

На правах рукописи



Алексей Владимирович Моисеенков

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ЦЕЛОСТНОСТИ
ПОКРЫШЕК ФЛЮИДОУПОРОВ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ОТХОДОВ
БУРЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ГЛУБОКИХ
ГОРИЗОНТАХ НЕДР**

Специальность 1.6.9 Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в обществе с ограниченной ответственностью «Сахалинская энергия» в управлении научно-технического развития и технических данных.

Научный руководитель: **Дубиня Никита Владиславович**,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией фундаментальных проблем
нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга

Официальные оппоненты: **Карев Владимир Иосифович**,
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук, заместитель директора по
науке, главный научный сотрудник
Ялаев Тагир Рустамович
кандидат физико-математических наук,
Акционерное общество «Институт геологии и разработки
горючих ископаемых» (АО «ИГиРГИ»), главный
специалист отдела научно-технического развития и
моделирования

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени
И.М. Губкина

Защита состоится 30 октября 2025 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного
совета 24.1.132.01 при ИФЗ РАН по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая
Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте www.ifz.ru.
Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при
Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте
института www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в одном экземпляре, просьба направ-
лять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН,
ученому секретарю диссертационного совета Руслану Александровичу Жосткову.

Автореферат разослан _____ сентября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Освоение месторождений углеводородов, расположенных в прибрежных акваториях, становится одной из самых актуальных практических задач топливно-энергетического сектора ввиду постепенного истощения запасов на месторождениях нефти и газа, расположенных на суше. Протяженности скважин, пробуренных с морской стационарной платформы, могут достигать 10 км и более, (рисунок 1). При бурении и эксплуатации морских месторождений образуется огромное количество отходов бурения и технологических жидкостей, включающие выбуренный шлам, буровой раствор на углеводородной или водяной основе, различные высоковязкие жидкости на полимерных основах, жидкости глушения и заканчивания, консервационные жидкости, дренажные воды, морская и пластовая вода и другие технологические жидкости производства. Как правило утилизируемые жидкости содержат различные соли и химические реагенты, полимеры, а также могут содержать углеводороды.

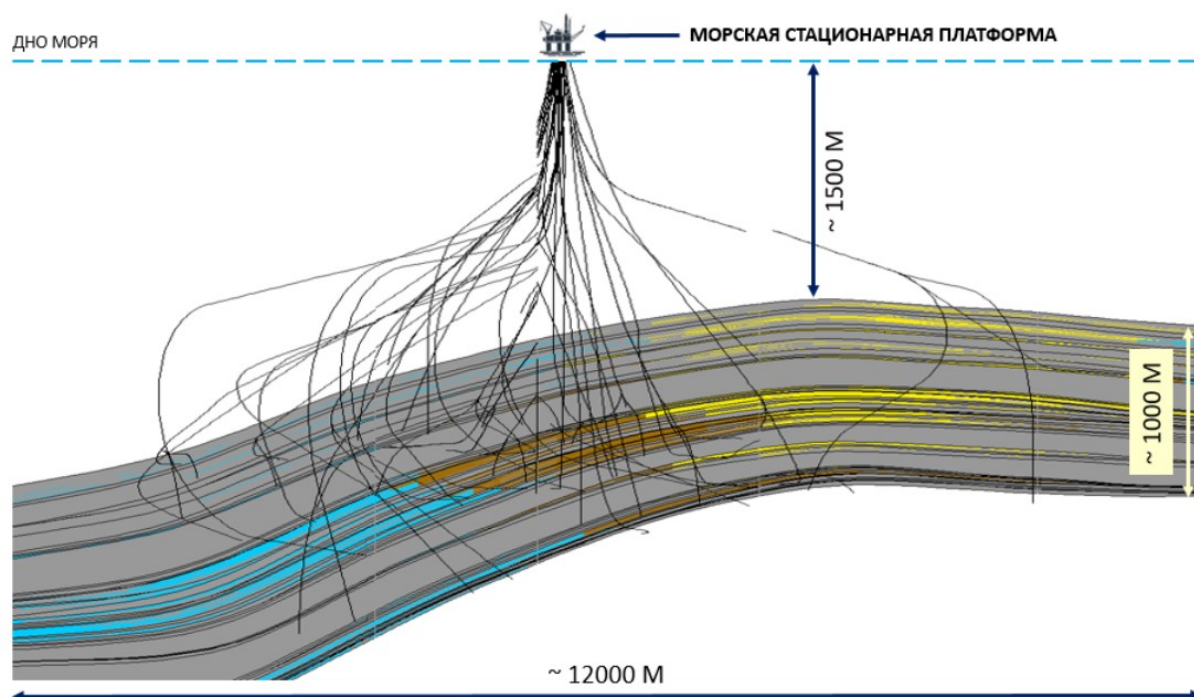


Рисунок 1. Геологический разрез типового месторождения в прибрежной акватории острова Сахалин, схема размещения платформы и скважин.

Освоение морских месторождений требует принципиально иных подходов по сравнению с сухопутными, особенно в вопросах утилизации отходов бурения. Сложности эксплуатации включают ограниченное количество скважин на морских платформах, специфическую инфраструктуру и сложную логистику. Особенно остро эти проблемы проявляются в северных широтах, где ледовый покров (как видно на примере сахалинского шельфа в апреле 2025 года – рисунок 2) делает месторождения недоступными большую часть года – восточные участки с запасами освобождаются ото льда только к началу июня.

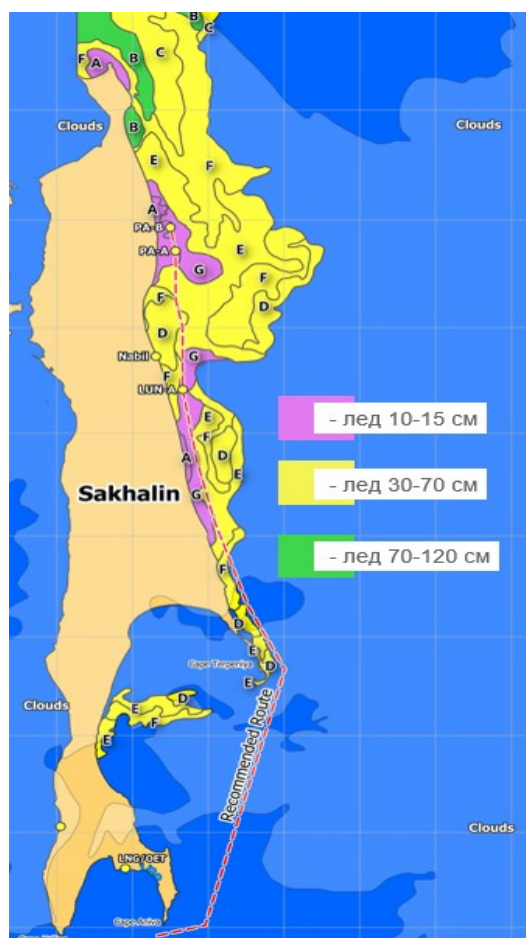


Рисунок 2. Карта ледового покрова в прибрежной акватории острова Сахалин в конце апреля 2025 года.

Утилизация отходов бурения и технологических жидкостей на морских месторождениях сопряжена с существенными экологическими и геологическими рисками. К потенциальным негативным последствиям относятся загрязнение морских вод, подземных водоносных горизонтов,

поверхностных водоемов и лесных массивов, а также возникновение аномальных давлений в нецелевых пластах, несанкционированное размещение отходов, нарушение целостности скважин, активизация тектонических разломов и снижение устойчивости морских сооружений. Эти факторы обуславливают необходимость совершенствования технологий утилизации отходов и разработки новых методов контроля, направленных на повышение экономической эффективности и минимизацию рисков при освоении морских месторождений углеводородов. Перспективной является технология закачки отходов в глубокие проницаемые пласты-домены, требующая обеспечения надежной изоляции закачиваемых жидкостей покрывающими флюидоупорами.

