной модели. Приводятся результаты сопоставления и обоснование выбора подхода для последующих долговременных прогнозов.

Трехмерная модель была разработана на основе кода GeRa/V1, возможность использования неортогональной дискретизации которого (см. рисунок 7) позволяет адекватно отражать геологические особенности объекта. Модель, разбита на 16 слоев для более детального отображения геологических особенностей участка «Енисейский» и содержит 214 069 ячеек. Расчетная область соответствует границам водосборных бассейнов, включая р. Байкал, р. Шумиха, р. Плоский, по западной границе проходит русло р. Енисей.

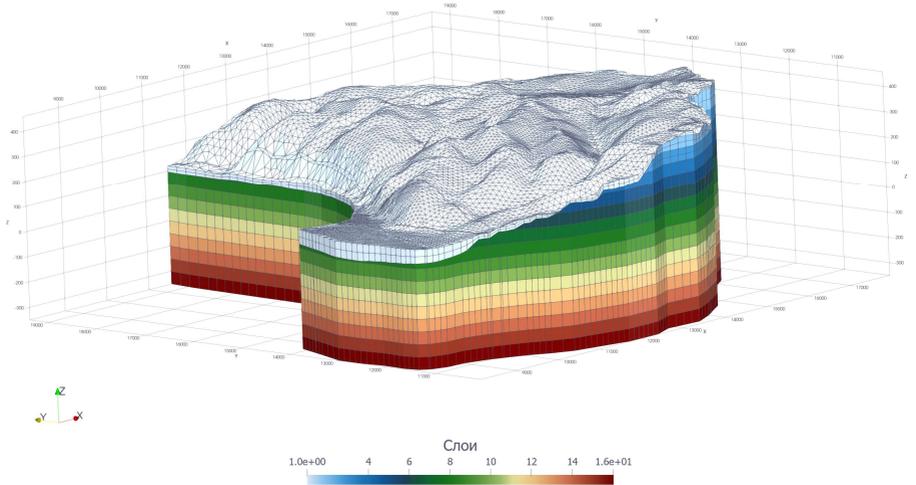
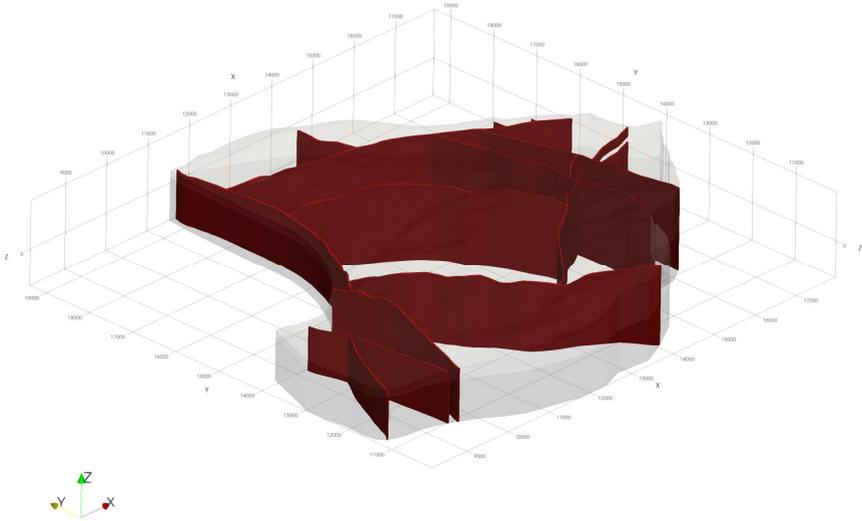


Рисунок 7 – Дискретизация расчетной области

В модель включена схема разрывных нарушений, представленная на рисунке 8. Разрывные нарушения заданы в виде вертикальных структур, такое приближение является допустимым, потому что они являются крутопадающими с углом падения $\sim 70-80$ градусов.



Разрывные нарушения

Рисунок 8 – Модельное расположение основных разрывных нарушений (вид сбоку)

Область трехмерной модели разбита в соответствии с принятой схемой разрывных нарушений на относительно монолитные блоки, имеющие низкие фильтрационные свойства, дренируемые каналами, имеющими повышенную проницаемость. Для соответствия модели фактическим данным была проведена калибровка модели.

В ходе решения обратной задачи уточнялись значения фильтрационных параметров. Для калибровки модели использовались фактические замеры уровней в наблюдательных скважинах. Результат проведенной калибровки анализировался по следующей формуле:

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

где: $RMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)^2 \right]^{1/2}$, cal_i – i -ое расчетное значение, obs_i – i -ое

наблюдаемое значение, N – количество значений, ΔH – разница между минимальным и максимальным фактическими напорами на данной территории. Для моделируемой области ΔH составляет 162,5 м.

