

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

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. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.3.71279 EDN: NSSPVV URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=71279](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71279)

## Влияние засоленности на прогнозные оценки температуры мерзлых пород на примере полуострова Ямал

**Никитин Кирилл Алексеевич**

аспирант; геологический факультет; Московский государственный университет имени МВ. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ [Nikitin.kirill@yandex.ru](mailto:Nikitin.kirill@yandex.ru)



**Комаров Илья Аркадьевич**

доктор геолого-минералогических наук

профессор; геологический факультет; Московский государственный университет имени МВ. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ [ilya\\_komarov@mail.ru](mailto:ilya_komarov@mail.ru)



**Мироненко Михаил Викторович**

кандидат геолого-минералогических наук

Ведущий научный сотрудник; Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук

119991, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, 19

✉ [mikhail\\_mironenk@mail.ru](mailto:mikhail_mironenk@mail.ru)



**Кияшко Надежда Владимировна**

кандидат геолого-минералогических наук

Научный сотрудник; Московский государственный университет имени МВ. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ [nadin130187@mail.ru](mailto:nadin130187@mail.ru)



[Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"](#)

**DOI:**

10.7256/2453-8922.2024.3.71279

**EDN:**

NSSPVV

**Дата направления статьи в редакцию:**

17-07-2024

**Аннотация:** Работа посвящена количественной оценке влияния засоленности на прогнозные оценки температуры многолетнемерзлых пород в региональном масштабе. Актуальность определяется интенсивным хозяйственным освоением полуострова Ямал и наблюдаемым изменением климата в Арктике. Сокращение неопределенности в прогнозных оценках температуры мерзлых пород способствует уменьшению величины запаса прочности при проектировании грунтовых оснований объектов и сооружений, избеганию развития негативных процессов в ходе их строительства и эксплуатации. Объект исследования – мерзлые породы полуострова Ямал, имеющие сплошное распространение и являющиеся основанием большинства эксплуатируемых зданий и сооружений. Температура засоленных мерзлых пород представляет собой предмет исследования. Используемая методика сочетает термодинамическое и математическое моделирование и учет изменения климата. Прогноз среднегодовой температуры пород к середине века выполнен для трех районов полуострова – северо-западного, западного Ямала и нижнего течения Оби. Температура мерзлых пород определялась двумя независимыми подходами. В первом случае использованы постоянные на период прогноза теплообменные характеристики пород, во втором случае – изменяющиеся с учетом преобразования водно-ионного состава поровых растворов. Минимальная разница между полученными значениями температуры составляет 0,1–0,2 °С на северо-западном Ямале. Наибольшее расхождение между результатами моделирования отмечается для нижнего течения Оби и достигает 0,5–0,6 °С. Пренебрежение засоленностью мерзлых пород и их свойств на период геокриологического прогноза приводит к погрешности определения среднегодовой температуры до 20%. С увеличением минерализации порового раствора с 35 до 150 г/л разница между вычислениями увеличивается на 15–20%. Значения среднегодовой температуры мерзлых пород, полученные при постоянных теплообменных характеристиках, оказываются заниженными по сравнению с результатами задачи с изменяющимися во времени характеристиками. Усовершенствование методики геокриологического прогноза позволит более обоснованно подойти к оценке будущего термического состояния засоленных мерзлых пород в условиях климатических изменений.

**Ключевые слова:**

засоленные мерзлые породы, геокриологический прогноз, водно-ионный состав, термодинамическое моделирование, Freezbrine, математическое моделирование, QFrost, изменение климата, авторетроспективный анализ, полуостров Ямал

*Работа выполнена в рамках проекта № 601.19—01/34, грант Правительства ЯНАО «Разработка комплексной методики мерзлотного (геокриологического) прогноза температурного и водно-ионного режима засоленных мерзлых пород п-ова Ямал, с учетом глобального изменения климата».*

**Введение**

Засоленные многолетнемерзлые грунты являются основанием для большинства проектируемых и эксплуатируемых зданий и сооружений на полуострове Ямал. В условиях климатических изменений на территории Ямало-Ненецкого автономного округа отмечается увеличение количества деформаций и разрушений фундаментов и надфундаментных конструкций зданий и инженерных сооружений, спроектированных, в первую очередь, по первому принципу, то есть с сохранением мерзлого состояния [1]. Прогнозируемая активизация криогенных геологических процессов, связанная с изменением климата и термовлажностного режима верхних горизонтов мерзлых пород, оказывает дополнительное негативное влияние на техническое состояние инфраструктуры и условия хозяйствования на Ямале [2-5].

Засоленность мерзлых грунтов предъявляет дополнительные требования не только к эксплуатационной надежности и безопасности зданий и сооружений, возводимых на таких грунтах, но и к проведению геокриологического прогноза. Изменения теплофизических, водно-физических, прочностных и деформационных свойств, связанные с динамикой температурного режима пород, в значительно большей степени проявляются при наличии легкорастворимых солей [6, 7]. Количественная оценка засоленности пород важна при проведении прогнозных теплотехнических расчетов, особенно с учетом эффекта изменения климата.

Накоплено значительное количество разнообразной эмпирической информации (натурные наблюдения, экспериментальные, лабораторные исследования), касающейся характеристик засоленных пород, в результате чего образовался определенный разрыв между глубиной и детальностью разработок по выяснению физической природы процессов и моделями, заложенными в схемы геокриологического прогноза [8].

Уточнение прогнозных оценок может происходить путем повышения точности входной эмпирической информации о характеристиках засоленных пород, создания объектно-ориентированных баз экспериментальных данных и региональных нормативных документов, учитывающих специфику состава, строения и свойств пород.

В связи с этим повышается актуальность разработки методики и проведения прогноза температурного режима засоленных мерзлых пород с учетом изменений климата и водно-ионного состава поровых растворов, сопровождающихся химическими взаимодействиями. Изменение водно-ионного состава рассматривается как результат физико-химических реакций преобразования растворенных газов, минеральных и органических веществ в растворе в результате формирования и таяния льда. Основная цель работы — количественное исследование влияния солей в поровых растворах мерзлых пород на прогнозные оценки их температурного режима к середине века на примере Ямала. Задача решена для трех районов полуострова — северо-западного и западного Ямала, нижнего течения Оби, в пределах которых породы характеризуются морским типом засоления.