Степень разработанности темы исследования.

Технология закачки отходов в глубокие проницаемые пласты-домены была предложена в качестве основного ответа на сложности, возникающие при работе с шельфовыми месторождениями [Abou-Sayed, 2002]. Опыт первых проектов [Saasen et al., 2001] позволил сформулировать критерии успешной закачки. В обзоре [Kesk, 2002] также были перечислены основные сложности, связанные с развитием слабо контролируемых трещин при закачке. С течением времени обратная закачка отходов бурения в пласт стала предпочтительным способом утилизации отходов на морских месторождениях. Были опубликованы описания успешных операций на месторождениях, расположенных в северных широтах [Guo et al., 2007; Svensen, Taugbol, 2011], на Дальнем [Guo et al., 2005; Xu, 2014; Ling et al., 2017] и Ближнем Востоке [Gogan et al., 2010; Razmgir et al., 2011; Mehtar et al., 2016], в Южной Америке [Pocin et al., 2015; Vadinal et al., 2019], в Средиземном море [Kazamias, Zorpas, 2021] и на шельфе Африки [Jorissen et al., 2009; Мкраоро et al., 2015]. В подавляющем большинстве случаев обратная закачка отходов бурения в пласт показала себя как экономически оправданная оптимальная технология, причем в отдельных случаях [Poclin et al., 2015] была достигнута концепция нулевого сброса “Zero Discharge” [Paulsen et al., 2003]. Практическая реализация подхода сложна на текущем этапе

технологического развития и может быть отнесена к главным перспективам оптимизации освоения морских месторождений [Darajah et al., 2021]. При этом вопросы геологических и экологических рисков остаются открытыми.

Цель работы

Целью диссертационного исследования является снижение геологических и экологических рисков, сопряженных с утилизацией отходов бурения и технологических жидкостей, образуемых при разработке и эксплуатации морских месторождений углеводородов, характеризующихся сложными географическими и климатическими условиями.

Основные задачи исследования

1. Обзор современного состояния технологий и методик утилизации отходов бурения и технологических жидкостей в мировой практике; выбор оптимальных технологий для работы на морских месторождениях углеводородов, расположенных в зонах со сложными климатическими условиями.
2. Оценка геологических и экологических рисков реализации технологии закачки отходов в пласты-домены.
3. Разработка системы геофизического мониторинга состояния пластов-доменов и пластов-флюидоупоров для динамики их состояния и изменений в ходе проведения обратной закачки.
4. Создание концептуальной системы принятия решений по условиям размещения отходов бурения и технологических жидкостей, основанной на введении понятий технического и операционного пределов давления, учитывающей данные геофизического мониторинга и результаты одномерного геомеханического моделирования.
5. Разработка упрощенной математической модели процесса размещения отходов в глубоких горизонтах недр, позволяющей прогнозировать изменения состояния пластов-флюидоупоров при выбранных условиях

закачки для оценки геологических рисков и своевременного принятия решений об изменении режима работы скважины.

6. Применение разработанной системы принятия решений и системы геофизического мониторинга на территории прибрежной акватории острова Сахалин, для реализации технологии размещения отходов путем закачки в недра с минимумом геологических и экологических рисков.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в создании принципиально новой концепции безопасной утилизации отходов бурения и технологических жидкостей, основанной на определении технологического (безопасного) и операционного (рабочего) пределов давления в пластах-доменах. Разработана уникальная система геофизического мониторинга состояния пластов, не имеющая аналогов в мировой практике, которая позволяет контролировать целостность флюидоупоров и минимизировать риски при обратной закачке отходов бурения и технологических жидкостей. Предложенный подход обеспечивает экономически эффективное и экологически безопасное размещение отходов на морских месторождениях.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Система комплексного геофизического мониторинга позволяет реализовать программу размещения отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр с минимизацией геологических и экологических рисков в условиях труднодоступных морских месторождений.
2. Размещение отходов бурения и технологических жидкостей в подземных пластах доменах с геомеханическим и геофизическим контролем флюидоупоров является передовой технологией утилизации отходов при разработке месторождений в прилегающей акватории острова Сахалин.
3. Концептуальная модель условий прорыва пласта-флюидоупора позволяет использовать данные мониторинга для прогноза наполнения домена и

достижения операционных пределов при закачке отходов бурения и технологических жидкостей в пласт со снижением геологических и экологических рисков.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанная система геофизического мониторинга пластов-флюидоупоров при закачке отходов в пласты-домены, включающая математическую модель и систему принятия решений на основе операционных и технологических пределов, существенно снижает экологические и геологические риски морской нефтедобычи. Внедрение данной системы на месторождениях проекта Сахалин-2 доказало её эффективность для безопасной утилизации отходов бурения и технологических жидкостей, предотвращая потенциальные экологические катастрофы и обеспечивая устойчивое развитие морских нефтегазовых проектов России.

Методология и методы исследования

В рамках обзорной части исследования проведен детальный анализ мирового опыта и существующих технологий; выявлены их плюсы и минусы, проведено ранжирование по применимости для условий месторождений проекта Сахалин-2. Сформулированная модель условий прорыва пласта-флюидоупора принципиально основана на результатах анализа данных геофизических наблюдений за процессами, протекающими в пластах-доменах и флюидоупорах. Эта модель дополнена упрощенной теоретической моделью развития механических и фильтрационных процессах, основанных на положениях механики сплошных сред. Работоспособность предложенных подходов подтверждена с использованием данных геофизического мониторинга.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 146 страниц, 27 рисунков, две таблицы и список литературы из 112 наименований.

Личный вклад

Результаты работы, полученные лично соискателем в ходе проведения исследования, включают: выполнение обзора литературы применяемых технологий утилизации различных видов отходов, обоснование оптимальности технологии размещения отходов бурения и технологических жидкостей для условий морских месторождений со сложными климатическими условиями; разработку концепции геомеханического и геофизического контроля состояния пластов флюидоупоров и формирование системы комплексного геофизического контроля их состояния; разработку концептуальной модели операционного и технологического пределов закачки, формулировку упрощенной математической модели установления пределов и прогнозирование наполнения пластов-доменов. Создание программного комплекса для отслеживания режимов размещения отходов бурения и технологических жидкостей, оформлением и получением двух патентов, составление и реализация комплексов геофизических исследований, включающих геофизические исследования скважин (ГИС) и интерпретация 4D-сеймики для подтверждения концептуальной модели наполнения пластов-доменов и целостности пластов-флюидоупоров. Практическая реализация разработанной методики проводилась лично или под непосредственным руководством автора.

Достоверность и апробация результатов

Разработанная технология успешно применяется на 5 поглощающих скважинах, где накоплен уникальный опыт проектирования, бурения и эксплуатации. К концу 2024 года утилизировано 1 299 246 м³ отходов. Разработаны требования к геологическим условиям пластов и система мониторинга. Результаты опубликованы в 18 статьях и 16 тезисах, получено 2 патента. Технология, представленная в работе «Разработка и внедрение уникальной технологии контроля размещения отходов бурения и технологических жидкостей при разработке шельфовых месторождений нефти и

газа», основанная на научных результатах, изложенных в диссертации, удостоена премии ПАО «Газпром» в области науки и техники за 2023 год.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. Н.В. Дубине за плотное сотрудничество и поддержку на всех этапах выполнения работы, сотрудников ИФЗ РАН С.А. Тихоцкого, И.О. Баяк и Е.В. Новикову за ценные методические советы при подготовке диссертации. Сотруднику ООО «Литосфера» Я.И. Юсупову, за помощь в построении 1D геомеханической модели.

