

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Никитин Кирилл Алексеевич

**Температурный режим многолетнемерзлых пород Западного
Ямала в условиях прогнозируемых климатических изменений**

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре геокриологии геологического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – **Комаров Илья Аркадьевич**,
доктор геолого-минералогических наук, доцент
- Официальные оппоненты** – **Сергеев Дмитрий Олегович**, доктор геолого-минералогических наук, Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, лаборатория геокриологии им. Г.З. Перльштейна, заведующий лабораторией
- Якушев Владимир Станиславович**, доктор геолого-минералогических наук, доцент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, факультет разработки нефтяных и газовых месторождений, кафедра разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений, профессор
- Гребенец Валерий Иванович**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, доцент

Защита диссертации состоится 15 мая 2026 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3861>.

Автореферат разослан 10 апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук

Н.А. Харитонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Состояние многолетнемерзлых пород в условиях изменения климата в Арктике – приоритетная проблема геокриологии в последние десятилетия, что связано, в частности, с более выраженным повышением температуры воздуха в арктическом регионе за последние 50 лет по сравнению с южными районами криолитозоны.

Разработка методики прогноза температурного режима многолетнемерзлых пород в условиях современных климатических колебаний имеет важное значение для количественной оценки их реакции на эти изменения. Прогнозные оценки температуры многолетнемерзлых пород являются основой для общего понимания закономерностей эволюции мерзлых толщ при кратковременных изменениях климата, а также служат обоснованием для разработки новых и усовершенствования существующих нормативных документов в области изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации инженерных объектов на мерзлых грунтах.

На Западном Ямале распространены как засоленные, так и незасоленные многолетнемерзлые породы. Специфика засоленных пород по сравнению с незасоленными определяется их составом и строением, водно-ионным составом поровых растворов, скоростью и направленностью процессов промерзания-оттаивания. Водно-физические, теплофизические и физико-механические свойства засоленных грунтов определяются не только наличием ионов солей, но и их химическим составом. Неучет влияния минерализации природных вод приводит к несовершенству прогноза и определения свойств пород.

Криопэги предъявляют дополнительные требования к постановке научных исследований, методам проведения изысканий и проектирования инженерных объектов. Термин «пэги» ранее был предложен Ланге О.К., позже Толстихин Н.И. ввел термин «криопэг», согласно которому криопэги (криогалинные воды) – природные соленые растворы, имеющие отрицательную температуру. Согласно Трофимову В.Т., криопэги – это внутримерзлотные линзы высокоминерализованных напорных вод с отрицательной температурой.

Несмотря на важную роль физико-химических реакций в формировании свойств пород при промерзании поровых растворов, отсутствуют общепринятые методики для количественной оценки изменения фазового и химического состава засоленных пород и криопэгов при изменении термобарических условий при разработке геокриологического прогноза. Применение комплексной методики геокриологического прогноза, учитывающей специфику происходящих процессов криогенного метаморфизма в засоленных породах и криопэгах при изменении термобарических условий, позволит более обоснованно подойти к разработке технических решений в части оснований и фундаментов на засоленных

многолетнемерзлых грунтах, уменьшить величину запаса прочности при проектировании грунтовых оснований инженерных объектов, избежать развития опасных геокриологических процессов и явлений в ходе их строительства и эксплуатации.

Одним из факторов, определяющим кондиционность геокриологического прогноза, является выбранный сценарий климатических изменений, в первую очередь, температуры воздуха. Для разработки климатических сценариев доступны результаты как гидрометеорологических моделей, так и эмпирические методы обработки многолетних данных с метеостанций. Методы обработки метеоданных многочисленны, как в теоретическом плане, так и в алгоритмах реализации, поэтому погрешность геокриологического прогноза существенно зависит от выбора методики для разработки климатического сценария.

Степень разработанности темы исследования. Проблемой прогноза температурного режима многолетнемерзлых пород при изменении климата занимались Анисимов О.А., Балобаев В.Т., Брушков А.В., Булдович С.Н., Васильев А.А., Горелик Я.Б., Гречищев С.Е., Дроздов Д.С., Ершов Э.Д., Железняк М.Н., Комаров И.А., Кудрявцев В.А., Мельников Е.С., Павлов А.В., Пармузин Г.П., Пермьяков П.П., Пустовойт Г.П., Романовский В.Е., Сергеев Д.О., Хрусталева Л.Н., Чернядьев В.П., Шполянская Н.А. и многие др.

Экспериментальным исследованием характеристик засоленных пород посвящены работы Аксенова В.И., Алексева С.В., Анисимовой Н.П., Барковской Е.Н., Бровка Г.П., Велли Ю.А., Волкова Н.Г., Гаврильева Р.И., Глобус А.М., Иванова Н.С., Иоспы А.В., Кияшко Н.В., Комарова И.А., Коновалова А.А., Кроника Я.А., Лосевой С.Г., Минкина М.А., Молочушкина Е.Н., Мотенко Р.Г., Павловой Н.А., Пускова В.И., Смирновой Н.Н., Степанова А.В., Филиппова П.И., Чеверева В.Г., Частотинова Л.В., Чудновского А.Ф., Шейкина И.В. и многих др.

Исследованиями вопросов формирования и развития засоленных пород и криопэгов, особенностями изменений их свойств при промерзании-оттаивании занимались Аксенов В.И., Алексеев С.В., Анисимова Н.П., Бадю Ю.Б., Баулин В.В., Брушков А.В., Васильчук Ю.К., Дубиков Г.И., Жигарев Л.А., Иванова Н.В., Кононова Р.С., Крицук Л.Н., Неизвестнов Я.В., Савельев Б.А., Стрелецкая И.Д., Толстихин Н.И., Трофимов В.Т., Фотиев С.М. и многие др.

Наиболее значимые обобщения особенностей формирования свойств засоленных пород, методов их исследований и результатов лабораторных и натуральных экспериментов представлены в работах Ершова Э.Д., Аксенова В.И., Брушкова А.В., Комарова И.А.

Однако до сих пор отсутствует комплексная методика расчета температурного поля многолетнемерзлых пород при изменении химического и фазового состава поровых растворов.

Объектом исследования является слой годовых теплооборотов многолетнемерзлых засоленных и незасоленных пород Западного Ямала.

Предметом исследования является динамика температурного и водно-ионного режима в слое годовых теплооборотов многолетнемерзлых пород Западного Ямала при изменении климата.

Цель исследования – разработка методики и проведение геокриологического прогноза температурного режима многолетнемерзлых пород с учетом водно-ионных преобразований и предполагаемых климатических изменений.