### **Район исследования**

Территория полуострова Ямал представляет собой в основном плоскую, террасированную аккумулятивную низменную равнину, расположенную на севере Западно-Сибирской плиты. Многолетними региональными исследованиями установлено, что засоленные мерзлые породы севернее широты устья р. Байдараты—пос. Новый Порт имеют сплошное распространение, соли присутствуют по всему разрезу криогенной толщи [9]. Южнее выделенной границы отложения незасолены или слабозасолены с

поверхности до глубины 100 м. Содержание солей в породах зависит от фациальных условий их формирования и возраста. Наибольшие значения засоленности отмечаются на современных береговых участках — в голоценовых лайдовых и аллювиальных устьевых отложениях. Континентальные позднеплейстоцен-голоценовые отложения незасолены или слабозасолены. В морских глинистых отложениях, сохраняющих первичную седиментационную засоленность, содержание солей может достигать 3%, превышая содержание солей в песках в несколько раз, кроме песчаных горизонтов с криопэгами [10, 11].

Выбранные районы для прогноза температурного режима пород отличаются закономерностями в распределении засоленности и минерализации поровых растворов. В верхних горизонтах морских, прибрежно-морских позднеплейстоценовых и современных отложений, слагающих водоразделы на северо-западном Ямале, содержание солей составляет в суглинках 0,4—1,1%, в песках и супесях не более 0,2% [12]. Состав растворов преимущественно хлоридно-натриевый. Концентрация солей в разрезе I морской террасы достигает 100 г/л в глинистых породах и 20 г/л в песчаных [13, 14]. На территории западного Ямала засоленность морских позднеплейстоценовых суглинисто-глинистых пород находится в пределах 0,2—2,5%, песчаных 0,05—0,2% [15, 16]. В слое годовых колебаний температуры отмечается увеличение концентрации солей в 1,5—2 раза с глубиной. Тип засоления грунтов преимущественно хлоридный. В нижнем течении Оби наибольшее засоление отмечается в разрезах лагунно-морских террас. Засоленность достигает 0,1—1,1% в суглинках и 0,05—0,1% в песках [10, 17]. Состав растворов преимущественно хлоридно-сульфатно-натриевый.

В исследуемых регионах широко распространены засоленные мерзлые грунты, содержащие линзы незамерзших, отрицательно-температурных рассолов — криопэгов [18]. Такие линзы отмечены не только в современных морских и аллювиально-морских отложениях, но и в морских плейстоценовых отложениях террас [19, 20]. Криопэги террас залегают в разрезе в виде маломощных линз и приурочены к участкам с повышенной температурой грунтов. На лайдах вмещающие криопэги отложения являются охлажденными. Криопэги отличаются наибольшей минерализацией до 150 г/л. В криопэгах по сравнению с поровыми растворами мерзлых грунтов отмечается повышенное содержание ионов хлора и натрия и пониженное — сульфат-иона [16].

На севере Западной Сибири отмечается изменение климата с тенденцией к потеплению. Результаты наземных наблюдений показывают повышение среднегодовой температуры воздуха в среднем на 1,4 °С относительно климатической нормы совместно с увеличением продолжительности теплого периода. Высота снежного покрова постепенно возрастает с скоростью до 2 см/год, имея существенную межгодовую изменчивость [21, 22]. Указанные параметры в значительной степени влияют на температуру пород. Многолетними режимными наблюдениями на стационарах в зоне типичной тундры Ямала установлено, что с конца 1970-х гг. среднегодовая температура пород увеличилась на 1,5—2,2 °С [22, 23]. С 2010 г. линейный тренд увеличения максимальной глубины сезонного оттаивания изменяется от 0,8 см/год (остров Белый) до 7,3 см/год (Еркута) [24].

### Материалы и методы

Особенностью разработанной методики прогноза температурного режима засоленных

мерзлых пород является учет изменений их фазового и химического состава при промерзании—протаивании на фоне климатических изменений с помощью методов термодинамического и математического моделирования, выполненного в программах «Freezbrine» и «QFrost» [\[25, 26\]](#). Для каждого из районов расчет выполнен для двух типов модельных разрезов — песчаного и суглинистого. В пределах каждого из трех регионов выбирались разрезы возвышенных террасовых участков. Расчет выполнен для нескольких значений минерализации порового раствора — 35, 90 и 150 г/л.

### **1. Термодинамическое моделирование преобразования водно-ионного состава засоленных мерзлых пород**

Программа «Freezbrine» является продолжением и усовершенствованием термодинамической модели «Frezchem», разработанной в лаборатории CRREL (The Cold Regions Research and Engineering Laboratory, США) в рамках проекта NASA (National Aeronautics and Space Administration) для исследования поведения растворов солей на других планетах. Модель «Frezchem» предназначена для вычисления химического равновесия между водными растворами электролитов, льдом и солями, с использованием методов статистической термодинамики К. Питцера [\[27, 28\]](#).

База данных программы «Freezbrine» включает в себя 8 катионов, 7 анионов, 8 нейтральных частиц, 8 газов и 56 твердых компонентов. Входными данными в программу являются: исходная общая минерализация и концентрация основных компонентов химического состава пробы, полученные на основании химического анализа. С помощью метода минимизации свободной энергии Гиббса в многокомпонентных водно-солевых растворах рассчитывается фазовый состав и содержание солей, льда, газовой и жидкой фазы, осмотический коэффициент, ионная сила и pH растворов, химический потенциал и др. в широком диапазоне значений температуры [\[29, 30\]](#).

При прогнозировании водно-ионного режима использовались следующие допущения: теплофизические свойства мерзлой, талой и охлажденной зон кусочно-постоянны, химическое и адсорбционное взаимодействие поровой влаги отсутствует; перенос ионов за счет диффузии и конвекции пренебрежимо мал; тепловые эффекты, связанные с выпадением солей из раствора в твердую фазу и выпадением (поглощением) теплоты растворения, малы по сравнению с теплотой фазовых переходов вода—лед.