Ученым, внесшим вклад в развитие геомеханики: В. Родионову, С. Христиановичу, Q. Guo, M. Prats, M. Zoback и другим исследователям механики горных пород; ученым, внесшим вклад в развитие геофизической науки: А.И. Заборовскому, Е.К. Блиновой, А.Г. Колесникову, О.Ю. Шмидту, Г.А. Гамбурцеву и другим ученым без работ которых было бы невозможно мое исследование.

Своим коллегам А.В. Хабарову, А.В. Бересневу, А.К. Таланкину, И.М. Иванциву, М.В. Петровой за консультации в области петрофизики, геомеханики, геофизических исследований скважин и 4D сейсмомониторинга. В.А. Колчину, С.В. Никитину, за помощь в реализации программного продукта «eWellBook» с модулем мониторинга и прогнозирования наполнения пласта-домена. Т.Н. Гафарову, Р.Н. Окишеву, Р.Г. Облекову, И.В. Абрамову за постановку производственных задач с фокусом на безопасное производство и за поддержку в реализации концепции мониторинга в ПО «eWellBook» основанного на одном из защищаемых положений. И.Н. Сахаровой и А.С. Семенковой, А.В. Константинову за наставничество в области развития программного продукта и методической поддержке при подготовке диссертации. А.В. Шейкину за предоставленную возможность пройти дополнительные образовательные курсы по теме и за внедрение программы развития и накопления компетенций используемых при разработке шельфовых месторождений России. В.А. Григорьеву за помощь в оформлении патента № 2819034 «Способ захоронения буровых и технологических отходов при эксплуатации нефтегазоконденсатных, нефтяных и газовых месторождений».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна работы, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена обзору современных методов утилизации различных отходов включая отходы бурения и технологические жидкости при освоении и разработке месторождений нефти и газа. Данное исследование позволило обосновать выбор оптимального метода утилизации отходов бурения и технологических жидкостей применимого при освоении труднодоступных морских месторождений сложной логистики.

В разделе 1.1 проведен анализ девяти методов утилизации буровых отходов: наземное размещение, биodeградация, физико-химическая обработка, приведение в сверхкритическое состояние, электрокинетическая обработка, стабилизация (солидификация), закачка в соляные каверны, размещение в многолетнемерзлых породах и закачка подземные пласты с мониторингом через наблюдательные скважины. Для каждой технологии оценены технологические и экологические аспекты, а также ключевые критерии: контроль процесса, экологическая безопасность, непрерывность производства, прогнозируемость, объемы утилизации, применимость в северных/морских условиях, универсальность для других отходов и стоимость. Сравнительный анализ с использованием авторской системы оценки показал, что для морских месторождений Сахалина пригодны три метода: размещение на наземных полигонах, термическая обработка (сжигание/пиролиз) и закачка в пласты-домены с контролем флюидоупоров, причем последний метод признан оптимальным по сочетанию экологической безопасности и минимизации геологических рисков, **что обосновывает защищаемое положение 2:** размещение отходов бурения и технологических жидкостей в подземных пластах доменах с геомеханическим и геофизическим контролем флюидоупоров

является передовой технологией утилизации отходов при разработке месторождений в прилегающей акватории острова Сахалин

В разделе 1.2 обоснована целесообразность использования технологии закачки отходов в подземные пласты с флюидоупорами при обязательном контроле их целостности. Хотя метод имеет существенные преимущества, он несет риск прорыва флюидоупорного слоя с серьезными экологическими и экономическими последствиями, что требует разработки специальной системы мониторинга для своевременного выявления угроз. Эти выводы подтверждают положение исследования о перспективности данного метода для сахалинских месторождений при условии геомеханического и геофизического контроля.

Вторая глава посвящена технологии закачки отходов в пласты-домены, включая методы контроля наполнения пластов и проверки целостности флюидоупоров. Описывается комплексный подход, сочетающий геомеханический анализ и геофизический мониторинг для обеспечения безопасной утилизации отходов при морском бурении. Особое внимание уделяется механизмам контроля и предотвращения возможных нарушений в системе пласт-флюидоупор.

В разделе 2.1 описаны основные положения рассматриваемой технологии. Процесс закачки отходов бурового шлама в целевой пласт технологически состоит из нескольких стадий: сбор отходов бурения; измельчение отходов и замешивание их с вязким флюидом для удовлетворения требованиям к закачиваемым в породу отходам; закачка смеси в целевой пласт с использованием насосов высокого давления. Целевой пласт-домен выбирается в соответствии со способностью выше- и нижележащих пластов служить флюидоупором: при проведении закачки реализуется инициация и развитие трещины, схожей с магистральной трещиной гидроразрыва. На первом цикле закачки в пласте развивается классическая трещина гидроразрыва, направленная вдоль максимального и перпендикулярно минимальному главным напряжениям. После прекращения первого цикла происходит миграция закачанной смеси в

пласт, перераспределение давления флюида в окрестности скважины и, соответственно, изменяется напряженно-деформированное состояние пород околоскважинной и околотрещинной зон. Повторная закачка происходит в уже нарушенном поле напряжений, в связи с чем может произойти повторное раскрытие уже сформированной трещины и/или инициация новой, что ведет к развитию в пласте зоны трещиноватости. Подчеркиваются риски прорыва системой трещин вышележащих пластов (флюидоупоров). Исходя из условий такого развития, пласт, в который производится закачка, выбирается на основании упруго-прочностных свойств и распределения пластовых напряжений: для успешного проведения циклической закачки необходим высокий контраст между минимальными напряжениями, действующими в целевом пласте и пласте-флюидоупоре, поскольку в ходе закачки происходит рост эффективных напряжений.

В разделе 2.2 описаны основные этапы реализации технологии обратной закачки: подготовка проекта к эксплуатации; операционная стадия закачки – контроль рабочих параметров; мониторинг и подтверждение целостности системы. Раздел посвящен операционным рекомендациям разработанным автором в рамках своей производственной деятельности. Даются рекомендации по периодической закачке пульпы бурового шлама, состоящей из твердых частиц шлама, перемолотых до 400 мк, морской воды и загеливающих агентов порциями по 250 м³, после чего закачка пульпы в скважину останавливается для подготовки следующей порции пульпы бурового шлама. Продолжительность такой остановки не превышает 3 часа, если отходов бурения больше нет, в скважину закачивается продавочная порция объемом которой складывается из объема скважины и дополнительных 90 м³ морской воды, с целью перепродавки единичной порции пульпы из скважины в трещину, после чего закачка прекращается и наступает закрытие трещины. При необходимости закачать несколько порций пульпы бурового шлама, после каждой порции пульпы объемом до 250 м³ закачка останавливается на период до 3 часов для

релаксации, после чего можно закачать следующую порцию пульпы. При достижении накопленного объема порций 1000 м^3 осуществляется промывка скважины морской водой объемом до 150 м^3 , после чего скважина закрывается на релаксацию на период до 12 часов. В работе дано описание того, какое оборудование используется для контроля процесса закачки отходов бурения.

Раздел 2.3 посвящен подготовке к реализации проекта. Значительное внимание уделяется критериям, на основании которых выбирается целевой пласт-домен. На основании литературных данных предложен набор требований: мощность целевого пласта более 2 м; мощность пласта-флюидоупора более чем в 4 раза больше мощности целевого пласта; проницаемость между 10 мД и 10 Д; глубина залегания целевого пласта между 200 и 3000 м; наличие переслаиваний песка и сланца (несколько слоев). Также проанализирован механизм сдерживания зоны разрушения флюидоупорами. Рассмотрены три механизма: барьер напряжений (наличие пласта над зоной закачки с более высоким давлением разрушения), барьер проницаемости (наличие высокопроницаемого пласта над зоной закачки с более низким давлением разрушения) и барьер модуля упругости (наличие пласта над зоной закачки с более высоким модулем упругости). Описаны минимальные и оптимальные комплексы исследований (таблица 1), на основании которых могут быть получены данные для успешного выбора целевого пласта-домена. Отмечена необходимость прогноза давлений закачки для корректного подбора поверхностного оборудования на данном подготовительном этапе.

