

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Нестерова Н.В., Землянскова А.А., Абрамов Д.А., Никитина П.А., Жунусова О.Р., Шихов А.Н., Макарьева О.М.
Количественная оценка и прогноз температуры многолетнемерзлых пород Магаданской области с
использованием модели GIPL 2.0 // Арктика и Антарктика. 2025. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.76876
EDN: GTSSWT URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=76876

Количественная оценка и прогноз температуры многолетнемерзлых пород Магаданской области с использованием модели GIPL 2.0

Нестерова Наталья Вадимовна

ORCID: 0000-0003-0677-4982

кандидат технических наук

Научный сотрудник; Санкт-Петербургский государственный университет
199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ nnesterova1994@gmail.com



Землянскова Анастасия Александровна

ORCID: 0000-0002-2249-5708

кандидат технических наук

Научный сотрудник; Санкт-Петербургский государственный университет
199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ anastasiazemlanskova@gmail.com



Абрамов Дмитрий Александрович

ORCID: 0000-0002-9593-0387

аспирант; геологический факультет; Московский государственный университет имени М. В.
Ломоносова
Инженер-исследователь; Институт криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН
625026, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86

✉ abramovda@my.msu.ru



Никитина Полина Андреевна

ORCID: 0000-0003-2439-2291

лаборант-исследователь; Санкт-Петербургский государственный университет
199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ nikitinapolina243@gmail.com



Жунусова Оксана Радиковна

ORCID: 0009-0004-0518-4029

Лаборант-исследователь; Санкт-Петербургский государственный университет
199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ zhun.oksana@gmail.com



Шихов Андрей Николаевич

ORCID: 0000-0003-2489-8436

доктор географических наук

Ведущий научный сотрудник; Санкт-Петербургский государственный университет

199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ and3131@inbox.ru



Макарьева Ольга Михайловна

ORCID: 0000-0002-2532-4306

кандидат технических наук

Ведущий научный сотрудник; Санкт-Петербургский государственный университет

199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ omakarieva@yandex.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.4.76876

EDN:

GTSSWT

Дата направления статьи в редакцию:

16-11-2025

Дата публикации:

23-11-2025

Аннотация: В последние десятилетия в России отмечается повышение температуры многолетнемерзлых пород, что способствует развитию опасных геокриологических процессов. Оценки влияния изменения климата на динамику мерзлоты и ее характеристик часто оказываются неопределёнными из-за отсутствия достоверных данных наблюдений. В условиях нехватки наблюдений основным методом исследования геокриологических условий становится математическое моделирование. Цель исследования – оценка возможности использования одномерной геокриологической модели GIPL2.0 в задачах расчета и прогноза характеристик мерзлоты в горной криолитозоне Северо-Востока. В работе использованы уникальные данные наблюдений региональной сети мониторинга мерзлоты Магаданской области, а также метеорологические данные станции Колымская. Актуальность работы подтверждается необходимостью учета рисков и адаптации регионов в зоне мерзлоты к прогнозируемым изменениям климата. Для моделирования применялась одномерная модель теплового потока GIPL2.0. Верификация модели производилась на основе данных о температуре

пород на двух скважинах в горной части бассейна р. Колымы за период 2022–2025 гг. Прогноз температуры пород до 2040 г. произведен на основе данных эксперимента AMIP-LFMIP-rmLC проекта CMIP6. Верификация модели проводилась до глубины 10 м. Рассчитанная температура пород удовлетворительно совпадает с данными наблюдений до глубины 5 м. Отклонения обусловлены неопределенностью при определении физических свойств пород и влиянием гидрологических процессов на динамику тепла в профиле, неучитываемым алгоритмом модели. Согласно прогнозу изменения климата температура воздуха в верховьях бассейна р. Колымы будет повышаться на 0.9/5 лет. Прогноз температуры пород до 2040 года на двух скважинах показал, что температура увеличится на всех глубинах, особенно в слое до 1 м – на 2-3 °С. Согласно расчету максимальная глубина сезонного оттаивания на скважине Гольцы превысит 2 м, а на скважине Перевал Кулу, несмотря на повышение температуры пород, не увеличится. В целом, исследование подчеркивает необходимость использования натурных данных для параметризации и верификации геокриологических моделей в целях повышения точности прогнозов.