Задачи исследования:

1. Проанализировать современное состояние проблемы прогноза температурного и водно-ионного режима многолетнемерзлых пород.
2. Рассмотреть геокриологические условия территории исследования, формирующие температурный режим пород.
3. Выявить закономерности динамики процесса сезонного оттаивания, трансформации температурного режима пород, изменения состава и водно-физических свойств верхних горизонтов криолитозоны с помощью комплекса экспериментальных полевых исследований.
4. С помощью модифицированной методики авторетроспективного анализа разработать сценарий изменений среднегодовой температуры воздуха на основе многолетних длинных рядов данных с метеостанций Западного Ямала.
5. Разработать комплексную методику прогноза температурного режима многолетнемерзлых засоленных пород и криопэгов, которая учитывает преобразование водно-ионного состава поровых растворов за счет процессов криогенного метаморфизма, а также эффекты, связанные с изменением климата.
6. Выполнить прогноз температурного режима в слое годовых теплооборотов многолетнемерзлых засоленных и незасоленных пород к середине века.

Фактический материал, использующийся в работе, собран и обработан автором в течение 4 полевых сезонов на Западном Ямале в составе отряда Института криосферы Земли. В ходе выполнения работ изучены разрезы мерзлых и сезонно-талых морских, прибрежно-морских, аллювиально-морских и аллювиальных отложений неоплейстоцен-голоцена. Привлечены фондовые материалы ООО НТФ «Криос» о характеристиках засоленных пород Ямала, любезно предоставленные В.В. Кондаковым и А.Б. Осокиным.

Научная новизна работы определяется следующими результатами.

По полевой части исследования:

- за 4-х летний период проведения полевых исследований выявлены закономерности динамики температурного режима в слое годовых теплооборотов пород Западного Ямала (район Марре-Сале) в условиях климатических изменений, заключающиеся в повышении среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород со скоростью до $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет;

- выделены участки, для которых фиксируется количественно осязаемое повышение среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород в условиях изменения климата. На основе ранее проведенной типизации ландшафтно-мерзлотных условий наибольшие изменения отмечены на слабонаклонных увлажненных участках, сложенных позднеплейстоцен-голоценовыми прибрежно-морскими и озерно-аллювиальными отложениями. Наименьшие изменения зафиксированы в пределах плоскобугристых заболоченных участков, сложенных позднеплейстоцен-голоценовыми озерно-болотными отложениями – до глубины 2 м торфом, подстилаемым оторфованными песками.

По методической части исследования:

- впервые разработана методика комплексного прогноза температурного и водно-ионного режима засоленных многолетнемерзлых пород и криопэгов, которая учитывает преобразование химического состава поровых растворов при изменении термобарических условий. Методика является уникальной, не имеющей аналогов в отечественной литературе;

- пренебрежение процессами криогенного метаморфизма, которые происходят в засоленных породах и криопэгах, приводит к погрешности при определении среднегодовой температуры пород, значения которой оказываются заниженными по сравнению с результатами решения задачи с учетом изменений величины водно-физических и теплофизических характеристик пород на период прогноза.

По прогнозной части исследования:

- с помощью методики авторетроспективного анализа выполнена обработка многолетних наблюдений за температурой воздуха для ряда метеостанций Ямала, которая позволила выявить тренды ее повышения до $0,2\text{-}0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет к середине века;

- количественная оценка, учитывающая преобразование водно-ионного состава поровых растворов засоленных пород и связанное с этим изменение их теплофизических и водно-физических свойств, показала, что пренебрежение влиянием засоленности приводит к погрешности прогнозных расчетов для условий Западного Ямала к середине XXI века до $0,4\text{-}0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Защищаемые положения

1. Повышение среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород Западного Ямала в условиях климатических изменений, составляющее от 0,3 °С/10 лет в пределах заболоченных водосборных понижений и котловин до 0,5 °С/10 лет °С на возвышенных, умеренно увлажненных водораздельных поверхностях, имеет тенденцию к сохранению до 2050 г., что определяется прогнозируемым повышением среднегодовой температуры воздуха до 0,4 °С/год и увеличенным в 1,5-2 раза снегонакоплением в отрицательных формах рельефа относительно водораздельных пространств.

2. Методика прогноза температурного режима мерзлых засоленных пород и криопэгов является инновационной разработкой, реализующей учет влияния на динамику температурных полей пород эффектов потепления климата и эволюцию водно-ионного состава поровых растворов. Программный комплекс включает расчет температурного режима пород; учет тренда повышения температуры воздуха; оценку изменения концентрации поровых растворов, их фазового и химического состава и теплофизических параметров.

3. Прогноз изменения температуры многолетнемерзлых засоленных пород к 2050 г. для ряда районов Ямала, проведенный с учетом ожидаемых климатических изменений, выявил существенное различие между значениями среднегодовой температуры пород, полученными двумя независимыми подходами – с постоянными и изменяющимися на период прогноза теплообменными характеристиками засоленных пород. Эта разница, составляющая до 0,6 °С, обусловлена, в частности, изменением состава поровых растворов с хлоридно-натриевого на северо-западе Ямала до хлоридно-сульфатно-натриевого в нижнем течении Оби.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем. Разработаны общие положения методики комплексного совместного применения термодинамического и математического моделирования для целей проведения геокриологического прогноза. Исследовано влияние процессов криогенного метаморфизма, проявляющееся в изменении водно-физических и теплофизических свойств пород, на региональные оценки их температурного режима с учетом изменения климата. Выявлены общие региональные особенности влияния химического состава поровых растворов на динамику температурных полей засоленных пород. Показано, что применение методики комплексного прогноза температурного и водно-ионного режима засоленных пород существенно корректирует погрешность при определении их среднегодовой температуры.

Практическая значимость. На фоне наблюдаемого изменения климата, наиболее выраженном для северных районов распространения многолетнемерзлых пород, отмечено увеличение количества и степени деформации фундаментов и надфундаментных конструкций

зданий и сооружений, спроектированных, в первую очередь, по первому принципу, то есть с сохранением мерзлого состояния грунтов оснований на период эксплуатации. Технические решения, заложенные в основу проектирования, были разработаны в соответствие с существующими на тот момент нормами, которые не учитывали эффекты резкого изменения климата. Кроме того для многолетнемерзлых засоленных пород существующие количественные методы геокриологического прогноза не учитывают преобразования фазового и химического состава поровых растворов при изменении термобарических условий.

Уточнение методики геокриологического прогноза для криолитозоны Западного Ямала имеет важное значение для целей соблюдения проектного температурного режима мерзлых грунтов в основании зданий и сооружений, обеспечения их безаварийной эксплуатации в условиях климатических изменений. От грамотно проведенного прогноза в значительной степени зависит определение принципа использования мерзлых грунтов в качестве оснований, разработка технических решений по устройству фундаментов и выбор методов инженерной защиты территории от опасных геологических процессов.

Личный вклад автора. При написании работы были использованы результаты исследований, выполненных автором в течение 4 полевых сезонов в составе полевого отряда Института криосферы Земли на Западном Ямале в районе метеостанции Марре-Сале. Автор принимал непосредственное участие в проведении полевых работ, камеральной обработке и интерпретации полученных данных.