Минимальный комплекс исследований для выбора пласта-домена включает 3D сейсмику, стандартные ГИС (электрический, температурный, нейтронный, гамма-каротажи) и лабораторный анализ свойств целевого пласта. Оптимальный комплекс дополняется специальными ГИС (кавернометрия, кросс-дипольный каротаж, микросканирования) и лабораторными исследованиями механических характеристик флюидоупоров.

	Минимальный комплекс	Оптимальный комплекс
Выбор целевого пласта- домена (ЦП)	<u>Сейсмические исследования</u> Сейсмика 3D	<u>Сейсмические исследования</u> -
	<u>ГИС</u> Электрический каротаж Температурный каротаж Гамма-каротаж Нейтронный каротаж Плотностной каротаж	<u>ГИС</u> Кавернометрия Кросс-дипольный акустический каротаж Электрический и акустический микроимиджи
	<u>Лабораторные исследования</u> Электрические свойства ЦП Транспортные свойства ЦП. Механические свойства ЦП.	<u>Лабораторные исследования</u> Механические свойства пород пластов- флюидопоров

Таблица 1. Минимальный и оптимальный комплексы исследований для выбора целевого пласта-домена

При длительной закачке отходов напряжения в пласте постепенно увеличиваются, приближаясь к предельным значениям флюидоупора. Без контроля это приводит к прорыву. Для предотвращения установлены два критических параметра: рабочий и технический пределы давления - ключевой момент, обсуждению которого посвящена глава 3. Основным индикатором служит давление закрытия трещины, рост которого отслеживается комплексом методов: акустическими, ультразвуковыми, электромагнитными исследованиями, профилометрией, а также методами изучения профиля приемистости (термометрия, шумометрия, расходометрия) и скважинной съемкой. Разработанная система мониторинга, включающая эти методы, успешно апробирована на поглощающих скважинах.

На основании описанных подходов предложена программа, состоящая из следующих элементов: 1) геомеханический анализ и оценка прочностных свойств пластов-флюидопоров; 2) оптоволоконный температурный контроль,

включающий применение распределенной термометрии для непрерывного мониторинга температуры по стволу скважины; 3) каротаж спектральной шумометрии и высокочувствительной термометрии 4) 4D-сейсмомониторинг; 5) оптоволоконное трехмерное вертикальное сейсмическое профилирование.

В разделе 2.6 представлена программа мониторинга и контроля целостности системы, основанная на комплексировании разномасштабных геофизических методов, исследований и скважинных испытаний для реализации технологии обратной закачки с минимальными экологическими рисками и геологическими рисками что позволяет сформулировать основное научное положение, выносимое на защиту: система комплексного геофизического мониторинга позволяет реализовать программу размещения отходов бурения и технологических жидкостей в глубоких горизонтах недр с минимизацией геологических и экологических рисков в условиях труднодоступных морских месторождений (**защищаемое положение 1**).

Глава 3 посвящена концептуальной и математической модели обратной закачки, использующейся для выбора параметров, при которых происходит реализация рассматриваемой технологии.

Раздел 3.1 вводит ключевые параметры контроля закачки - технический (проектный) и операционный (рабочий) пределы давления, основанные на предотвращении прорыва во флюидоупор. Концепция визуализирована цветовой схемой: зеленая зона (безопасная работа) ограничена минимальным горизонтальным напряжением флюидоупора; желтая (технический предел) - давлением распространения трещины; красная (опасная) начинается от этого давления. Отмечено, что давление гидроразрыва не используется как граница из-за возможной естественной трещиноватости пород. При достижении давления распространения трещины требуется переход на другой пласт. Наблюдаемый рост давления закрытия трещин подтверждает увеличение напряжений в пласте, что учитывается в системе контроля.

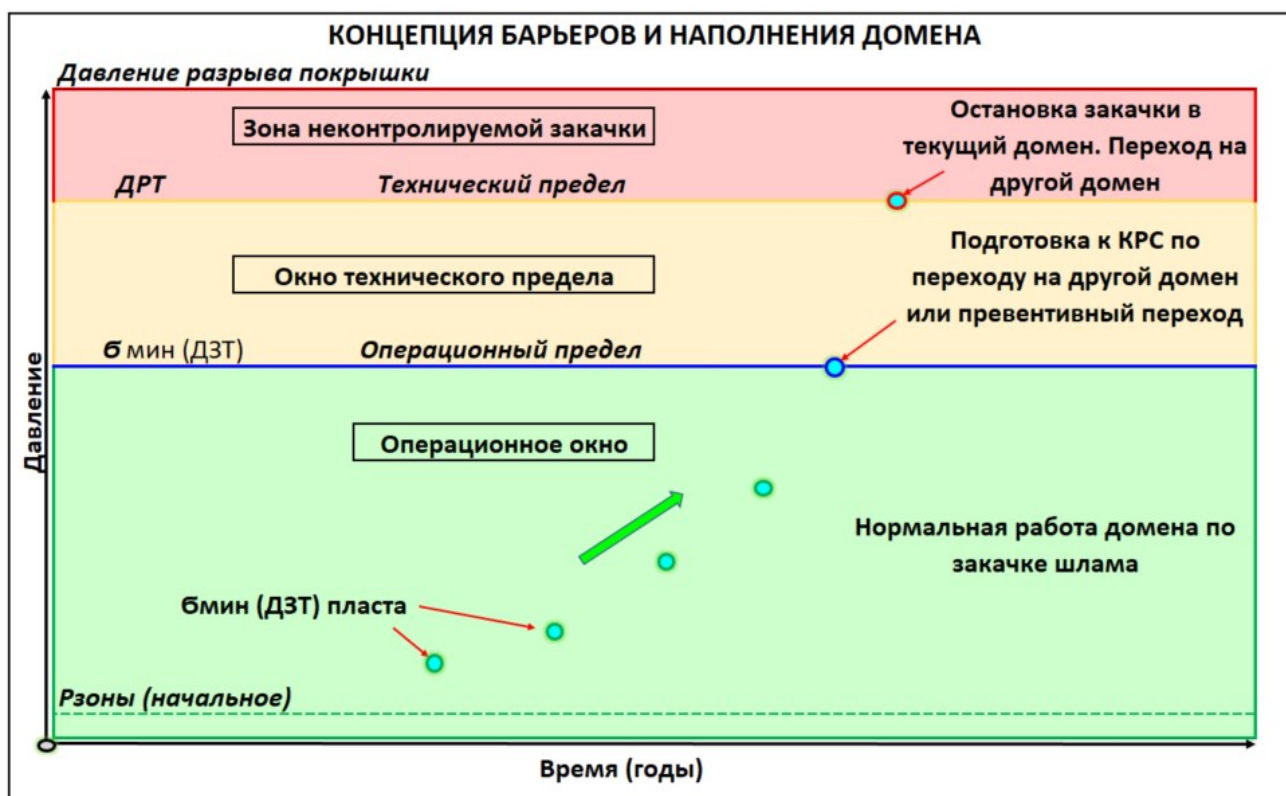


Рисунок 3. Схема наполнения пласта домена во времени и установленные пределы

Технический предел определяется прочностными свойствами пород и устанавливается на уровне давления распространения трещины во флюидоупоре ($ДРТ_{флюидоупора}$). Превышение этого предела приводит к неконтролируемым закачкам и прорыву трещин через флюидоупор.