Термодинамическое моделирование химического преобразования растворов солей при промерзании—протаивании выполнено на основе опубликованных данных [\[16, 17, 31–33\]](#) и фондовых материалов инженерных изысканий ООО НТФ «Криос». Использована информация о водно-физических, теплофизических свойствах, степени засоленности пород, содержании основных ионов и минерализации поровых растворов различных стратиграфо-генетических комплексов, слагающих верхние горизонты криогенной толщи Ямала.

### **2. Математическое моделирование температурного режима засоленных мерзлых пород**

Математическое моделирование динамики температурного режима засоленных пород с учетом тренда повышения температуры воздуха выполнено в программе «QFrost». Прогнозная задача — одномерная, то есть решена для однородного полупространства при постоянных краевых условиях, массообменных характеристиках грунта в талом и мерзлом состояниях и зависимости содержания незамерзшей воды от температуры.

Математическая формулировка задачи Стефана на границе мерзлых и промерзающих пород имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} c_1(z, t) \frac{\partial t_1(z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_1(z, t) \frac{\partial t_1}{\partial z} \right], 0 < z < \xi(\tau) \\ c_2(z) \frac{\partial t_2(z, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_2(z) \frac{\partial t_2}{\partial z} \right], \xi(\tau) < z < l \end{aligned} \right\}, (1)$$

где  $\lambda_{1z, t}$  — теплопроводность грунта в промерзающей зоне, Вт/(м·°C);  $\lambda_{2z}$  — теплопроводность талого грунта, Вт/(м·°C);  $c_{1z, t}$  — эффективная теплоемкость грунта в промерзающей зоне, Дж/(кг·°C);  $c_{2z}$  — теплоемкость талого грунта, Дж/(кг·°C);  $t$  — температура, °C;  $\xi$  — координата фазовой границы;  $l$  — глубина расчетной области, м;  $z$  — координата;  $\tau$  — время, ч.

На подвижной границе между талыми и промерзающими породами выполняются условия:

$$t_1(\xi(\tau), \tau) = t_2(\xi(\tau), \tau) = t_{bf}, (2)$$

$$L_v \frac{d\xi(\tau)}{d\tau} = \lambda_1 \frac{\partial t_1(z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=\xi-0} - \lambda_2 \frac{\partial t_2(z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=\xi+0}, (3)$$

где  $t$  — температура фазового перехода, °C; где  $L$  — скрытая теплота фазовых переходов на единицу объема грунта, Дж/м³.

Применена явная схема решения с регуляризацией, что позволило в несколько раз увеличить шаг во времени и во столько же раз сократить время счета. Использована энтальпийная форма задачи и метод балансов, что привело к наглядной физической интерпретации результатов и существенно повысило точность определения положения границ промерзания—оттаивания. Динамика температурного режима пород оценивается по среднегодовой температуре пород, определяемой на подошве слоя годовых теплооборотов.

Расчет в программе «QFrost» выполнялся двумя независимыми друг от друга итерациями. В первом случае программа использовала постоянные на период прогноза теплообменные характеристики грунтов. Во втором случае эти характеристики были рассчитаны с помощью программы «Freezebrine» с последующей обработкой данных по методике, предложенной И. А. Комаровым [34, 35].

Дополнительно была решена задача по определению временного шага, на котором статистически заметно изменение теплофизических свойств засоленных пород. В реальных природных условиях такие изменения заметны при значительных колебаниях температуры грунта, проявляющихся в масштабах лет или сезонов промерзания—оттаивания. Ранее установлено, что концентрация порового раствора пород в слое годовых колебаний температуры в течение года может меняться в несколько раз [16, 36]. Максимальное увеличение концентрации наблюдается преимущественно в конце периода промерзания, а минимальное — в конце периода оттаивания. Таким образом, теплообменные характеристики пород менялись в программе 2 раза в год. Граница между этими периодами определена по знаку (положительному или отрицательному) среднемесячной температуры на верхней границе расчетной области. Для всех итераций был принят постоянный временной шаг — 3 часа.

### 3. Разработка сценария изменения среднегодовой температуры воздуха для целей геоэкологического прогноза

Для прогноза температурного режима мерзлых пород к середине века разработаны сценарии изменения среднегодовой температуры воздуха. Использован эмпирический подход, основанный на анализе результатов многолетних наблюдений на метеостанциях. 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.

На основе гармонического анализа данных метеонаблюдений за температурой воздуха Л. Н. Хрустальевым предложена методика авторетроспективного анализа [37]. Метод базируется исключительно на данных инструментальных наблюдений, проведенных с высокой частотой по единой методике. Периодические колебания температуры воздуха на базовом интервале аппроксимируются тригонометрическим рядом Фурье. Используются многолетние ряды наблюдения за среднемесячной температурой воздуха, доступные в открытой базе Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных [21]. На основе данной методики разработаны сценарии изменения среднегодовой температуры воздуха для трех районов — Марре-Сале (западный Ямал), Харасавэй (северо-западный Ямал), Салехард (нижнее течение Оби).

### Создание, верификация и реализация тепловой модели

При создании математической модели в программе «QFrost» задавались граничные условия. На нижней границе установлено условие II рода — постоянный по времени тепловой поток  $0,06 \text{ Вт/м}^2$  [38]. На боковых гранях теплопоток отсутствует. В соответствии с условием III рода на верхней границе задается коэффициент теплообмена, имеющий вид:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{кв}}} + R_{\text{сн}}}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{\text{кв}}$  — коэффициент конвективного теплообмена поверхности грунта с воздухом, зависящий от скорости ветра,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , определяется по формуле [39]:

$$\alpha_{\text{кв}} = 2,4 \cdot V_{\text{в}} + 2,3; \quad V_{\text{в}} \leq 4,6, \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{кв}} = 3,7 \cdot (V_{\text{в}} - 1); \quad V_{\text{в}} > 4,6, \quad (6)$$

где  $V_{\text{в}}$  — среднемесячная скорость воздуха,  $\text{м/с}$ ;

$R_{\text{сн}}$  — суммарное термическое сопротивление снега в зимний период,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , находится из выражения:

$$R_{\text{сн}} = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (7)$$

где  $\delta$  — толщина слоя,  $\text{м}$ .