На основе модификации методики авторетроспективного анализа, с привлечением результатов многолетних наблюдений на метеостанциях Ямала автором разработаны сценарии изменений температуры воздуха к середине века.

Выполнен комплексный прогноз температурного режима многолетнемерзлых пород для участков исследований с привлечением опубликованных, фондовых и полевых данных. С использованием программ «Qfrost», «Freezbrine» и рассчитанного нами тренда изменения температуры воздуха выполнен прогноз температурного режима многолетнемерзлых пород с учетом водно-ионных преобразований на 30-летний период.

Основные методы исследования. Использован комплексный подход, основанный на последовательной интерпретации полевых инженерно-геологических данных и результатов термодинамического и математического моделирования применительно к засоленным и незасоленным мерзлым породам, что позволило значительно повысить достоверность определения их среднегодовой температуры на фоне климатических изменений.

Выполнен авторетроспективный анализ многолетних рядов наблюдений на метеостанциях Ямала для разработки сценарием изменения среднегодовой температуры

воздуха к середине века. Применение методики термодинамического моделирования на основе общих положений классической и статистической термодинамики в программе «Freezbrine» позволило оценить преобразование свойств пород в процессе протекания химических реакций в диапазоне отрицательных значений температуры. На основе использования методов математического моделирования для прогноза динамики температурных полей в мерзлых породах с учетом граничных условий в программе «QFrost» получены значения среднегодовой температуры пород к середине века.

Степень достоверности работы подтверждается квалифицированным рецензированием публикаций, а также полнотой и представительностью литературных и фактических материалов, полученных в ходе полевых, камеральных и лабораторных исследований; применением современных методов термодинамического и математического моделирования с использованием современных компьютерных технологий.

Апробация работы. Результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: на Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «Проблемы устойчивого развития региона» (Улан-Удэ, 2023); на Международном молодежном научном форуме ЛОМОНОСОВ-2024 (Москва, 2024); на Всероссийской студенческой конференции с международным участием «Геоэкология: теория и практика» (Москва, 2024).

Публикации по теме диссертации. Результаты проведенных исследований, основные положения и проблемы, рассматриваемые в диссертации, изложены в 5 публикациях, в том числе в 3 публикациях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (215 наименований, в том числе 34 на иностранном языке). Материал работы изложен на 167 страницах машинописного текста, содержит 5 таблиц, 53 иллюстрации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена современному состоянию многолетнемерзлых пород Западной Сибири в условиях наблюдаемого изменения климата и проблеме прогноза температурного и водно-ионного режима засоленных пород в слое годовых теплооборотов.

В арктическом регионе по данным наземных гидрометеорологических наблюдений отмечается изменение климата с тенденцией к потеплению. Согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации от 11.03.2023 г. № 559-р темп повышения температуры

воздуха в российской Арктике превышает средние значения для территории страны в 3,9 раза и составляет 0,71 °C/10 лет.

Результаты многолетнего мониторинга на стационарах Западной Сибири показывают изменение мерзлотных условий на фоне потепления климата за последние 50 лет. При этом режимные инструментальные наблюдения ведутся преимущественно за глубиной сезонного оттаивания, температурой пород до глубины 10 м и интенсивностью проявления геокриологических процессов и явлений. Отдельные работы посвящены изменению свойств растительных покровов, влажности пород сезонно-талого слоя, трансформации рельефа и условий термовлажностного режима на поверхности пород. Установлено повышение среднегодовой температуры пород на всех пунктах наблюдений, но скорость процесса отличается в зависимости от ландшафтно-мерзлотных условий. Наиболее активные изменения геокриологических условий отмечены вблизи южной границы распространения мерзлых пород.

Засоленные мерзлые породы существенно усложняют математические и физические модели геокриологического прогноза. Это связано как со спецификой процессов в засоленных грунтах при промерзании-оттаивании, так и с методическими подходами для описания и количественного учета этих процессов. Существующие прогнозные оценки температурного режима засоленных мерзлых пород не учитывают водно-ионные преобразования в поровых растворах и связанные с ними изменения свойств. Влияние засоленности при формировании свойств пород в созданных моделях проявляется преимущественно в виде изменений температуры фазового перехода.

Современное развитие методов физического и математического моделирования происходит в разных направлениях. С одной стороны, повышается точность и объем входной эмпирической и полуэмпирической информации о свойствах мерзлых пород. С другой стороны, усовершенствуются математические модели, учитывающие специфику и многофакторность процессов промерзания-оттаивания в породах, формирование и взаимодействие тепловых и массовых полей. Присутствие ионов легкорастворимых солей в поровой влаге (растворе) и их химический состав в значительной степени влияют на водно-физические, теплофизические, физико-механические и др. свойства засоленных пород.

Применительно к засоленным породам до разработки Приложения Б СП 25.13330 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» (автор приложения д. г-м. н. Комаров И.А.) в нормативно-технической документации отсутствовали общепринятые методики для количественного учета этих закономерностей. В настоящее

время предложенная методика реализуется в программах для численного решения тепловых задач в многолетнемерзлых грунтах (Борей 3D, Frost.Термо, Permafrost 3D и др.).

Практическая важность изучения засоленности многолетнемерзлых пород определяется тем, что наличие солей существенно влияет на температуру начала замерзания, фазовый состав влаги. Изменение температуры в засоленных породах влияет на механические свойства в большей степени, чем в незасоленных. Наличие солей препятствует смерзанию свай с породами и снижает их несущую способность. Засоленность пород легкорастворимыми солями представляет одну из главных опасностей при длительной эксплуатации подземных металлических и железобетонных конструкций зданий и сооружений.

Вторая глава посвящена описанию геокриологических условий Западного Ямала, расположенного в южной части западного побережья полуострова с широким распространением плейстоцен-голоценовых морских, прибрежно-морских песчано-суглинистых отложений, слагающих ступенчатые поверхности морских террас.

Регион расположен в субарктическом поясе с отрицательной среднегодовой температурой воздуха. По данным Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (Мирового центра данных) ее средние значения в 1961-1990 гг. составили $-8,4$ °С. Линейный тренд повышения среднегодовой температуры с 1970 г. достигает $0,76$ °С/10 лет. С начала 70-х гг. на Западном Ямале заметно изменение климата с тенденцией к потеплению. Среднемноголетняя высота снега составляет до $0,25$ м. Каждый природно-территориальный комплекс в зависимости от положения в рельефе характеризуется устойчивым коэффициентом снегонакопления, составляющим до $1,5-2$ относительно плоских водоразделов.