После выполнения калибровки ошибка SRMS составила около 6%. Полученную оценку можно охарактеризовать как приемлимую. График

сопоставления фактических и модельных результатов расчетов, представленный на рисунке 9.

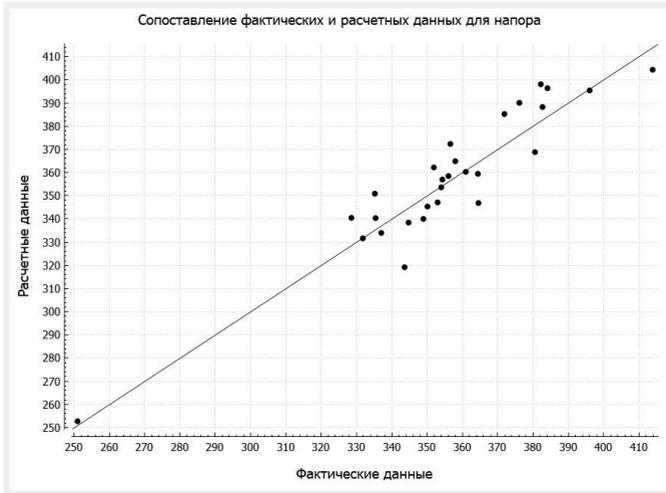


Рисунок 9 – Сопоставление фактических и расчетных значений напоров

В разделе 5.2 представлена трехмерная геомиграционная модель участка «Енисейский» и приведены расчеты миграции несорбируемого радионуклида.

В данном случае рассматривалась миграция радионуклида ^{129}I . Источник радионуклидов задавался как точечный в девятый модельный слой, что соответствующий целевому интервалу. Начальная активность была взята равной $1 \cdot 10^{10}$ Бк.

Коэффициент диффузии для всех слоев модели принят равным 10^{-5} м²/сут для консервативности расчетов, т.к. в реальности он ниже.

На рисунке 10 приведены результаты расчетов миграции ^{129}I . Можно отметить, что основное движение приурочено в направлении р. Шумиха вдоль Шумихинского разлома, а основная разгрузка происходит в русло р. Енисей.

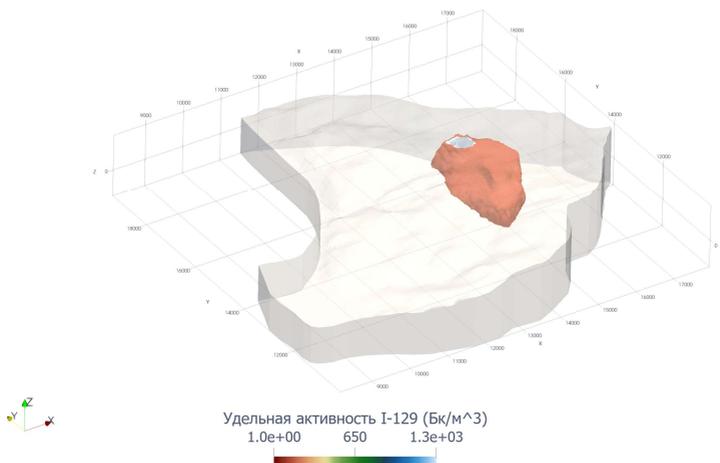


Рисунок 10 – Ореол распространения ^{129}I на момент времени 10 000 лет (вид боку)

В разделе 5.3 приведены результаты по анализу чувствительности трехмерной модели.

В заключении к главе 5 приведены краткие выводы по полученным результатам моделирования, основными из которых являются:

- имеется возможность выполнения расчетов миграции нейтрального трассера на основе блоковой структуры с использованием основных структурных элементов, расположенных в пределах участка «Енисейский»;
- результаты расчетов модели, построенной на основе имеющегося набора данных, демонстрируют, что основное направление движения подземных вод связано с региональной дренающей р. Енисей и локальной – р. Шумихой;
- время миграции несорбируемого радионуклида до потенциальной зоны разгрузки по результатам выполненных расчетов составляет около 36 000 лет;

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В рамках диссертационного исследования разработаны и обоснованы расчетными, аналитическим и экспериментальными методами трехмерные модели, обеспечивающие возможность дальнейшего развития обоснования долговременной безопасности первого в России пункта глубинного захоронения РАО на примере участка «Енисейский».

В результате выполнения диссертационной работы были:

1. Разработаны, параметризованы и верифицированы модели для обработки и интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ (откачек и опытных нагнетаний в скважинах, пакерных поинтервальных исследований). На их

основе установлено, что:

- в пределах кустов скважин 2Ц – Р-2 – 2-2 и 7Ц – Р-7 – 7-2 коэффициент фильтрации вмещающей среды (гнейсов) оценивается величиной от 2 до 3 раз меньшей, по сравнению со значениями, полученными на основе традиционной аналитической обработки. Это обеспечивает существенное снижение консерватизма ранее имеющихся представлений.