На период прогноза использованы среднемноголетние за 1970–2020 гг. значения высоты снега [21]. Этот подход оправдан тем, что в задаче рассматривались разрезы возвышенных плоских водоразделов, на которых прогнозируемое повышение высоты снега может быть сведено к минимуму из-за ветрового перераспределения. Влияние растительности на возвышенных участках не учитывалось. Теплопроводность снежной толщи определена по эмпирической зависимости Б. В. Проскурякова [38]:

$$\lambda = 0,021 + 1,01 * \rho_{\text{сн}}, (8)$$

где  $\rho_{\text{сн}}$  — плотность снежного покрова, г/см<sup>3</sup>.

Органоминеральный слой (современная почва), имеющий небольшую мощность, исключен из расчетной области. На период прогноза не учитывается возможная осадка оттаивающих пород и развитие криогенных процессов. Размер расчетной области составляет 20 м, что соответствует или превышает глубину расположения подошвы слоя годовых теплооборотов.

Для получения модели обводненного породного массива, соответствующей реальным природным условиям, проведена калибровка. Ее основная цель — нахождение граничных условий, формирующих температурное поле, соответствующее природному на всю расчетную область. Начальное температурное поле задается на основе результатов термометрических наблюдений, выполненных ООО НТФ «Криос» преимущественно в 1990–е гг.

На верхней границе использованы помесечные значения температуры и коэффициента теплообмена, осредненные за период с 1970 г. до года проведения термометрических наблюдений. 1970 г. был избран в качестве начала периода осреднения, так как с начала 1970–х гг. XX века, по данным метеонаблюдений, отмечается направленное повышение среднегодовой температуры воздуха на Ямале. Полученный результат расчетов принимается в качестве начальных условий основной задачи.

### Результаты

На основе численного решения задачи Стефана определены значения среднегодовой температуры мерзлых пород до 2050 г. включительно для трех регионов Ямала. Расчет выполнен для двух типов модельных разрезов при трех значениях минерализации поровых растворов. В процессе расчетов учитывалось потепление климата на основе разработанных сценариев изменения среднегодовой температуры воздуха.

Для северо-западного Ямала к середине века прогнозируемое значение линейного тренда повышения температуры воздуха составляет 0,3 °C/10 лет на основе обработки многолетних наблюдений на метеостанции Харасавэй. Прогнозируемая температура песчаных пород изменится с -5,0...-6,8 °C до -4,8...-6,0 °C, суглинистых с -5,3...-6,9 °C до -5,2...-6,2 °C. Линейный тренд изменения достигает 0,2 °C/10 лет (рис. 1).



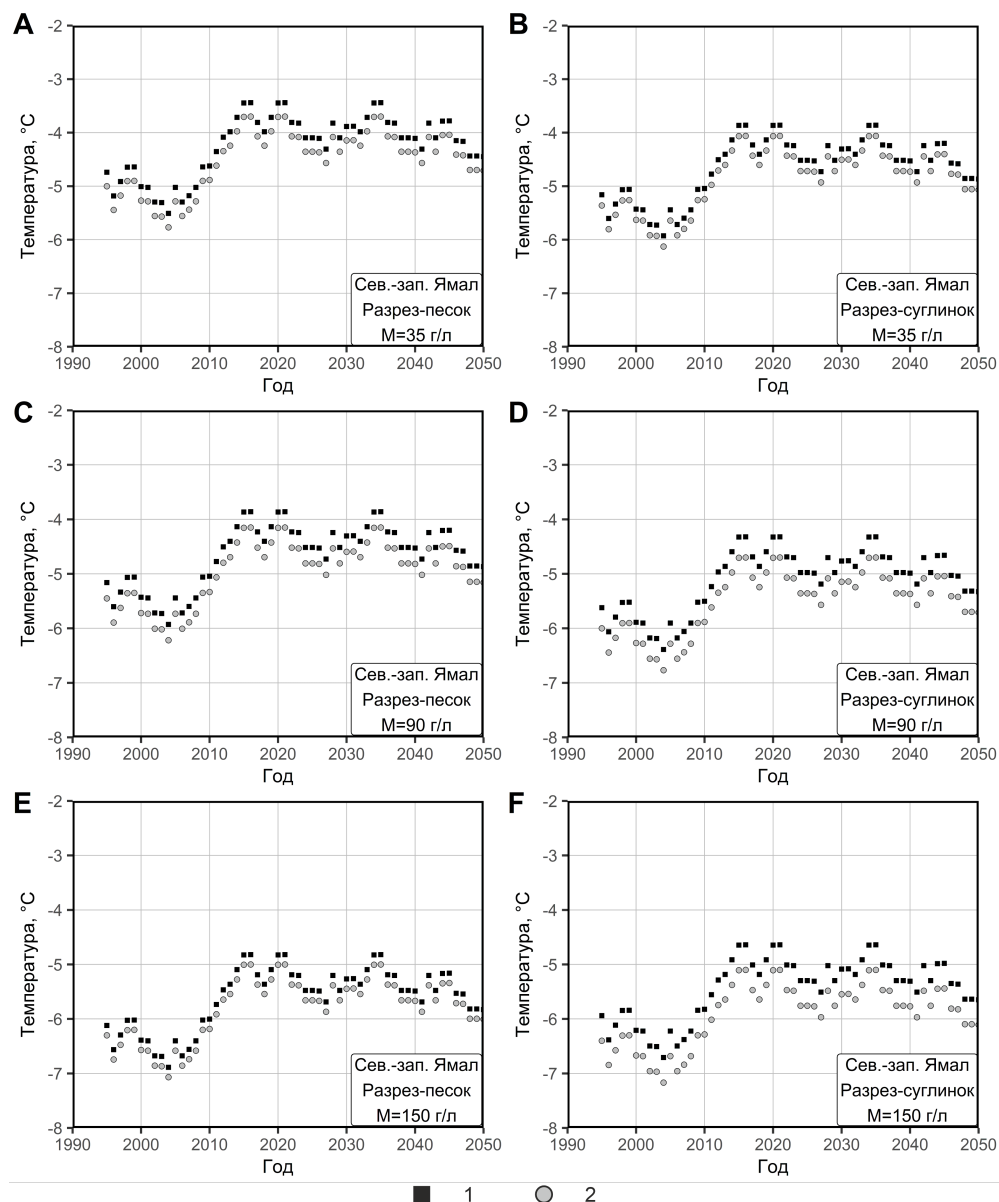


Рисунок 1. Изменение температуры засоленных мерзлых пород северо-западного Ямала.