Территория исследования находится в северной части Западно-Сибирской плиты, имеющей ярусное строение. Нижний ярус состоит из докембрийских и палеозойских осадочных образований, осложненных складками. Средний структурный ярус представляет собой слабодислоцированные складки метаморфизованных вулканогенно-осадочных пород палеозойского и мезозойского возраста. Верхний структурный ярус образован мощной толщей осадочных, как правило, терригенных пород мелового, палеоген-четвертичного возраста.

В верхней части геологического разреза выделяются несколько комплексов рыхлых плейстоценовых и голоценовых отложений – современные аллювиально-морские и морские, позднеплейстоцен-голоценовые континентальные, прибрежно-морские и морские отложения мощностью до 25 м. Локально распространены позднеплейстоцен-голоценовые озерные, делювиально-солифлюкционные, биогенные и эоловые отложения мощностью до 3 м. Разрез

плоских морских террас, образующих ступенчатый рельеф, имеет преимущественно двухслойное строение. В нижней части толщи преобладают песчаные породы морского генезиса, залегающие на денудированных салехардских отложениях. В верхней части залегают континентальные отложения озерного, биогенного, аллювиального, эолового, делювиально-солифлюкционного генезиса. На побережье распространены голоценовые морские и аллювиально-морские отложения песчано-супесчаного состава с чередованием по разрезу мерзлых и охлажденных пород с линзами криопэггов.

Западный Ямал полностью расположен в зоне сплошного распространения мерзлых пород. Под озерами, руслами крупных рек, на лайдах и поймах в зоне развития криопэггов распространены несквозные талики. Криогенная толща района исследования состоит из двух ярусов – собственно мерзлые породы и охлажденные засоленные породы. На территории исследования мощность криогенной толщи составляет преимущественно 50-150 м.

По данным многолетних наблюдений, выполненных Институтом криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, среднегодовая температура мерзлых пород на глубине 10-12 м в начале XXI века составляет преимущественно $-2,0 \dots -6,0$ °C. Наиболее высокая температура характерна для льдистых песчаных отложений в заболоченных днищах логов, хасыреев. Низкая температура отмечается в оторфованных песках, супесях в межхолмовых понижениях, на плосковершинных холмах и песчаных раздувах морских террас. По данным наблюдений на площадке CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring Network) R3 глубина сезонного оттаивания в 1995-2023 гг. изменялась от 22 см в заболоченном днище оврага до 185 см на плоской водораздельной поверхности морской террасы.

Засоленные мерзлые породы Западного Ямала – это четвертичные отложения различных генетических типов, среди которых преобладающими являются морские. На основе результатов изучения химического состава поровых растворов Дубиковым Г.И. и Ивановой Н.В. установлено, что засоленные многолетнемерзлые породы на Ямале распространены севернее широты устья р. Байдараты - пос. Новый Порт. Максимальное содержание солей отмечается в современных отложениях лайд и устьевых участках пойм, особенно на западном и северном побережьях полуострова. Распределение легкорастворимых солей по разрезу определяется литологическим составом грунтов, фациальными условиями накопления, особенностями перераспределения поровых растворов при промерзании, результатами процессов криогенного метаморфизма, особенно криогенного концентрирования.

На Западном Ямале криопэги широко распространены как в современных морских и аллювиально-морских отложениях, так и в плейстоценовых отложениях морских террас. Химический состав криопэгов преимущественно хлоридно-натриевый. Минерализация зависит от температуры вмещающих отложений и является переменной величиной.

Третья глава посвящена описанию методики экспериментальных исследований и прогноза температурного режима незасоленных и засоленных пород с учетом изменения климата.

Полевое исследование особенностей формирования температурного режима в слое годовых теплооборотов и сезонного оттаивания в условиях изменения климата было выполнено на участках многолетних режимных наблюдений в районе метеостанции Марре-Сале (Западный Ямал). Ранее проведенная типизация для целей ландшафтно-мерзлотного районирования основана на выделении зональных и региональных факторов дифференциации. Природные-территориальные комплексы рассматриваются как результат совместного взаимодействия литосферы (стратиграфо-генетических, фациальных комплексов пород) с другими природными сферами (атмосферой, гидросферой и др.). Выделенные для выполнения наблюдений природные-территориальные комплексы низкого ранга приурочены к мезоформе рельефа или ее части, сложенной породами определенного литолого-фациального комплекса, для которых характерен отличительный тип термовлажностного режима, микрорельеф и доминирующий вид экзогенных геологических процессов.

Для реализации задачи прогноза температурного режима засоленных мерзлых пород с учетом водно-ионных преобразований поровых растворов и изменения климата разработана оригинальная методика, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.

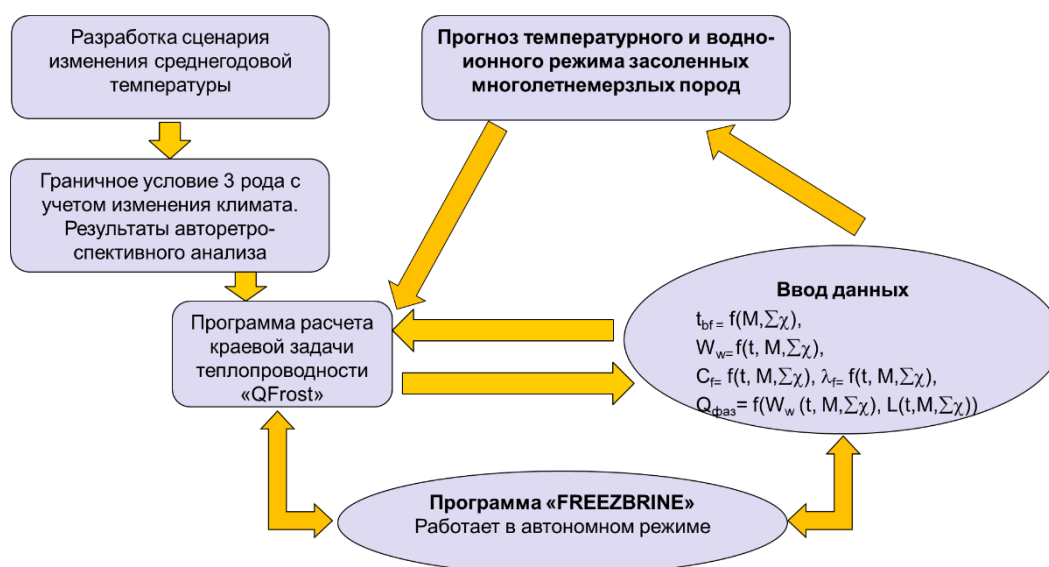


Рисунок 1 – Принципиальная схема решения тепловой задачи с учетом изменения водно-ионного режима засоленных пород

Методика является универсальной и применимой по отношению к засоленным породам разного генезиса, структурного и минерального происхождения. Для реализации прогноза методика использует спектр характеристик пород (состав, состояние, водно-физические, теплофизические и др. свойства), которые могут быть получены или определены в полевых и лабораторных условиях, а также рассчитаны на основе формул/зависимостей/таблиц из справочной или утвержденной нормативно-технической документации.