Ключевые слова:

геокриологическая модель GIPL2.0, климатическая модель AMIP-LFMIP-rmLC, деятельный слой, многолетнемерзлые породы, Магаданская область, геокриологический мониторинг, ландшафт, природно-климатические факторы, изменения климата, прогноз

Анализ данных проведен в рамках проекта Санкт-Петербургского государственного университета «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата» (ID PURE 103963992)

Введение

В течение последних десятилетий в России наблюдается повышение температуры многолетнемерзлых пород и увеличение мощности сезонно-талого слоя [1-3]. Эти изменения способствуют развитию геокриологических процессов, которые являются причиной ослабления прочности фундаментов и других опасных для инфраструктуры явлений [4, 5]. Ученые предполагают, что в ближайшем будущем влияние этих процессов в регионах криолитозоны только усилится [4]. Для обеспечения устойчивого развития территорий с многолетнемерзлыми породами необходима разработка стратегий по адаптации к изменениям климата.

При анализе рисков, связанных с деградацией многолетнемерзлых пород, основной задачей является изучение их тепловых характеристик, мощности деятельного слоя и температуры пород на различных глубинах. Например, по данным метеорологических станций, где велись наблюдения по вытяжным термометрам, было установлено, что на Северо-Востоке России наблюдается устойчивое повышение температуры пород во все сезоны года до глубины 160 см, а также сдвигаются сроки промерзания и оттаивания. Основной теплообмен между атмосферой и подстилающими породами происходит весной и летом [6]. В работе [6] Ю. В. Стоцкute и Л. Н. Василевской (2016) отмечается, что наиболее тесные корреляции наблюдаются между температурой воздуха и температурой пород на глубине 80 см в зимнее время, что авторы связывают с особым типом почвенного покрова района.

Тем не менее, оценки изменения температур пород часто носят неопределенный характер, что связано с погрешностями измерений данных величин на метеорологических станциях, разнонаправленными трендами [7, 8], а также очень редкой сетью метеорологических станций в криолитозоне.

В условиях неопределенности и ограниченности наблюдаемой информации одним из основных методов изучения и прогноза геокриологических условий служит метод математического моделирования. Это эффективный инструмент для оценки состояния и прогнозирования динамики многолетнемерзлых пород [9, 10], успешное применение которого позволяет принимать более обоснованные технические решения [11]. Однако для параметризации и верификации моделей требуются данные полевых наблюдений, обеспечивающие оценку надежности вычислений [12].

В настоящее время на территории Магаданской области создана и развивается геокриологическая сеть наблюдений, которая состоит из 26 термометрических скважин глубиной от 5 до 30 м [11-14]. Скважины расположены в репрезентативных для горного региона ландшафтах и высотных поясах. Данные сети наблюдений могут быть использованы для параметризации математических моделей, что в дальнейшем позволит проводить оценку геокриологических характеристик на неизученных территориях.

Цель настоящей работы состоит в оценке применимости геокриологической модели теплового потока GIPL2.0 [15] в задачах расчета и прогноза температуры пород на разных глубинах на двух натурных объектах в бассейне верхней Колымы.

Территория исследования

Магаданская область относится к Яно-Чукотскому горному району, представляющему собой участок Евразийской горной системы. Территории Охотско-Колымского нагорья достигают высот от 550 до 2100 м над уровнем моря.

Климат исследуемой территории резко континентальный с чертами морского у побережья. Средняя годовая температура колеблется от $-11,8^{\circ}\text{C}$ на метеостанции Колымская (абсолютная высота 850 метров) до $-2,8^{\circ}\text{C}$ в г. Магадан (118 метров над уровнем моря). Среднегодовое количество осадков составляет 300-600 мм, причем большая часть (около 60%) выпадает летом. Устойчивый снежный покров формируется в октябре и полностью сходит в мае-июне.

Исследуемый район находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Мощность мерзлых толщ превышает 450 м на водоразделах и уменьшается до 180 м в долинах рек и межгорных впадинах. Глубина сезонного оттаивания варьируется от 0.3 до 2.5 м в зависимости от орографических условий [16].

Типичные ландшафты представлены гольцами, тундрами, лиственничными редколесьями и северотаёжными лесами. Режим рек соответствует восточносибирскому типу: здесь ярко выражено весенне-летнее половодье, сопровождаемое интенсивными летне-осенними паводками и низкой зимней меженью.