1 и 2 — результаты решения задачи с учетом и без учета преобразования фазового и химического состава поровых растворов соответственно.

Для западного Ямала прогнозируемое значение линейного тренда повышения температуры воздуха составляет  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  на основе обработки многолетних наблюдений на метеостанции Марре-Сале. Результаты решения задачи показывают повышение среднегодовой температуры в песках с  $-5,5...-6,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-3,5...-4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в суглинках с  $-6,1...-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-4,0...-4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Прогнозируемая скорость изменения температуры составляет  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  (рис. 2).

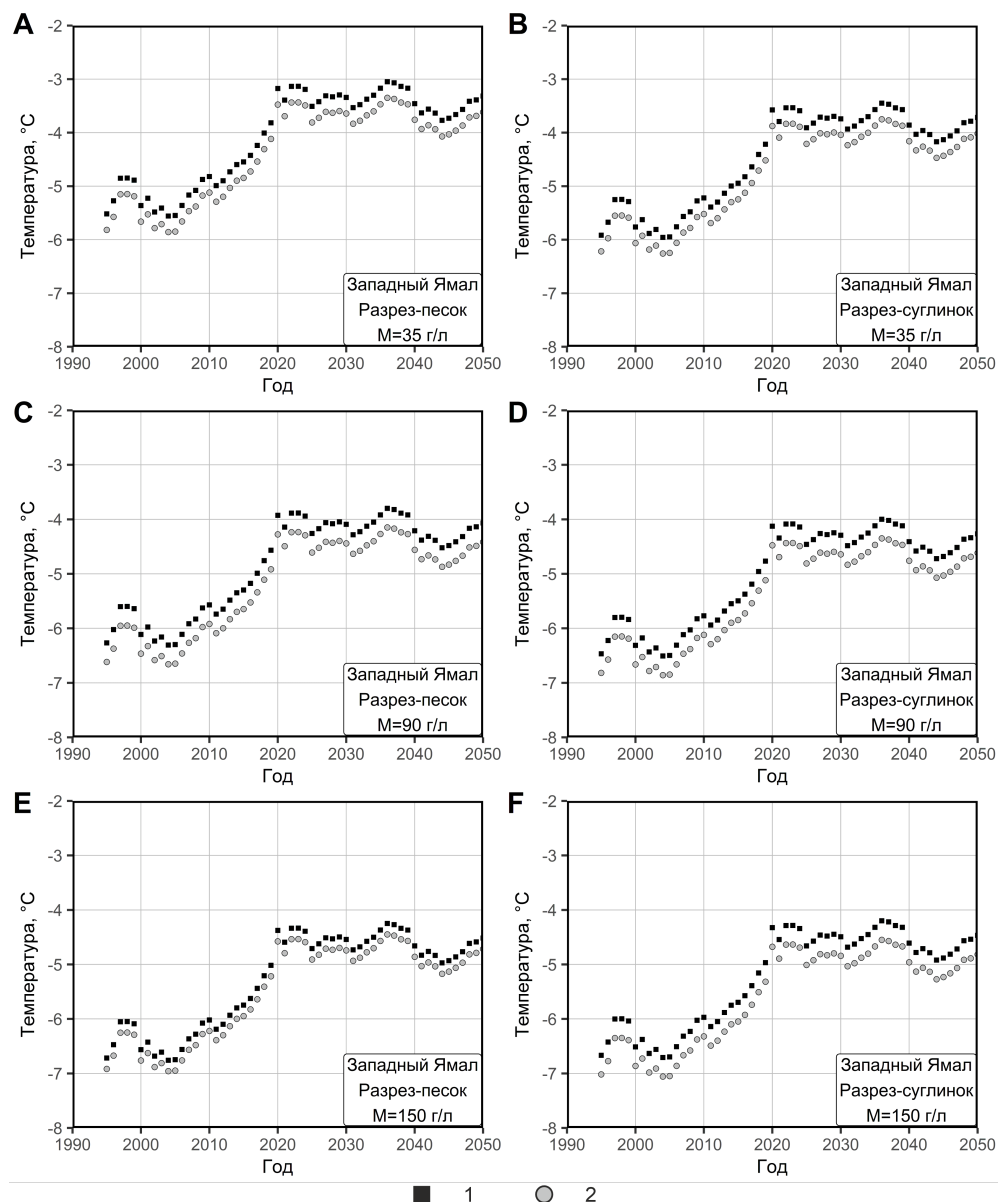


Рисунок 2. Изменение температуры засоленных мерзлых пород западного Ямала.

1 и 2 — результаты решения задачи с учетом и без учета преобразования фазового и химического состава поровых растворов соответственно.

В нижнем течении Оби прогнозируемое значение линейного тренда повышения температуры воздуха составляет  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  на основе обработки многолетних наблюдений на метеостанции Салехард. Результаты математического моделирования показывают постепенное увеличение температуры в песках с  $-2,4\text{...}-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1,5\text{...}-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в суглинках с  $-2,7\text{...}-3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1,6\text{...}-2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Значение линейного тренда повышения температуры грунта составляет  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  (рис. 3).