- двухпакерный снаряд при использовании в кристаллических породах обеспечивает надежную изоляцию изучаемых интервалов, что исключает перетоки подземных вод и даёт наиболее достоверную величину при определении фильтрационных характеристик;

2. Разработан алгоритм анализа гидрогеологических условий с применением численного моделирования (на основе плановой и профильной геофильтрационных моделей) для определения значимых для обоснования долговременной безопасности характеристик потока подземных вод, позволяющий оценить влияние структурных элементов геологической среды, определяемых на основе опытных работ, в том числе:

- обнаружены закономерности для значений проницаемости различных структурных элементов, связанные с уровнем трещиноватости;

- на основе использования плановой геофильтрационной модели выявлено существенное влияние структурных элементов на поток подземных вод.

3. На основе анализа чувствительности трехмерной модели к фильтрационным свойствам основных разрывных нарушений обоснован перечень гидрогеологических параметров кристаллической среды, наиболее значимых для обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. Параметрами, в наибольшей степени влияющими на интенсивность переноса загрязнителя из области размещения РАО, являются: коэффициенты фильтрации трех тектонических нарушений Шумихинского, Безымянного, Верхнешумихинского и показатели инфильтрационного питания.

4. Определено, что основная миграция происходит в пределах трех тектонических нарушений, знания о фильтрационных характеристиках которых являются важными для долговременной безопасности. Время миграции (пиковые значения) несорбируемого радионуклида до потенциальной зоны разгрузки составляет около 36 000 лет;

5. Показано, что для параметрического обеспечения расчетных моделей и последующего обоснования безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов необходимо применять трехмерное моделирование. Разработанные модели позволяют проводить прогнозные расчеты геомиграции загрязнителей в подземных водах и использоваться для таких задач, как расчет долговременных последствий реализации сценариев эволюции геологической среды на данной территории.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработка геофильтрационной модели для участка «Енисейский» и оптимизация ее параметров при помощи гибридного оптимизационного алгоритма. Валетов, Г. Д. Неуважаев, В. С. Свительман. // Известия РАН. Энергетика, 2020, № 1, стр. 128-137.
2. Неуважаев Г.Д. Моделирование миграции радионуклидов в скальных породах. Школа-семинар. Моделирование гидрогеологических процессов: от теоретических представлений до решения практических задач. 2017, электронный сборник.
3. Неуважаев Г.Д. Гидродинамические расчеты для оценки безопасности Нижнеканского массива. Сборник трудов XVIII научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2017. с. 114-118.
4. Неуважаев Г.Д. Разработка геофильтрационно-геомиграционной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов на Нижнеканском массиве. Сборник трудов XVII научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2016. с. 134-135.
5. Валетов Д.К., Неуважаев Г.Д., Свительман В.С. Модификация эвристического оптимизационного алгоритма Harmony Search в применении к задаче калибровки профильной фильтрационной модели. Сборник трудов 61 научной конференции МФТИ. – 2018.
6. D.K. Valetov, G.D. Neuvazhaev, V.S. Svitelman, E.A. Saveleva. Hybrid Cuckoo Search and Harmony Search Algorithm and Its Modifications for the Calibration of Groundwater Flow Models. Proceedings of the 11th International Joint Conference on Computational Intelligence: IJCCI 2019. – Springer, 2020.
7. Substantiation of the rock massif permeability based on packer tests Georgii Neuvazhaev and Alexandr Rastorguev E3S Web Conf., 98 (2019) 10004
8. Неуважаев Г. Д., Савельева Е. А., Свительман В. С. Вариационный метод оценки чувствительности миграционной модели // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 1(6). — С. 69—76.
9. К вопросу выбора инженерных барьеров пунктов приповерхностного захоронения РАО на примере сценария переполнения. Богатов С.А., Неуважаев Г.Д., Коновалов В.Ю. Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 3 (95). С. 3-14.
10. Neuvazhaev G. et al. 3D hydrogeological modeling of Deep Geological Disposal in the Nizhnekansky Rock massif //EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2020. – С. 21509.
11. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Неуважаев Г. Д., Озерский Д. А. Анализ подходов к консервации и ликвидации скважин на участке недр «Енисейский» (Красноярский край, Нижнеканский массив) // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 30—41. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-30-41.

12. Неуважаев Г.Д., Озерский Д.А., Расторгуев А.В., Пленкин А.В., Григорьев Ф.В. Проблемы гидрогеологического моделирования в слабопроницаемых породах (на примере участка размещения подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае) // Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. С. 516 – 520 DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-516-520.

Неуважаев Георгий Дмитриевич

Разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей для обоснования безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (на примере участка «Енисейский»)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.07.2022
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.
Печать на аппарате Rex-Rotary.
ИБРАЭ РАН. 115191, Москва, ул. Б.Тульская, 52
Телефон: 8-495-955-22-66