Объекты исследования

В работе использованы данные двух термометрических скважин региональной сети мониторинга Магаданской области, наблюдения на которых проводятся с 2022 г. [13, 14] (табл. 1, рис. 1).

Бурение обеих скважин проводилось ударным способом на установке УРБ 2А2М, керн извлекался только до глубины первых метров. Поэтому для описания геологического разреза до забоя использовались полевые описания, материалы [17], а также данные из работ [18].

Скважины обсажены пластиковой трубой, с внешней стороны засыпаны грунтом, а сверху изолированы от проникновения атмосферного воздуха и влаги. Интервал измерения температуры пород составляет 4 часа. Для круглогодичного мониторинга температуры пород используется оборудование производства компании «Импеданс» [13].

Скважина Гольцы расположена в гольцовом поясе на высоте 1187 м в бассейне ручья Правый Итрикан (правый приток р. Кулу) в 10 м от бровки крутого (40-50°) склона высотой 20–30 м на наклонной поверхности 7-10° западной ориентации. Тип местности – плоскогорно-привершинный, тундры горные каменистые, растительность отсутствует (Рис. 1а). Первые 2 м разреза представляют собой крупнообломочный делювиальный материал, интервал 2–15 м представлен коренными породами – гранодиоритами.

Скважина Перевал Кулу находится на Кулинском перевале вблизи Тенькинской трассы на высоте 1170 м на субгоризонтальной поверхности, представленной лиственничным редколесьем. Кустарниковый ярус отсутствует, поверхность выполнена лишайниками мощностью до 10 см (см. рис. 16). Первые 2 м разреза представлены щебнистым материалом выветрелого глинистого сланца, с 2 м и до забоя на глубине 15 м литологический состав пород не меняется и представлен глинистыми сланцами.

Обе скважины находятся в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород с глубиной сезонного оттаивания около 1.5 м. Оттаивание начинается в конце мая, заканчивается в июле/августе. Промерзание наступает в октябре и завершается через несколько недель, достигая верхней кровли мерзлоты.

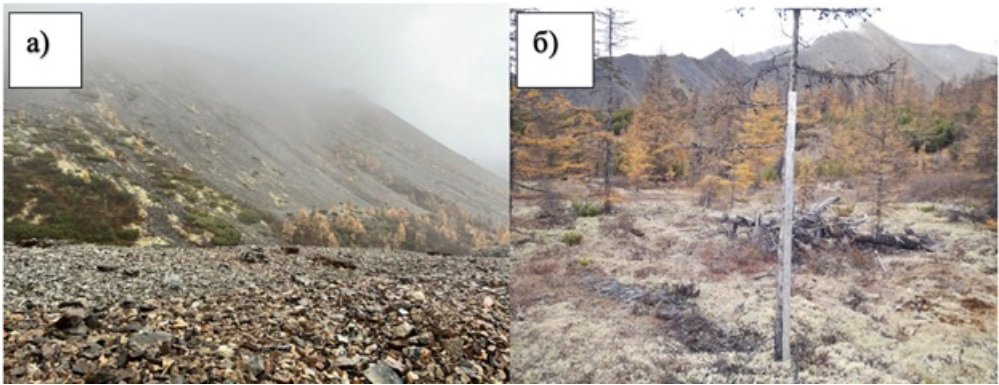


Рис. 1. Ландшафтные условия формирования температур горных пород.

а – скважина Гольцы; б – скважина Перевал Кулу.

Таблица 1. Характеристики рассматриваемых скважин

			Высота	
--	--	--	--------	--

Название	Широта	Долгота	Высота, м	Ландшафт
Гольцы	61.84	147.75	1182	Тундры горные каменистые, растительность отсутствует
Перевал Кулу	61.80	147.75	1170	Лиственничное редколесье

На рис. 2 представлено распределение температур в скважинах по глубине на 1 число каждого месяца. Сезонные колебания температур на глубине 15 м практически затухают и находятся в пределах погрешности датчика – $\pm 0.2^\circ$. Среднегодовые температуры на глубине 15 м для скважины Гольцы и скважины Перевал Кулу составляют -3.8 и -2.3°C соответственно.