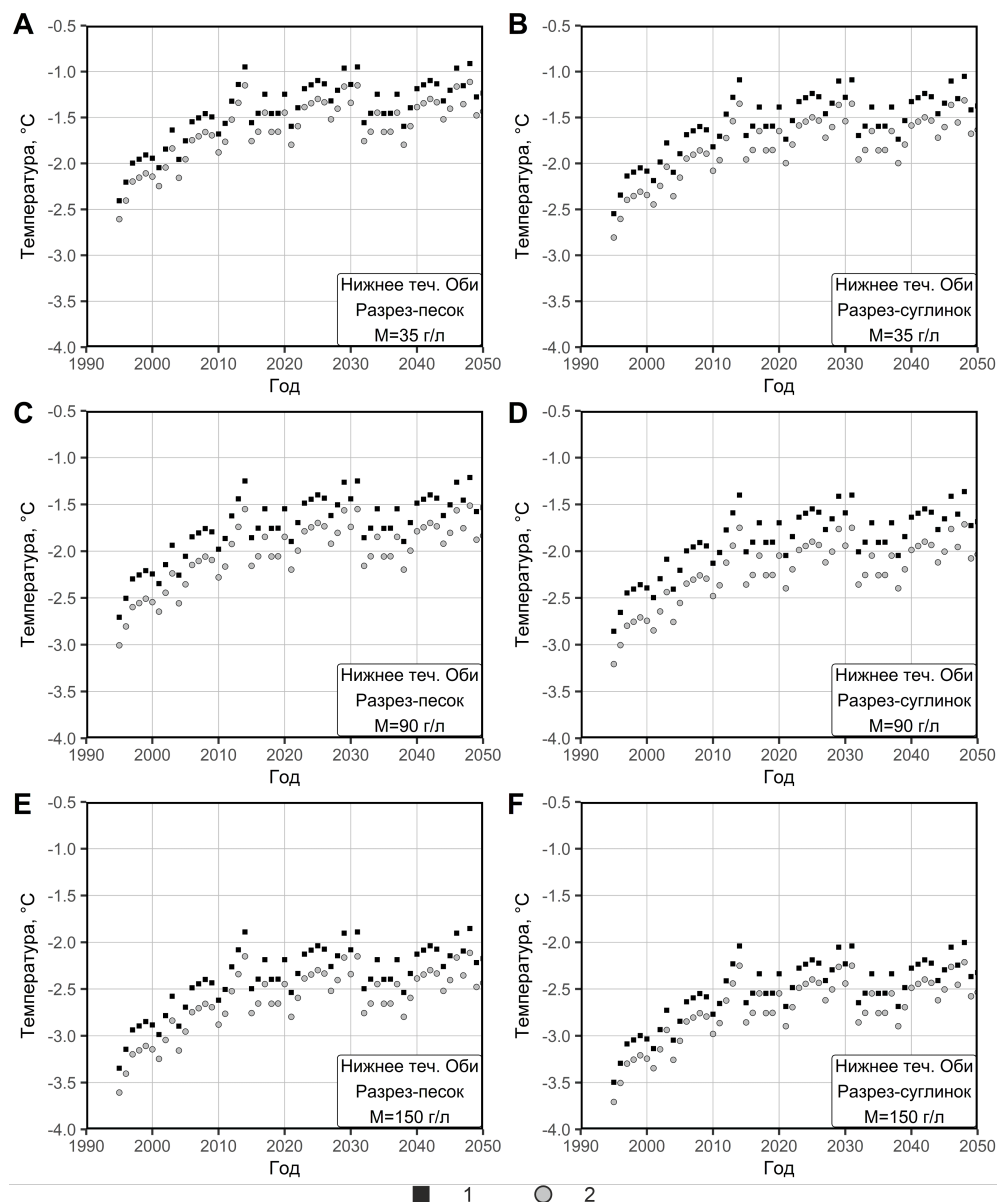


Рисунок 3. Изменение температуры засоленных мерзлых пород нижнего течения Оби.

1 и 2 — результаты решения задачи с учетом и без учета преобразования фазового и химического состава поровых растворов соответственно.

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.

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 °C характерна для первых 5—10 лет прогноза при минерализации 35 г/л. К 2050 г. разница достигает 0,3—0,4 °C при минерализации 150 г/л. Для западного Ямала результаты моделирования отличаются между собой на 0,2—0,3 °C в первые годы прогноза при минимальной минерализации. К середине века разница достигает 0,4—0,5 °C при минерализации порового раствора 150 г/л. В суглинках расхождение между независимыми вычислениями температуры оказались на 0,2—0,3 °C 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.

### **Обсуждение**

Совместное использование методов термодинамического и математического моделирования выявило значимое различие между результатами вычислений. Неучет засоленности мерзлых пород и их свойств на период геокриологического прогноза приводит к погрешности расчетов до 20%. Значения среднегодовой температуры мерзлых пород, полученные при постоянных теплообменных характеристиках, оказываются заниженными по сравнению с результатами задачи с меняющимися во времени характеристиками. Разница между результатами не является постоянной, на начальном этапе прогнозирования (первые 5—10 лет) она составляет 8—10%. В дальнейшем разница между вычислениями увеличивается, достигая максимума через 25—30 лет. С повышением минерализации раствора с 35 до 150 г/л разница между вычислениями увеличивается на 15—20%.

Кривые изменений прогнозируемой температуры для северо-западного и западного Ямала близки к эквидистантным. Это позволяет использовать при необходимости поправочные коэффициенты для сокращения возможной ошибки, возникающей при решении тепловой задачи без учета изменений водно-ионного состава поровых растворов. Однако такой подход оправдан только для краткосрочных прогнозов, так как после 10—15 лет указанная ошибка существенно возрастает. Для нижнего течения Оби использование коэффициентов не представляется возможным — характер изменения температуры пород имеет более сложный характер. Таким образом, для уменьшения неопределенности прогнозных оценок температуры мерзлых пород на региональном уровне при изменении климата и хозяйственном освоении территории численное решение задачи теплопередачи с учетом изменений фазового и химического состава поровых растворов представляется предпочтительнее введения в расчетную схему различных коэффициентов.