Операционный предел устанавливается на уровне давления закрытия трещины во флюидоупоре ($ДЗТ_{флюидоупора}$). Достижение этого предела указывает на заполнение зоны размещения отходов и требует либо остановки скважины, либо перехода на другой интервал закачки.

Перед началом закачки в зону поглощения исходное пластовое давление зоны размещения ($P_{зоны}$) должно быть ниже минимального горизонтального напряжения в пласте ($\sigma_{мин\ пласта}$). Это напряжение, в свою очередь, должно быть ниже минимального горизонтального напряжения флюидоупора ($\sigma_{мин\ флюидоупора}$), которое, в свою очередь, ниже давления распространения трещины во флюидоупоре ($ДРТ_{флюидоупора}$). Таким образом, соблюдается следующая иерархия:

$$P_{\text{зоны}} < \sigma_{\text{мин пласта}} (\text{ДЗТ}) < \sigma_{\text{мин флюидоупора}} (\text{ДЗТ}) < \text{ДРТ}_{\text{флюидоупора}}$$

Минимальное горизонтальное напряжение ($\sigma_{\text{мин}}$) определяется как давление закрытия трещины (ДЗТ). Это значение является наиболее точным приближением для $\sigma_{\text{мин}}$. Давления $\text{ДЗТ}_{\text{пласта}}$, $\text{ДЗТ}_{\text{флюидоупора}}$ и $\text{ДРТ}_{\text{флюидоупора}}$ определяются для каждой зоны размещения на основе данных из скважин или геомеханической модели месторождения.

В рамках данной концепции сделаны следующие предположения: флюидоупор считается непроницаемым пластом, расположенным над пластом-коллектором; термоупругий эффект при закачке отходов не учитывается из-за малых объемов порционной закачки достаточного периода остановки и восстановления пластовой температуры; динамический пороупругий эффект не учитывается из-за кратковременности порционных закачек; статический пороупругий эффект в пласте учитывается при определении давления закрытия трещины ($\text{ДЗТ}_{\text{пласта}}$), во флюидоупоре этот эффект не учитывается из-за низкой проницаемости; трещины распространяются латерально в пределах зоны закачки из-за более низкого минимального горизонтального напряжения в пластах-коллекторах по сравнению с флюидоупором.

Раздел 3.2 описывает упрощенную математическую модель прогнозирования изменений напряженного состояния пласта при циклической закачке. Модель рассматривает буровую смесь как упруго-вязко-пластичную среду с нелинейной реологией, используя концепцию эффективных напряжений Био для анализа изменений напряженного состояния. Поровое давление рассчитывается через решение задачи однофазной фильтрации в бесконечном горизонтальном пласте. Критическое давление прорыва флюидоупора определяется по критериям хрупкого разрушения. Модель учитывает слоистость среды с глубинной зависимостью упругих модулей (ступенчатая функция), предполагая временную зависимость напряжений в целевом пласте при постоянных напряжениях во флюидоупорах. Ключевые входные параметры модели включают: механические и фильтрационные свойства пласта, исходное

распределение горизонтальных напряжений, характеристики закачки (объемы, темпы) и давление закрытия трещины после каждого цикла.

Раздел 3.3 раскрывает методику определения давления закрытия трещины по данным мониторинга закачки. Ключевой подход основан на анализе кривой падения давления после остановки закачки, где давление закрытия выявляется через комплексный анализ: поведения самого давления, его первой производной и полулогарифмической производной относительно G-функции времени. На примере конкретного случая (рис.4) продемонстрировано, как по точкам закрытия трещины фиксируется мгновенное давление остановки, наиболее точно отражающее минимальное главное напряжение в пласте. Наблюдаемый рост этих значений в ходе циклической закачки полностью соответствует теоретическим ожиданиям, подтверждая работоспособность методики.

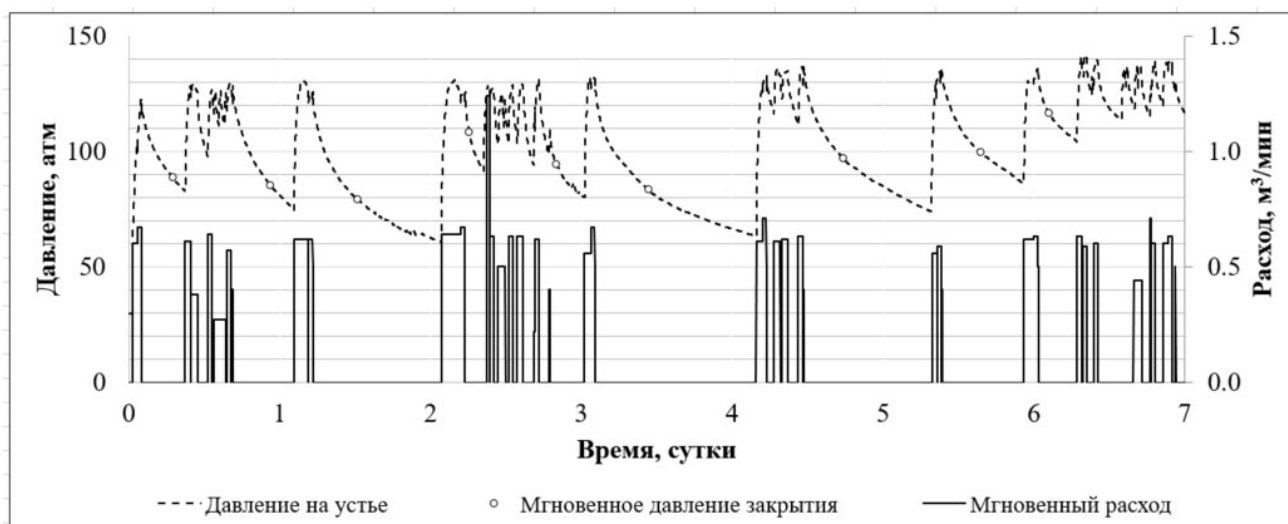


Рисунок 4. Фактические данные циклической закачки

В разделе 3.4 представлены результаты моделирования напряженного состояния на основе реальных данных с сахалинского месторождения. Построена 1D геомеханическая модель скважины с применением пороупругой модели, позволившая спрогнозировать эволюцию напряжений в пласте при продолжении закачки. На рис. 5 показано сравнение модельных расчетов (пунктирная линия) с фактическими изменениями минимального главного напряжения, демонстрирующее хорошее соответствие прогноза реальным

процессам. Результаты подтверждают адекватность разработанной модели для анализа напряженного состояния при длительной эксплуатации пласта.