Методика не ограничивает исследователей четким перечнем источников данных, необходимых для реализации прогноза. Например, сценарий изменений температуры воздуха может быть получен не только с помощью авторетроспективного анализа многолетних рядов метеонаблюдений. Это существенно расширяет сферу применения разработанной методики с учетом динамики граничных условий на верхней грани расчетной области. Модификация коэффициента теплообмена с учетом техногенных источников тепловыделения, засоления позволит применить методику для задач инженерной геокриологии.

Методика является открытой и доступной к развитию и усовершенствованию с учетом мерзлотно-грунтовых условий конкретных регионов. Существенным развитием может стать создание уникального программного продукта для решения совместной задачи термодинамического моделирования, определения теплофизических и водно-физических свойств пород, расчета температурных полей. Применение моделей переноса не только тепла, но и влаги, солей, с учетом кондуктивно-конвективной составляющей теплообмена позволит более обоснованно оценить динамику засоленных мерзлых толщ на фоне разнопериодных климатических колебаний. Применение данного положения для прогноза формирования и развития субмаринных мерзлых толщ в позднем плейстоцен-голоцене на фоне трансгрессий-регрессий полярного бассейна, чередований циклов засоления и опреснения молодых осадков позволит уточнить геокриологические условия на шельфе арктических морей.

Методика имеет существенный задел к ее применению и развитию для целей инженерной практики. Так как наличие легкорастворимых солей по разрезу является одной из основных проблем при проектировании оснований, фундаментов и инженерной защиты в криолитозоне, количественная оценка фазовых и химических изменений в поровых растворах при промерзании-оттаивании, может уточнить результаты прогнозных теплотехнических расчетов для засоленных грунтов в целях разработки технических решений. Данная проблема является актуальной не только для вновь возводимых объектов капитального строительства, но и для уже эксплуатирующихся объектов. Разработка и внедрение инновационных технических решений для обеспечения I принципа использования засоленных мерзлых

грунтов в качестве оснований на фоне направленного потепления климата должно быть основано на научно-методических разработках, учитывающих специфику подобных грунтов.

Для реализации прогноза динамики температурного режима пород решалась тепловая задача типа Стефана. Теплоперенос в пределах расчетной области осуществляется только за счет теплопроводности, то есть при расчете температурного поля массообменные процессы не учитываются. Фазовые переходы происходят в диапазоне отрицательных значений температуры, без изменения начальной влажности и объема. На нижней и боковых гранях было задано граничное условие II рода. На нижней грани учитывался тепловой поток, поступающий из недр Земли, на боковых – тепловой поток, равный 0. На верхней границе расчетной области задано граничное условие III рода, описывающее теплообмен по закону Ньютона.

Для решения поставленной задачи на ЭВМ применяется метод конечных разностей, основанный на замене дифференциальных операторов их приближенными значениями через функции в отдельных дискретных точках (узлах сетки). Выбранная разностная схема для решения задачи теплопроводности является явной, так как представляет собой формулу для явного выражения решения на определенном временном (итерационном) слое на основе известных значений, полученных на предыдущих слоях.

Решение задачи типа Стефана методом конечных разностей было выполнено в программе в программе «QFrost», разработанной Песоцким Д.Г. на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. При решении используется метод балансов, предложенный Хрустальевым Л.Н. для построения конечно-разностной схемы, что позволило получить наглядную физическую интерпретацию результатов вычислений за счет определения относительного объема талой фазы V .

Для количественного учета водно-ионных преобразований в поровых растворах в ходе геокриологического прогноза использованы методы термодинамического моделирования. Модели слабо и средне концентрированных природных вод описывают фазовые равновесия путем введения соответствующих произведений растворимости для минералов, которые основаны на теории Дебая-Хюккеля. При более высоких концентрациях, характерных для засоленных пород Ямала, целесообразно использовать модели, базирующиеся, например, на теории Питцера К.С. Для расчета фазового и химического состава (твердые соли, лед, газовая фаза, раствор электролита) многокомпонентных водно-солевых систем используется метод минимизации свободной энергии Гиббса, который опирается на экспериментальное изучение более простых водно-солевых систем. Термодинамическое моделирование поровых растворов выполнено в программе «Freezbrine», предназначенной для расчета равновесного состава

водно-солевых систем при изменении термобарических условий. Входными данными в программу являлись: исходная общая минерализация и концентрация основных компонентов химического состава пробы, полученные на основании химического анализа. Выходные данные – содержание воды, ионов и солей в жидкой, твердой и газообразной фазе; плотность и объемы фаз; осмотический коэффициент, ионная сила и рН растворов; химический потенциал и другие характеристики, вычисляемые для определенного диапазона температуры или давления с заданным шагом.

Для совместного нахождения температурного и водно-ионного режима засоленных пород программа для решения краевой задачи теплопроводности при наличии фазовых переходов «QFrost» использовалась с модулем «Freezbrine», работа которых происходила автономно друг от друга. Результаты термодинамического моделирования учитывались пользователем вручную в программе «QFrost» путем изменения теплофизических и водно-физических свойств пород. В дальнейшем модуль «Freezbrine» может работать в режиме подпрограммы с пересчетом на каждом временном шаге химического состава раствора (режим связанной задачи) или автономно (режим несвязанной задачи).

В ходе прогноза температурного режима засоленных пород вычисления в программе «QFrost» выполнялись двумя независимыми друг от друга итерациями. В первом случае программа использовала постоянные на период прогноза теплообменные характеристики пород. Во втором случае эти характеристики для засоленных пород были рассчитаны с помощью программы «Freezbrine» с учетом водно-ионных преобразований в диапазоне отрицательных значений температуры по методике, предложенной Комаровым И.А. и реализованной в СП 25.13330.2012 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» и последующих версиях.

Для применения комплексной методики геокриологического прогноза разработан сценарий изменения температуры воздуха. Для этого использована методика авторетроспективного анализа, разработанная на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В основе метода лежит выявление цикличности, выделение разнопериодных колебаний разного генезиса. Совокупность ритмов, накладывающихся друг на друга, с различными периодами, амплитудами и сдвигами фаз определяют ход рассматриваемого параметра, то есть температуры воздуха в нашем случае.

На основе данной методики разработаны сценарии изменения среднегодовой температуры воздуха для трех районов полуострова – Марре-Сале (Западный Ямал), Харасавэй (северо-западный Ямал), Салехард (нижнее течение Оби). Работа выполнена в

рамках исследований для количественного влияния засоленности мерзлых пород Ямала на их температуру в ходе геокриологического прогноза.

Четвертая глава посвящена выбору и верификации параметров расчетной схемы для выполнения прогноза температурного режима пород с учетом изменений климата и водно-ионных преобразований в поровых растворах.