### **Заключение**

Широкое распространение засоленных многолетнемерзлых грунтов на Ямале и их использование в качестве оснований зданий и сооружений предъявляют дополнительные требования к прогнозированию термического состояния мерзлых пород. Использование в прогнозных оценках результатов наблюдений, экспериментов и лабораторных исследований, направленных на выяснение физической природы процессов в засоленных породах с учетом преобразования водно-ионного состава поровых растворов, может повысить точность полученных результатов. При этом существует неопределенность в том, насколько результаты физически более обоснованного моделирования температурных полей могут отличаться от итогов решения «классической» тепловой задачи с постоянными на период прогноза теплообменными характеристиками. Работа направлена на количественное исследование влияния засоленности на прогнозные оценки температурного режима мерзлых пород для трех регионов Ямала.

Одними из ограничений данной методики являются: полуавтоматический режим вычислений и постановка задачи теплопередачи исключительно в кондуктивной форме. Полуавтоматический режим работы связан с тем, что для решения задачи используются две независимые программы, необходимые для оценки изменений водно-ионного

состава растворов солей и нахождения температурных полей. В дальнейшем это ограничение может быть снято при встраивании модуля «Freezbrine» в качестве подпрограммы к приложению для решения тепловых задач и полностью автоматическом определении теплофизических свойств пород на каждом временном шаге с соответствующим пересчетом тепловых полей.

Физическая картина промерзания—протаивания пород, насыщенных растворами солей, значительно более сложная, чем незасоленных пород. Основные уравнения краевой задачи при наличии фазовых переходов и химических превращений должны содержать дифференциальные уравнения теплопроводности, влагопроводности, солепереноса, сложный взаимосвязанный вид начальных и граничных условий. Усовершенствование существующих или разработка новых приложений с учетом системы указанных уравнений позволит более обоснованно подойти к оценке будущего термического состояния засоленных мерзлых пород.

### **Благодарности**

Авторы благодарят к.т.н. В. А. Кондакова и к.г.-м.н. А. Б. Осокина за возможность использования фондовых материалов ООО НТФ «Криос» по характеристикам засоленных пород полуострова Ямал.

### **Библиография**

1. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V., Badina S. V., Sadurtdinov M. R., Drozdov D. S., Malkova G. V., Zheleznyak M. N., Zhdaneev O. V., Ostarkov N. A., Osokin A. B., Sergeev D. O., Dubrovin V. A., Kuznetsov M. E., Frolov K. N., Alekseev A. G., Fedorov R. Y. Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure // *Energies*. 2022. Vol. 15(9). 3190. doi: 10.3390/en15093190.
2. Мельников В. П., Осипов В. И., Брушков А. В., Бадина С. В., Дроздов Д. С., Дубровин В. А., Железняк М. Н., Садуртдинов М. Р., Сергеев Д. О., Остарков Н. А., Фалалеева А. А., Шелков Я. Ю. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2021. № 1. С. 14-31. doi: 10.31857/S0869780921010070.
3. Alexandrov G. A., Ginzburg V. A., Insarov G. E., Romanovskaya A. A. CMIP6 model projections leave no room for permafrost to persist in Western Siberia under the SSP5–8.5 scenario // *Climatic Change*. 2021. Vol. 169(42). doi: 10.1007/s10584-021-03292-w.
4. Kislov A., Alyautdinov A., Baranskaya A., Belova N., Bogatova D., Vikulina M., Zheleznova I., Surkova G. A Spatially Detailed Projection of Environmental Conditions in the Arctic Initiated by Climate Change // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. 1003. doi: 10.3390/atmos14061003.
5. Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I., Porfiriev B. N., Eliseev D. O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14(2). 025003. doi: 10.1088/1748-9326/aaf5e6.
6. Аксенов В. И. Засоленные мерзлые грунты арктического побережья как основание сооружений. М.: Все о мире строительства, 2008.
7. Брушков А. В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Издательство МГУ, 1998.
8. Комаров И. А. Проблемы прогноза свойств засоленных мерзлых пород и интенсивности протекания в них мерзлотных процессов // *Мониторинг в криолитозоне: материалы Шестой конференции геокриологов России*. М., 2022. С. 11-48.

9. Дубиков Г. И., Иванова Н. В. Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений / под ред. С.С. Вялова. М.: Наука, 1990. С. 3-9.
10. Дубиков Г. И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: ГЕОС, 2002.
11. Дубиков Г. И., Иванова Н. В., Зыков Ю. Д., Червинская О. П., Красовский А. Г. Засоление прибрежных отложений и их коррозионная агрессивность // Криосфера Земли. 1999. Т. III. № 1. С. 43-51.
12. Буданцева Н. А., Баду Ю. Б., Васильчук Ю. К., Подборный Е. Е. Засоленность грунтов // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Том 1. Криосфера Харасавейского газоконденсатного месторождения / под ред. Ю. К. Васильчука, Г. В. Крылова, Е. Е. Подборного. Тюмень – Санкт-Петербург: Недра, 2006. С. 134-159.
13. Баду Ю. Б., Дубиков Г. И., Иванова Н. В. Состав и строение криогенной толщи на Западном Ямале // Лабораторные и полевые исследования мерзлых грунтов и льдов. М.: Стройиздат, 1986. С. 27-35.
14. Иванова Н. В. Засоленность мерзлых грунтов. Криопэги // Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштерновского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал) / под ред. В. В. Баулина. М.: ГЕОС, 2003. С. 83-92.
15. Баду Ю. Б., Подборный Е. Е. Засоленность грунтов // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Том 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под ред. Ю. Б. Баду, Н. А. Гафарова, Е. Е. Подборного. М.: ООО «Газпром Экспо», 2013. С. 326-336.
16. Фотиев С. М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск: ГЕО, 2009.
17. Трофимов В. Т., Баду Ю. Б., Кудряшов В. Г., Фирсов Н. Г. Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975.
18. Толстихин Н. И., Толстихин О. Н. Природные воды Земли и криосфера // Вопросы криологии Земли. М.: Наука, 1976. С. 11-22.
19. Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А. Криопэги // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Том 1. Криосфера Харасавейского газоконденсатного месторождения / под ред. Ю. К. Васильчука, Г. В. Крылова, Е. Е. Подборного. Тюмень – Санкт-Петербург: Недра, 2006. С. 230-235.
20. Паренкина О. Л., Подборный Е. Е. Криопэги // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Том 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под ред. Ю. Б. Баду, Н. А. Гафарова, Е. Е. Подборного. М.: ООО «Газпром Экспо», 2013. С. 337-353.
21. Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). [meteo.ru/data](https://meteo.ru/data). Дата обращения 15.12.2023.
22. Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V., Sadurtdinov M., Shein A., Skvortsov A., Sudakova M., Tsarev A. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // *Energies*. 2022. Vol. 15(7). 2311. doi: 10.3390/en15072311.
23. Васильев А. А., Гравис А. Г., Губарьков А. А., Дроздов Д. С., Коростелев Ю. В., Малкова Г. В., Облогов Г. Е., Пономарева О. Е., Садуртдинов М. Р., Стрелецкая И. Д., Стрелецкий Д. А., Устинова Е. В., Широков Р. С. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 2. С. 15-30. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
24. Circumpolar Active Layer Monitoring Network–CALM: Long-Term Observations of the