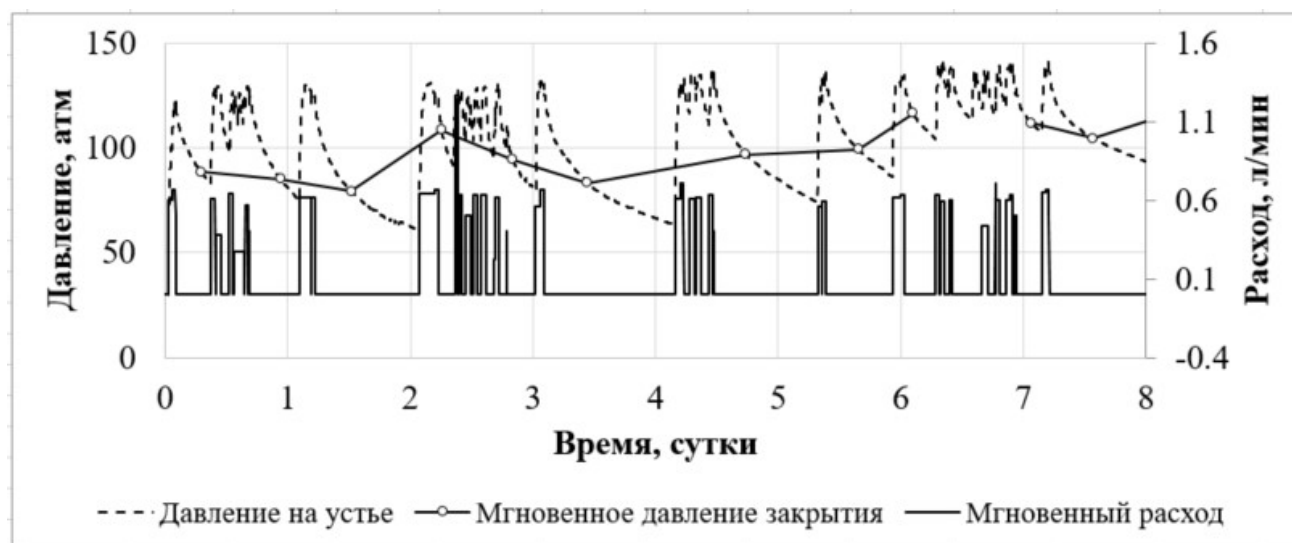


Рисунок 5. Модельные и фактические изменения минимального напряжения в пласте

В разделе 3.5 представлен ключевой результат - методика установления технического и операционного пределов давления закачки на основе геофизического мониторинга и геомеханического моделирования, направленная на предотвращение прорыва трещин во флюидоупоры. Дополнительно разработана прогностическая модель изменений напряженного состояния пласта, позволяющая оперативно корректировать режимы закачки. Эти результаты подтверждают научное положение о возможности прогнозирования пределов наполнения пласта-домена с использованием мониторинговых данных, что существенно снижает экологические и геологические риски при утилизации буровых отходов. Таким образом обосновывается **защищаемое положение номер 3**: концептуальная модель условий прорыва пласта-флюидоупора позволяет использовать данные мониторинга для прогноза наполнения домена и достижения операционных пределов при закачке отходов бурения и технологических жидкостей в пласт со снижением геологических и экологических рисков.

Глава 4 демонстрирует практическое применение разработанной методики на реальных месторождениях, подтверждая её эффективность для снижения экологических и геологических рисков при закачке отходов. Представлены результаты внедрения системы технических и операционных пределов давления, а также данные геофизического мониторинга, свидетельствующие о безопасной утилизации отходов в сложных климатических условиях морских месторождений. Результаты подтверждают работоспособность предложенного подхода даже в экстремальных природных условиях.

Раздел 4.1 описывает применение разработанной программы выбора целевых пластов и мониторинга состояния пластов-флюидопоров при разработке морских месторождений. Приведен анализ петрофизических и геомеханических данных для выбора целевого пласта (рисунок 6).

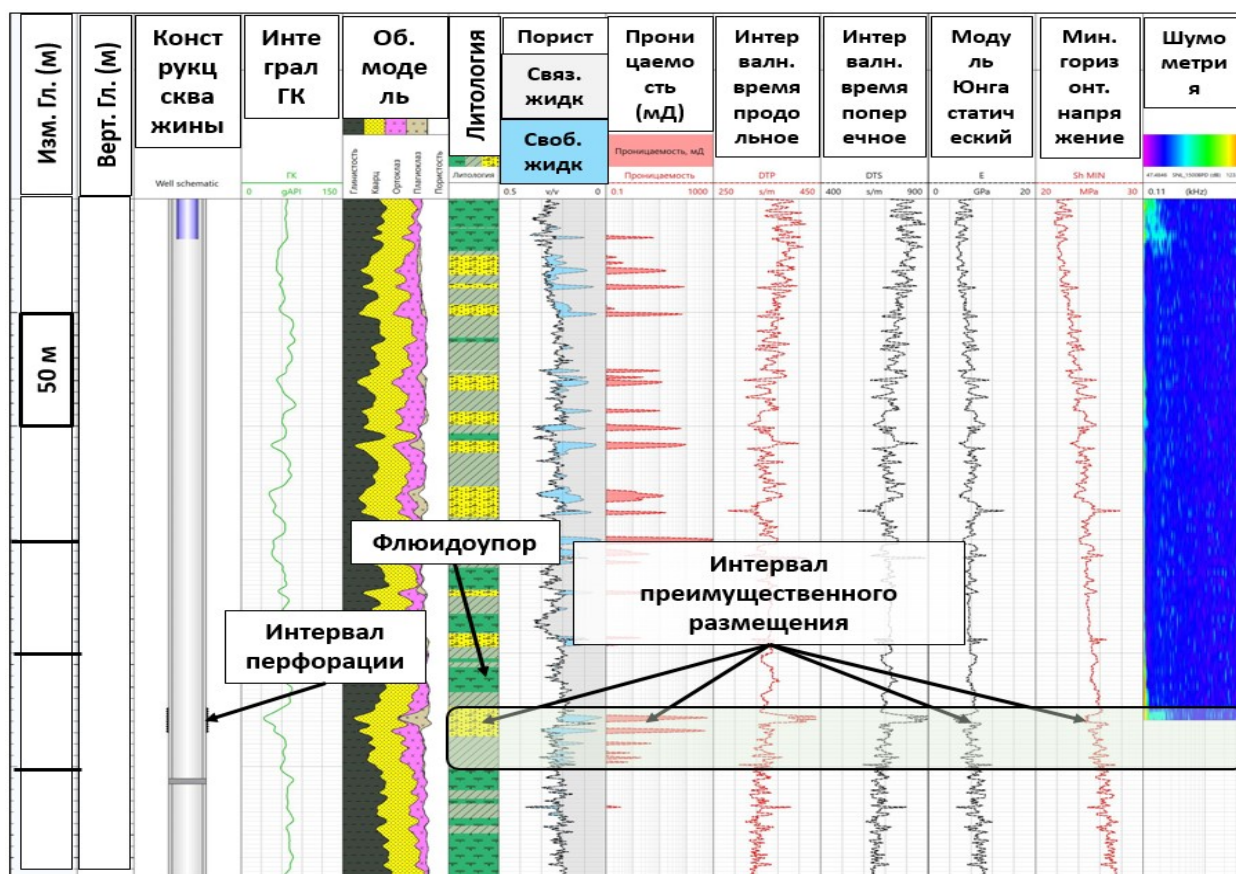


Рисунок 6. Петрофизический и геомеханический планшет

На основе разработанной концепции пределов создан электронный модуль, отслеживающий давление закрытия трещин и устанавливающий

операционные/технические лимиты (рис.7). Анализ 12-летней эксплуатации скважины показал: в 2016 году приближение к операционному пределу потребовало снижения интенсивности закачки, что привело к стабилизации давления. В 2019-2020 годах при полном заполнении домена (подтверждено ГИС) был выполнен капитальный ремонт с переходом на вышележащий пласт, что увеличило приемистость и снизило давления. Результаты подтвердили эффективность концепции контроля предельных напряжений.