Прогноз температурного режима с учетом климатических изменений к середине века выполняется для засоленных и незасоленных пород. Для засоленных дополнительно учитывается динамика водно-ионных преобразований поровых растворов в диапазоне отрицательных значений температуры с привлечением методов термодинамического моделирования. Прогноз для засоленных пород выполнен для трех районов полуострова Ямал – западного, северо-западного и нижнего течения Оби.

Работа проведена в рамках разработки методики мерзлотного (геокриологического) прогноза температурного и водно-ионного режима засоленных пород Ямала с учетом изменения климата. В ходе совместного моделирования необходимо было определить влияние водно-ионных преобразований на формирование температурных полей и установить его количественные особенности. Для этого каждый расчет выполнен двумя независимыми итерациями – с постоянными и изменяющимися теплообменными характеристиками. На основе полученной разницы между вычислениями определяется количественное влияние водно-ионных преобразований.

Расчеты были выполнены на модельных разрезах с наибольшей засоленностью пород и минерализацией порового раствора. Данная работа выходит за границы территории исследования, однако ее результаты будут представлены в полном объеме, что позволит количественно оценить влияние состава и минерализации поровых растворов на прогнозные оценки температурного режима пород в региональном масштабе.

Дополнительные расчеты были проведены для участков многолетнего термометрического мониторинга в районе полярной станции Марре-Сале с привлечением ряда данных – опубликованных и полученных автором в ходе 4 полевых сезонов. Отличительной особенностью песчаных, глинистых пород, учтенных в моделировании, является относительно неравномерное распределение засоленности по разрезу, наличие незасоленных горизонтов.

В пятой главе приводятся результаты прогноза температурного режима засоленных и незасоленных мерзлых пород с учетом изменения климата. Представлены сценарии изменения температуры воздуха для трех районов Ямала к середине века, разработанные на основе применения методики авторетроспективного анализа к многолетним рядам метеонаблюдений.

Ретроспективный анализ данных о среднегодовой температуре воздуха в районе полярной станции Марре-Сале основан на многолетних наблюдениях в 1914-2020 гг. К 2050 г. отмечается повышение среднегодовой температуры воздуха с $-8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2001 г.) до $-4,2\pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 2). В 2021-2050 гг. прогнозируемое значение линейного тренда повышения температуры составляет $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет.

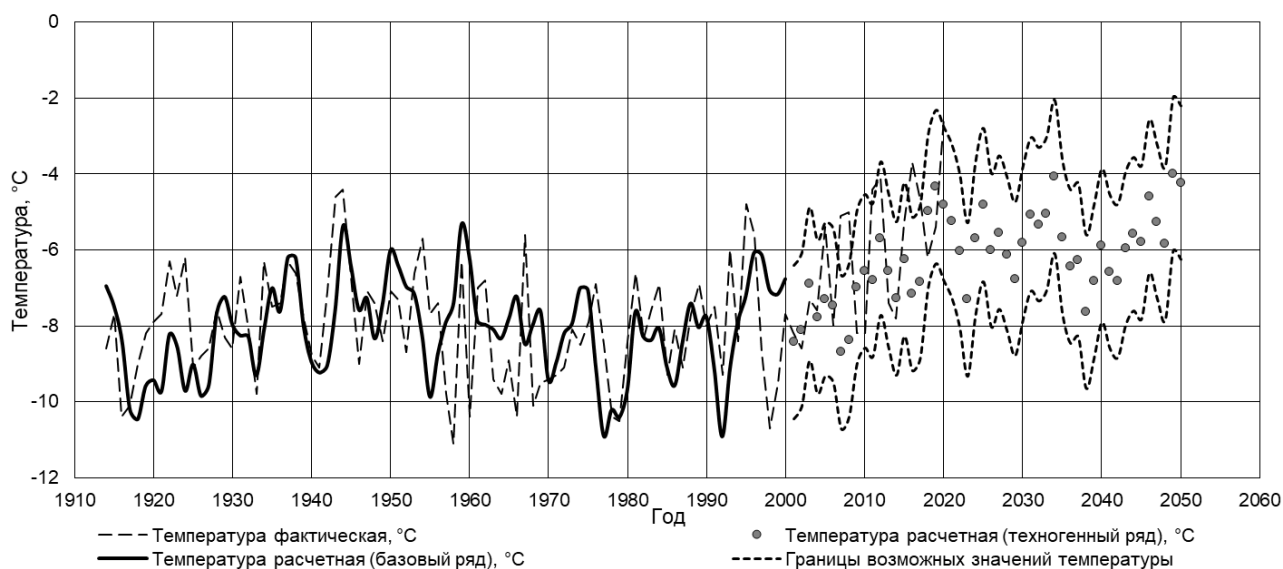


Рисунок 2 – Прогноз среднегодовой температуры воздуха на Западном Ямале

Ретроспективный анализ данных о среднегодовой температуре воздуха в районе полярной станции Харасавэй основан на многолетних наблюдениях в 1953-2004 гг. К 2050 г. отмечается повышение среднегодовой температуры воздуха с $-11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1979 г.) до $-5,6\pm 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Прогнозируемое значение линейного тренда повышения температуры составляет $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Ретроспективный анализ данных о среднегодовой температуре воздуха в районе метеостанции Салехарда основан на многолетних наблюдениях в 1883-2022 гг. К 2050 г. отмечается повышение среднегодовой температуры воздуха с $-6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1982 г.) до $-1,6\pm 1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Прогнозируемое значение линейного тренда повышения температуры составляет $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет.

На основе разработанных сценариев изменения среднегодовой температуры воздуха выполнен прогноз температурного режима засоленных многолетнемерзлых пород к середине века. Для северо-западного Ямала прогнозируемая среднегодовая температура песчаных пород может измениться с $-5,0\text{...}-6,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-4,8\text{...}-6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, суглинистых с $-5,3\text{...}-6,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-5,2\text{...}-6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для Западного Ямала результаты решения задачи показывают повышение среднегодовой температуры в песках с $-5,5\text{...}-6,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-3,5\text{...}-4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, в суглинках с $-6,1\text{...}-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-4,0\text{...}-4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3). Для нижнего течения Оби среднегодовая

температура может измениться в песках с $-2,4...-3,6$ °C до $-1,5...-2,5$ °C, в суглинках с $-2,7...-3,7$ °C до $-1,6...-2,6$ °C.