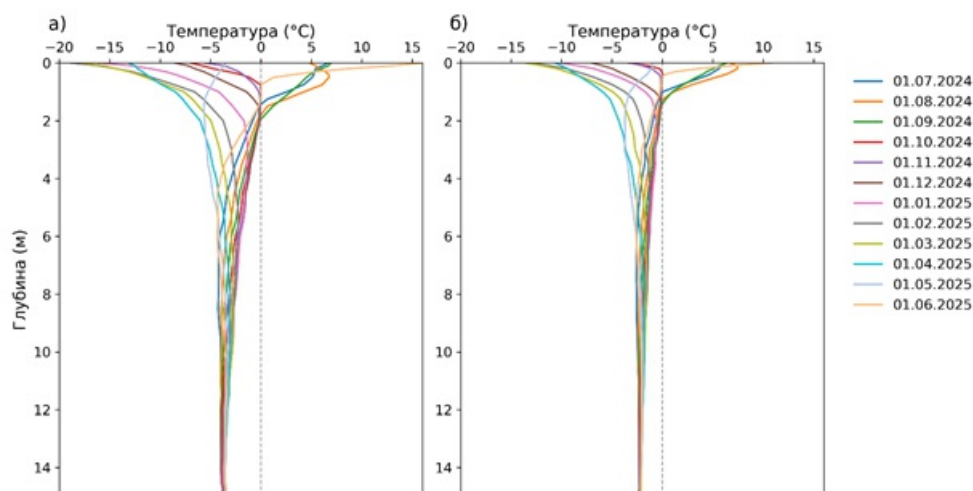


Рис. 2. Распределение температур в скважинах по глубине за период с 01.07.2024 по 01.06.2025 гг.

а – скважина Гольцы; б – скважина Перевал Кулу.

Материалы и методы

Геокриологическая модель GIPL2.0

Геокриологическая модель GIPL2.0 (Geophysical Institute Permafrost Laboratory, University of Colorado) представляет собой одномерную численную модель теплового потока. Модель позволяет рассчитывать тепловые свойства пород на различных глубинах путем решения одномерного уравнения теплопроводности.

В качестве входной информации используются среднесуточные значения температуры воздуха и характеристик снежного покрова. Толща пород в модели разделена на несколько слоев, каждый из которых отличается теплофизическими свойствами, такими как теплопроводность и объемная теплоемкость в талом и мерзлом состояниях, температура начала замерзания и др. [15]. Результатом расчёта являются профиль температуры пород и мощность деятельного слоя (ALT).

Модель GIPL2.0 широко применяется для прогнозирования динамики многолетнемерзлых пород в условиях изменений климата, оценки устойчивости инженерных сооружений, а также планирования долгосрочных проектов в районах криолитозоны в западных странах [19-23]. Также модель была успешно использована для составления карты

динамики мерзлоты на Аляске (США) и верифицирована на основе данных измерений температуры пород в неглубоких скважинах [19-21, 24].

Климатическая модель AMIP-LFMIP-rmLC

Для оценки ожидаемых климатических условий при моделировании температуры пород до 2040 года были использованы результаты модельного эксперимента AMIP-LFMIP-rmLC из проекта CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)^[25], а именно его компонента Land Feedback Model Intercomparison Project (LFMIP)^[26]. В рамках данного эксперимента проводилось взаимное сравнение моделей процессов на поверхности суши и их отклика на потепление климата. Шаг сетки модели по горизонтали составляет 100 км.

Расчеты проводились для сценария максимальных эмиссий CO₂ (SSP5-8.5), поскольку другие сценарии в рамках проекта LFMIP не рассматривались. Из данных модели климата были получены значения высоты снежного покрова и температуры воздуха с суточным шагом на период до 2040 г.

Параметризация модели на данных наблюдений за период 2022-2025 гг.

Входная метеорологическая информация и начальные условия. В качестве входных условий для модели GIPL2.0 были заданы среднесуточные данные по температуре воздуха и высоте снежного покрова метеорологической станции Колымская (высота 850 м) (бывшая станция Нижняя Колымской водно-балансовой станции, КВБС)^[27]. Исходные данные метеостанции корректировались с учетом градиента температуры воздуха и температурных инверсий в зимнее время, а также поправочного коэффициента для высоты снежного покрова с учетом высоты местности. Температурный градиент и поправочный коэффициент рассчитаны на основе данных КВБС за период 1948-1997 гг.^[27]. Для задания начальных условий были использованы натурные данные измеренной температуры пород на разных глубинах на дату начала расчета.