Climate-Active Layer-Permafrost System. gwu.edu/~calm/data/data-links.htm. Дата обращения 15.01.2024.

25. Песоцкий Д. Г. Программа расчета теплового взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами QFrost. Свидетельство № 2016614404. Государственный реестр программ для ЭВМ, 22.04.16.
26. Marion G. M., Mironenko M. V., Roberts M. W. FREZCHEM: A geochemical model for cold aqueous solutions // Computers & Geosciences. 2009. Vol. 36. Iss. 1. Pp. 10-15. doi: 10.1016/j.cageo.2009.06.004.
27. Волков Н. Г., Комаров И. А., МIRONENKO М. В., Фотиев С. М. Методики оценки температуры формирования ионно-солевого состава криопэгов // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 4. С. 54-61.
28. МIRONENKO М. В., Поляков В. Б. Об алгоритме расчета равновесного состава водно-солевых систем на основе модели Питцера // Геохимия. 2009. № 10. С. 1103-1107.
29. Marion G. M. A molal-based model for strong acid chemistry at low temperatures (<200 to 298 K) // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. Vol. 66. Iss. 14. Pp. 2499-2516. doi: 10.1016/S0016-7037(02)00857-8.
30. Marion G. M. Carbonate mineral solubility at low temperatures in the Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO<sub>4</sub>-OH-HCO<sub>3</sub>-CO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2001. Vol. 65. Iss. 12. Pp. 1883-1896. doi: 10.1016/S0016-7037(00)00588-3.
31. Крицук Л. Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010.
32. Стрелецкая И. Д., Лейбман М. О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений центрального Ямала // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 3. С. 15-24.
33. Фотиев С. М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. 1999. Т. III. № 2. С. 40-65.
34. Комаров И. А., Волков Н. Г. Методика прогноза температурного и водно-ионного составов засоленных пород и криопэгов // Проблемы строительства на засоленных грунтах. М.: Эпоха, 2007. С. 147-183.
35. Комаров И. А., МIRONENKO М. В., Кияшко Н. В. Совершенствование нормативной базы по расчетной оценке теплофизических свойств засоленных пород и криопэгов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 2. С. 25-30.
36. Комаров И. А., Волков Н. Г., МIRONENKO М. В., Фотиев С. М., Стрелецкая И. Д., Ковальчук А. Н. Методики прогноза температурного и водно-ионного режима в засоленных породах и криопэгах (проблемы, решения) // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения. Тюмень, 2006. С. 30-35.
37. Хрусталева Л. Н., Пармузин С. Ю., Емельянова Л. В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. М.: Университетская книга, 2011.
38. Балобаев В. Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991.
39. СП 121.13330.2012. Аэродромы. М.: Минрегион России, 2012.

## Результаты процедуры рецензирования статьи

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Предмет исследования являются исследование вариантов влияния засоленности на прогнозные оценки температуры мерзлых пород на примере полуострова Ямал. Методология исследования состояла в разработанной автором методики прогноза температурного режима засоленных мерзлых пород с учетом изменений их фазового и

химического состава при промерзании—протаивании на фоне климатических изменений с помощью методов термодинамического и математического моделирования, выполненного в программах «Freezbrine» и «QFrost» для двух типов модельных разрезов — песчаного и суглинистого для каждого из районов расчет выполнен. В пределах каждого из трех регионов выбирались разрезы возвышенных террасовых участков с расчетом для 35, 90 и 150 г/л. минерализации порового раствора.

Актуальность исследования состоит в разработке методики и проведения прогноза температурного режима засоленных мерзлых пород с учетом изменений климата и водно-ионного состава поровых растворов, сопровождающихся химическими взаимодействиями. Изменение водно-ионного состава рассматривается как результат физико-химических реакций преобразования растворенных газов, минеральных и органических веществ в растворе в результате формирования и таяния льда.

Статья, имея основательное научное значение, может выполнить и большую практическую полезную службу, так как она имеет большое и прикладное методическое значение и будет полезна студентам и аспирантам, обучающимся по направлению 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».

Научный результат состоит в модификации имеющихся методов расчета на прогнозные оценки температуры мерзлых пород путём оптимизации формул расчёта. Основные уравнения краевой задачи при наличии фазовых переходов и химических превращений должны содержать дифференциальные уравнения теплопроводности, влагопроводности, солепереноса, сложный взаимосвязанный вид начальных и граничных условий.

Практическая значимость определяется усовершенствованием существующих или разработкой новых приложений с учетом системы указанных уравнений, что позволит более обоснованно подойти к оценке будущего термического состояния засоленных мерзлых пород. Полученные данные могут найти применение в практике на объектах оценки термодинамических процессов.

Стиль, структура, содержание Стиль изложения - хороший, не требует правки, сокращения. Рисунки - приемлемы. Автором статьи использование многочисленной иллюстрации в виде рисунков и графиков, отражающих зависимости.

Библиография обширна и исчерпывающая. Использован адекватный современный список литературы. Ссылки на литературные источники по тексту присутствуют.

Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники.

Выводы, интерес читательской аудитории несомненен. Выводы достаточной степени аргументированы, обоснованы, исчерпывающи. Может быть полезна практикам для внедрения, а также студентам и аспирантам, обучающимся по направлению 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».