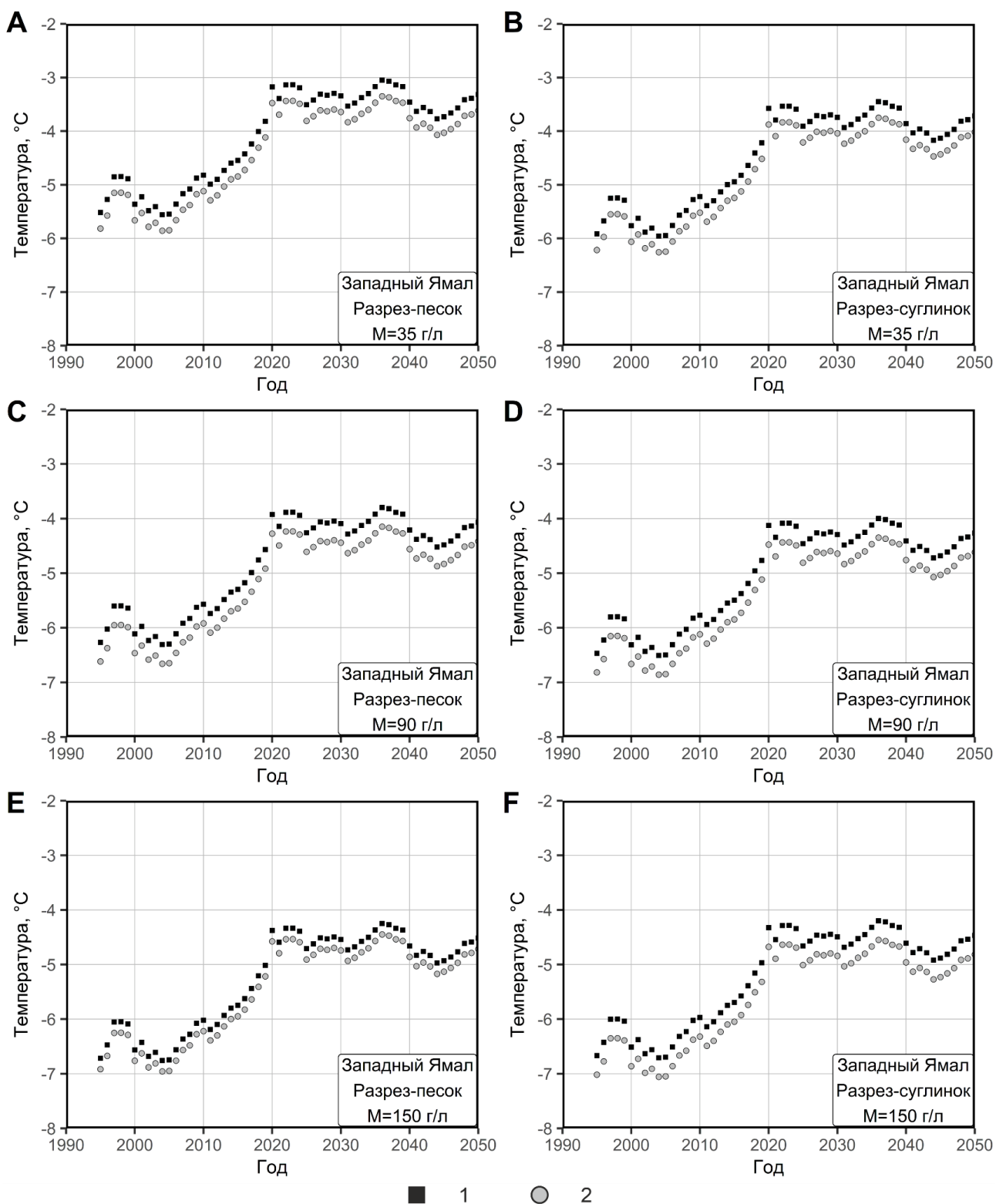


Рисунок 3 – Ожидаемое изменение температуры засоленных мерзлых пород Западного Ямала. 1 и 2 – результаты решения задачи с учетом и без учета преобразования фазового и химического состава поровых растворов соответственно

Смоделированные тенденции изменения температуры пород для северо-западного и Западного Ямала достаточно близки. Для северо-западного Ямала наименьшая разница между итерациями 0,1-0,2 °С характерна для первых 5-10 лет прогноза при минерализации 35 г/л. К 2050 г. разница достигает 0,3-0,4 °С при минерализации 150 г/л. Для Западного Ямала результаты моделирования отличаются между собой на 0,2-0,3 °С в первые годы прогноза при минимальной минерализации. К середине века разница достигает 0,4-0,5 °С при минерализации порового раствора 150 г/л. В суглинках расхождения между независимыми вычислениями температуры оказались на 0,2-0,3 °С больше, чем в песках. Для нижнего течения Оби отмечается наибольшая разница между итерациями. Минимальное отличие составляет 0,2-0,3 °С при минерализации 35 г/л, максимальное – 0,5-0,6 °С при минерализации 150 г/л. Среднее значение расхождения между результатами вычислений составляет 0,3 °С для песков и 0,5 °С для суглинков.

Для всех исследуемых регионов и типов разрезов проявляется разница между результатами моделирования с постоянными и изменяющимися теплообменными характеристиками пород. Разница между итерациями постепенно повышается как с увеличением минерализации поровых растворов, так и с периодом прогнозирования.

Прогноз температурного режима для участков многолетнего мониторинга в районе Марре-Сале выполнен на основе наблюдаемых изменений температуры на подошве слоя годовых теплооборотов. По результатам полевых исследований и обработки наблюдений для реализации геокриологического прогноза к 2050 г. определены основные закономерности изменения среднегодовой температуры пород в условиях потепления климата. Особенностью выполненного исследования является анализ среднегодовой температуры пород ниже 10-12 м, что наиболее полно позволяет восстановить положение подошвы слоя годовых теплооборотов в многолетнемерзлых грунтах.

Наиболее активное повышение среднегодовой температуры пород со скоростью до 0,5 °С/10 лет отмечено на плоских, возвышенных, крупно-полигональных, умеренно увлажненных поверхностях в пределах II и III морских террас, сложенных преимущественно средnezасоленными песками, супесями. Менее выраженные изменения среднегодовой температуры пород со скоростью до 0,3 °С/10 лет характерны для плоскобугристых заболоченных участков, сложенных озерно-болотными отложениями – до глубины 2 м торфом, подстилаемым оторфованными песками.

На основе результатов полевых исследований и обработки многолетних термометрических наблюдений предложено выделять «холодные» и «теплые» участки, отличающиеся интенсивностью изменений среднегодовой температуры пород на подошве

слоя годовых теплооборотов в ходе потепления климата. «Холодные» участки расположены на возвышенных, полигональных поверхностях морских равнин. В XX веке среднегодовая температура пород составляла преимущественно $-5,5\dots-7,0$ °С, а к 2020 г. достигла $-3,7\dots-4,8$ °С. «Теплые» участки приурочены к отрицательным формам рельефа – озерным котловинам, овражно-балочной сети. В XX веке фиксировались сравнительно высокие значения среднегодовой температуры пород до $-3,0\dots-4,0$ °С, в начале XXI века изменившиеся до $-2,7\dots-3,6$ °С.