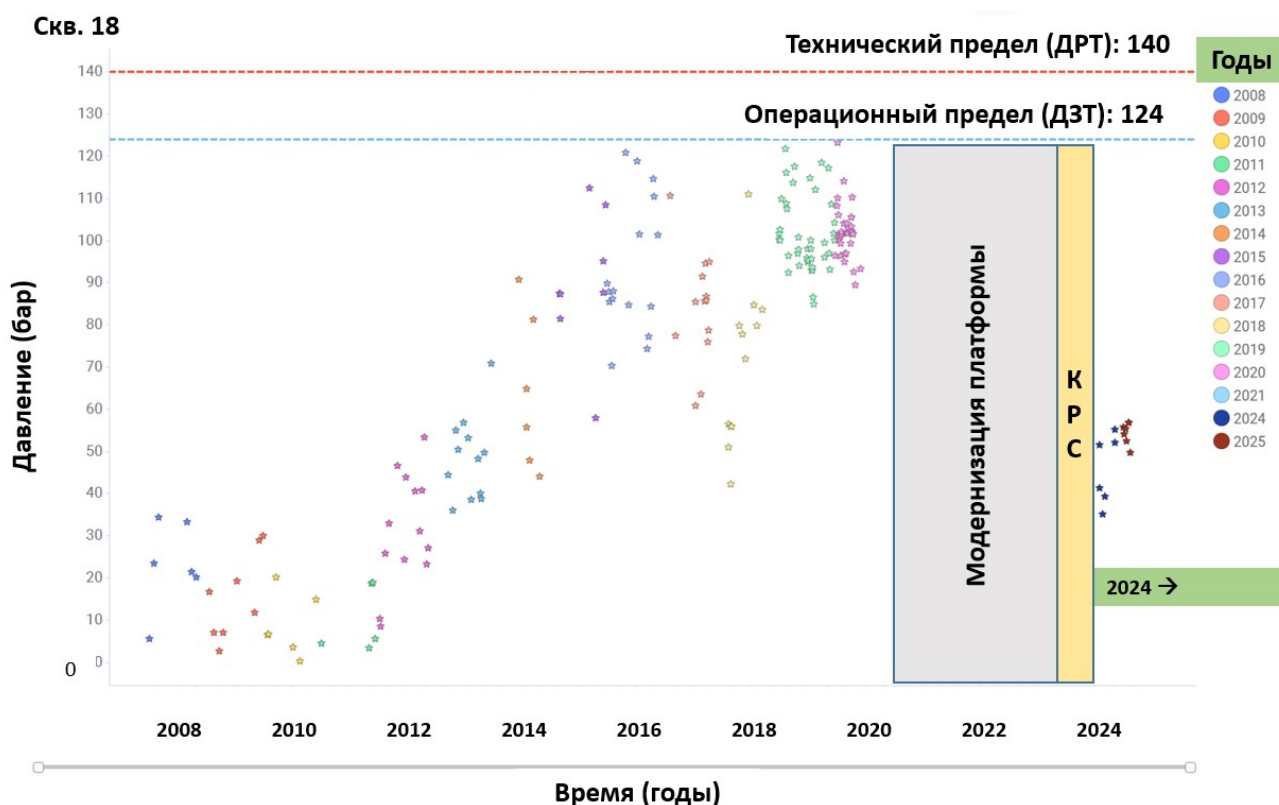


Рисунок 7. График зависимости давлений закрытия трещины от времени и переход на другой домен

Раздел 4.2 демонстрирует результаты 4D-сейсмического мониторинга, подтверждающие локализацию трещин в целевом пласте-домене. Регулярные сейсмические съемки фиксируют изменения петроупругих свойств и волнового поля, позволяя отслеживать динамику пластового давления, насыщенности, температурных аномалий и трещинообразования. Анализ дифракционных данных 4D выявляет зоны трещиноватости, ориентация которых соответствует

направлению максимального горизонтального напряжения, что верифицирует результаты геомеханического моделирования.

На рисунке 8 представлены горизонтальные срезы дифракционного куба, где голубым выделены зоны повышенного давления, свидетельствующие о формировании трещинной сети и насыщении притрещинного пространства жидкостью. Наблюдается четкая ориентация трещинной системы вдоль направления максимального главного напряжения, что соответствует фундаментальным принципам геомеханики.

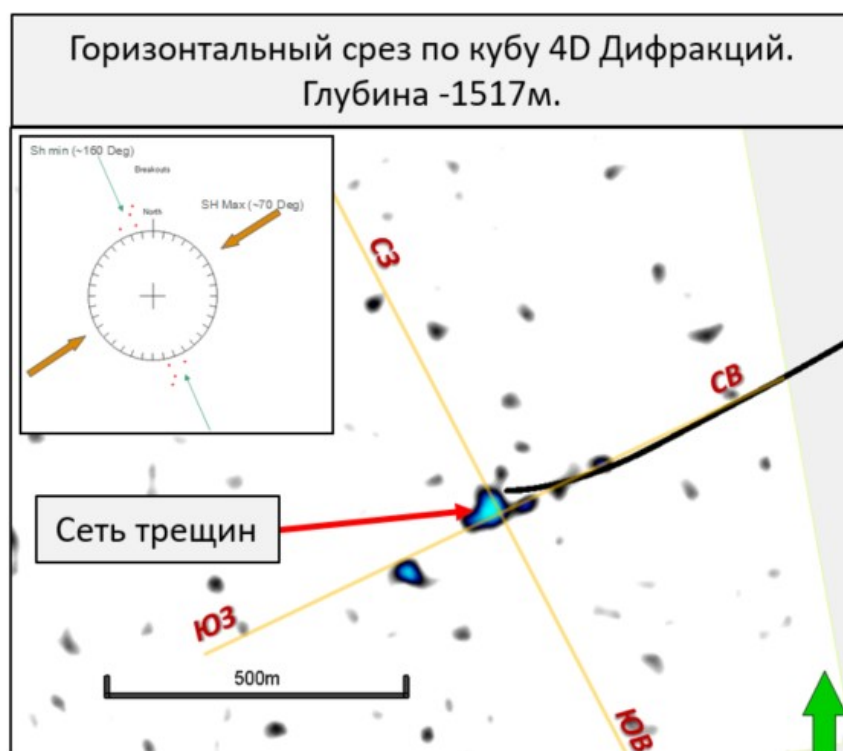


Рисунок 8. Горизонтальный срез по кубу 4D Дифракций, направления главных напряжений.