Изменение температурного режима пород не сводится исключительно к повышению их среднегодовой температуры. Установлено сокращение глубины залегания подошвы слоя годовых теплооборотов, проявляющееся на всех исследуемых участках с темпом до 0,75 м/10 лет. Наименее выраженные изменения характерны для сильнольдистых глинистых пород озерно-аллювиального генезиса. Наибольшее сокращение глубины отмечено в слабольдистых, льдистых песчаных породах прибрежно-морского генезиса.

По результатам прогноза к 2050 г. наиболее низкие значения среднегодовой температуры пород до $-3,5\dots-4,0$ °С ожидаются в заболоченных межхолмовых понижениях, сложенных оторфованными песками. Более высокие значения среднегодовой температуры до $-2,2\dots-2,9$ °С отмечаются в засоленных песках, супесях, на умеренно увлажненных, сухих возвышенных участках морских террас с фрагментами песчаных раздувов. В пределах заболоченных озерных котловин среднегодовая температура пород может достичь $-1,0\dots-1,5$ °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование направлено на разработку методики совместного применения термодинамического и математического моделирования для прогноза температурного режима и его реализации в засоленных и незасоленных многолетнемерзлых породах с учетом предполагаемых климатических изменений.

Охарактеризовано современное состояние проблемы прогноза температурного и водно-ионного режима многолетнемерзлых пород. Выполненные оценки для многолетнемерзлых пород Ямала не рассматривают на период прогноза специфики засоленных пород и процессов, происходящих в них. Параметризация созданных моделей не позволяет достоверно изучить влияние водно-ионных преобразований на динамику температурных полей с учетом изменяющихся граничных условий.

На основе собранных автором в ходе 4-х полевых сезонов на Западном Ямале и опубликованных данных охарактеризованы геокриологические условия района исследования, расположенного в южной части западного побережья Ямала с широким распространением

верхнеплейстоцен-голоценовых морских, прибрежно-морских песчано-глинистых отложений, слагающих ступенчатые поверхности морских террас.

На основе модифицированной методики авторетроспективного анализа выполнена обработка результатов многолетних наземных наблюдений за температурой воздуха на метеостанциях Ямала. Анализ полученных данных показывает, что численные значения линейного тренда повышения среднегодовой температуры воздуха к 2050 г. составляют 0,2-0,4 °C/10 лет, что соответствует современным темпам изменений.

Разработана комплексная методика геокриологического прогноза, основанная на совместном применении методов термодинамического и математического моделирования, с учетом изменения климата. Ее использование позволяет определить температурное поле многолетнемерзлых пород с учетом процессов криогенного метаморфизма, происходящих в поровых растворах засоленных пород при изменении термобарических условий.

По результатам полевых исследований на Западном Ямале и обработки термометрических наблюдений выявлено повышение среднегодовой температуры пород на 1,6...2,2 °C на подошве слоя годовых теплооборотов, положение которой в начале XXI века составляет преимущественно 14-15 м и изменяется со скоростью до 0,75 м/10 лет.

По результатам прогноза среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород на Западном Ямале установлено, что к 2050 г. ее наиболее низкие значения до -3,5...-4,0 °C прогнозируются в заболоченных межхолмовых понижениях. Более высокие значения среднегодовой температуры до -2,2...-2,9 °C отмечаются в засоленных песках, супесях, на умеренно увлажненных, сухих возвышенных участках морских террас с фрагментами песчаных раздувов. К 2050 г. наиболее высокие значения среднегодовой температуры пород могут достигнуть -1,0...-1,5 °C в пределах заболоченных озерных котловин.

Выявлена региональная специфика количественного влияния поровых растворов на прогнозные оценки среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород. Замещение состава растворов преимущественно с хлоридно-натриевого до хлоридно-сульфатно-натриевого с севера на юг полуострова определяет закономерности их криогенного метаморфизма и связанные с этим теплообменные свойства пород.

Применение комплексной методики прогноза температурного режима пород с учетом водно-ионных преобразований показало значимое различие между результатами вычислений среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород. Неучёт процессов криогенного метаморфизма, происходящих в засоленных породах и криопэгах при изменении температурных условий, на период геокриологического прогноза приводит к погрешности расчетов до 20 % в меньшую сторону.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, профессору, д. г.-м. н. Комарову И.А. за помощь, поддержку и внимание, проявленные на всех этапах работы над диссертацией. Автор признателен сотрудникам кафедры геокриологии за рекомендации и ценные советы при написании работы. Автор благодарит к. г.-м. н. Мироненко М.В., к. г.-м. н. Кияшко Н.В. за сотрудничество и совместное обсуждение результатов моделирования и магистранта кафедры геокриологии Латыпову А.Э. за помощь при проведении исследований. Автор с благодарностью вспоминает плодотворное сотрудничество и полевые работы в составе отряда Института криосферы Земли под руководством д. г.-м. н. Васильева А.А.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук, опубликованные автором по теме диссертации

1. **Никитин К.А.**, Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Влияние засоленности на прогнозные оценки температуры мерзлых пород на примере полуострова Ямал // Арктика и Антарктика. – 2024. – № 3. – С. 30-45. EDN: NSSPVV. Импакт-фактор 0,463 (РИНЦ). Объем публикации: 1,19 п.л., объем вклада соискателя: 90 %.

2. **Nikitin K.A.**, Belova N.G., Vasiliev A.A. Thermal Regime of Permafrost on the Western Yamal Under Climate Warming // Geography, Environment, Sustainability. – 2023. – Vol. 16, No. 3. – pp. 75-82. EDN: JUPLMN. Импакт-фактор 0,319 (SJR). Объем публикации: 0,69 п.л., объем вклада соискателя: 70 %.

3. Комаров И.А., Кияшко Н.В., Мироненко М.В., **Никитин К.А.**, Латыпова А.Э. Криогенный метаморфизм засоленных многолетнемерзлых пород и криопэгов п-ова Ямал // Инженерная геология – 2024. – Т. 19, № 1. – С. 46-59. EDN: DPTRAY. Импакт-фактор 0,410 (РИНЦ). Объем публикации: 1,34 п.л., объем вклада соискателя: 30 %.

Публикации в иных изданиях

4. Комаров И.А., Мироненко М.В., **Никитин К.А.**, Кияшко Н.В. Методика прогноза температурного и водно-ионного режима засоленных мерзлых пород п-ова Ямал, с учетом глобального изменения климата: учебное пособие. – М.: Директ-медиа, 2024. – 160 с.

5. **Никитин К.А.**, Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Региональные закономерности влияния засоленности на прогноз температуры мерзлых пород полуострова Ямал // Геоэкология: теория и практика: сборник научных трудов по материалам Всероссийской студенческой конференции с международным участием 22-23 ноября 2024 г. – М.: РУДН, 2024. – С. 207-212. EDN: ORROQZ. Объем публикации: 0,23 п.л., объем вклада соискателя: 80 %.