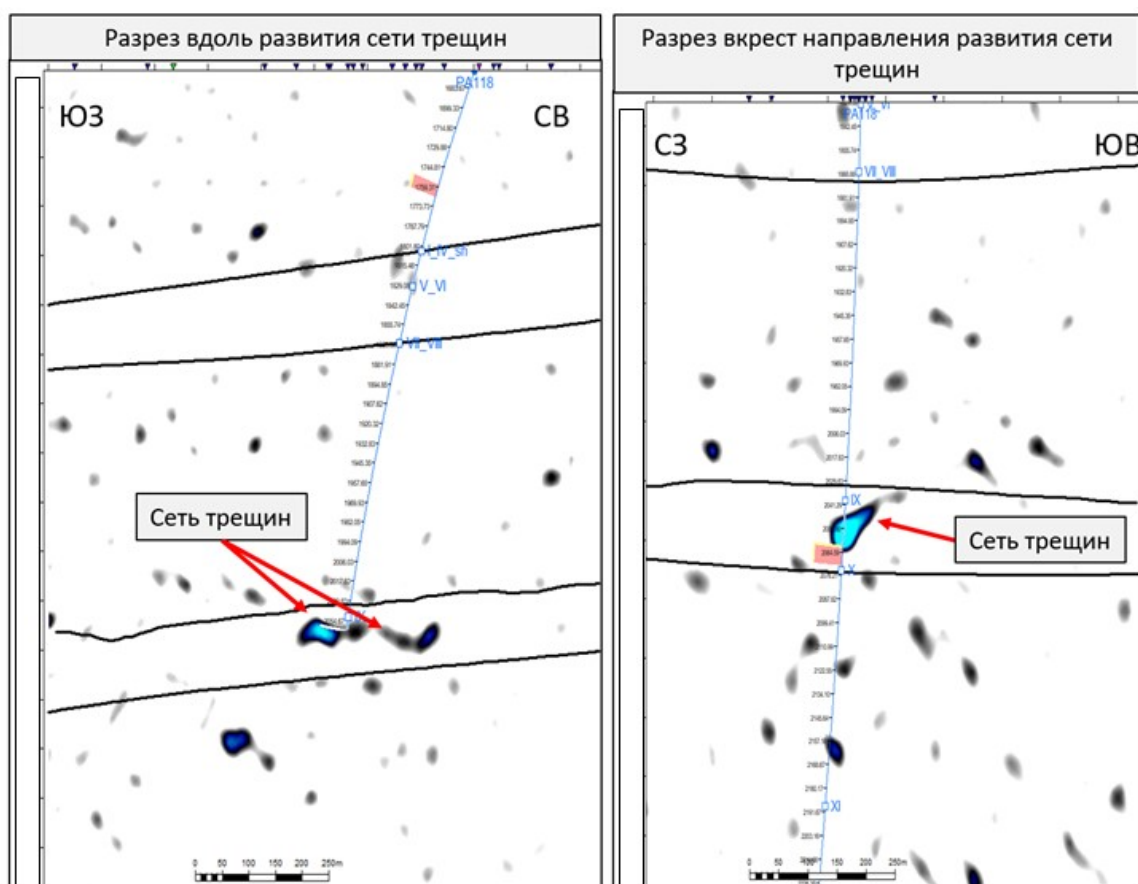


Рисунок 9. Разрезы вдоль и перпендикулярно сети образовавшихся трещин

На рисунке 9 представлены вертикальные разрезы дифракционного куба, где голубым выделены зоны активного трещинообразования от циклической закачки. Четкие границы пласта и флюидоупоров (сплошные линии) демонстрируют, что трещины полностью локализованы в целевом пласте-домене, что подтверждает безопасность технологии глубоинной утилизации отходов.

На основе 4D сейсмических исследований и интерпретации данных построена 3D визуализация системы (область повышенного давления). На визуализации (рисунок 10) видно, что система трещин имеет сложный характер, но в целом подчиняется законам геомеханики, где расположение общей накачанной зоны трещин распространяется вдоль максимального и перпендикулярно минимальному главным напряжениям.

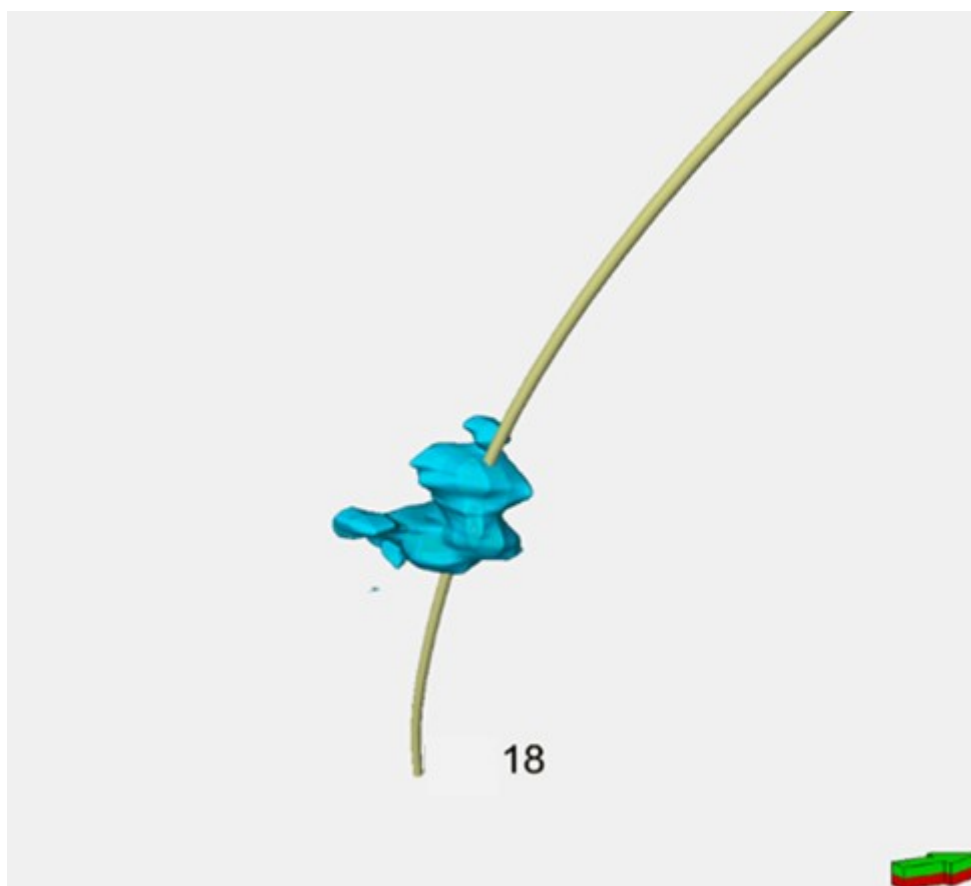


Рисунок 10. Визуализация системы трещин (область повышенного давления).

Раздел 4.3 обобщает успешный опыт применения технологии обратной закачки на сахалинском шельфе. Комплексный геофизический и геомеханический мониторинг подтвердил эффективность метода, продемонстрировав значительное снижение экологических и геологических рисков. Регулярный контроль напряженного состояния пластов и соблюдение установленных пределов давления обеспечили безопасную утилизацию отходов в пласты-домены. Полученные результаты доказывают надежность предложенной технологии для сложных морских условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование провело комплексный анализ методов утилизации отходов бурения и технологических жидкостей, доказав преимущества глубинной закачки в пласты-домены с контролем флюидоупоров для морских месторождений Сахалина. Разработана инновационная система геофизического мониторинга, включающая:

1. концепцию операционных и технических пределов давления
2. математическую модель прогнозирования напряженного состояния пластов
3. комплекс геофизических методов контроля.

Практическая апробация технологии подтвердила её эффективность и безопасность даже в сложных климатических условиях. Реализация метода позволила минимизировать экологические риски при сохранении производственной эффективности.

Полученные результаты предлагаются к внедрению на новых морских месторождениях для устойчивого развития нефтегазового комплекса прибрежных акваторий России. Методология обеспечивает баланс между экономической целесообразностью и экологической безопасностью добычи.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях перечня ВАК, соответствующих специальности
1.6.9:

1. **Моисеенков А.В.**, Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г., Хабаров А.В., Береснев А.В., Новикова Е.В., Дубиня Н.В. Геомеханические аспекты вопроса обратной закачки бурового шлама в пласт // Геофизические исследования. – 2024. – № 4. – С. 63–80.
2. Хабаров А.В., Береснев А.В., **Моисеенков А.В.** Особенности геомеханического сопровождения разработки шельфовых месторождений // Геофизика. – 2025. – № 4. С. 2-14.

Результаты интеллектуальной деятельности:

1. Береснев А.В., Хабаров А.В., Иванцов И.М., **Моисеенков А.В.**, Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г. Способ захоронения буровых и технологических отходов при эксплуатации нефтегазоконденсатных, нефтяных и газовых месторождений // Патент на изобретение № 2819034, 13 мая 2024 г. Заявка № 2023110197.
2. Алябьев Р.Н., **Моисеенков А.В.**, Каспров Е.В., Колчин В.А., Пенский Л. В., Метальников Р.В., Никитин С.В. Набор страниц графического интерфейса пользователя «Контроль работы поглощающих скважин системы “eWellBook”, используемой при разработке нефтегазоконденсатных месторождений» (изделие в целом) // Патент на промышленный образец № 140105 от 06 января 2023 г. Заявка № 2023500480

Подписано в печать 20.08.2025 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,0 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ №

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б.Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 90 88. E-mail: serg@tigra-press.ru