Теплофизические свойства горных пород. При использовании модели в целях расчета процессов теплопереноса наиболее важным является задание теплофизических параметров расчетных слоев пород (табл. 2). Для модели GIPL2.0 такими параметрами являются объемная пористость пород W , коэффициент теплопроводности и коэффициент теплоемкости пород в мерзлом L^* и талом состоянии L , температура замерзания пород T_p , информация о содержании незамерзшей воды в различных видах мерзлых пород в зависимости от отрицательной температуры.

В настоящий момент результатов по определению теплофизических свойств горных пород на территории исследования недостаточно. Поэтому для оценки параметров модели были использованы номограммы, составленные Д. М. Шестерневым (2001)^[28], данные С. А. Замолотчиковой и И. П. Зуева (1989)^[29], а также материалы исследований физических свойств мерзлых пород близлежащих месторождений^[30].

Определение объемной теплоемкости C талых и мерзлых пород проводилось по расчетным формулам, выведенным В. А. Кудрявцевым и В. Г. Меламедом^[31]. Данные о содержании незамерзшей воды были приняты в соответствии с зависимостями содержания незамерзшей воды от температуры на поверхности^[32].

Теплофизические свойства напочвенных покровов заимствованы из учебного пособия «Методы геокриологических исследований» (2004), в котором обобщены значения коэффициентов теплопроводности наиболее характерных мохово-лишайниковых и кустарниковых покровов. Теплоемкость напочвенных покровов взята согласно [33].

Таблица 2. Параметры расчетных слоев пород для модели GIPL2.0

Скважина	Мощность слоя, м	W, м ³ /м ³	L*, Вт/м×К	L, Вт/м×К	С*, (10 ⁶ Дж/ м ³ ×К)	С, (10 ⁶ Дж/ м ³ ×К)	Тр, I
Гольцы	0 – 2.0	0.15	2	1.8	1.50	2.09	- 0.02
	2.0 – 15	0.05	1.8	1.2	2.01	2.01	
Перевал Кулу	0 – 2.0	0.35	1.5	1.1	1.50	2.09	
	2.0 – 15	0.2	3.5	1.5	2.01	3.51	

W – объемная пористость, L – коэффициент теплопроводности, С – коэффициент теплоемкости, Тр – температура замерзания. * – мерзлой породы.

Результаты

Верификация результатов моделирования температуры пород на различных глубинах

Для скважин Гольцы и Перевал Кулу моделирование было выполнено до глубины 10 м за период с сентября 2022 до июня 2025 г.

Для количественной оценки адекватности воспроизведения температуры пород при сравнении с наблюдаемыми величинами на различных глубинах был использован критерий эффективности моделирования Нэша-Сатклиффа (NS) [34]. Этот критерий является статистической мерой, которая отражает долю дисперсии наблюдаемых величин, обоснованной рассчитанными значениями, и рассчитывается по формуле (1):

$$Ef = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H^i_{расч} - H^i_{набл})^2}{\sum_{i=1}^n (H^i_{набл} - \overline{H_{набл}})^2} \tag{1}$$

Принимаем, что при NS> 0.5 модель достаточно хорошо воспроизводит временную динамику моделируемых величин, при NS=1 модельный расчет следует признать полностью адекватным. При NS

На скважине Гольцы разница между рассчитанными и наблюдаемыми значениями температур в среднем составила 1.4°С для всего периода и варьировалась от 0.3°С для глубины 10 м до 2.0°С – на 0.1 м. Наибольшие отклонения наблюдались до глубины 3.0 м – амплитуда отклонения расчётных данных от наблюдаемых составила 5.1-8.2I. Величина критерия эффективности NS для этого слоя колебалась от 0.84 до 0.94 в 2024 г. (год с полным рядом наблюдений) (табл. 3). В остальные годы NS изменялся от -1.7 (2.0 м 2022 г.) до 0.93 (0.1 м 2023 г.). При увеличении глубины разница между рассчитанными и

наблюдаемыми значениями температуры пород сокращается до 0.8-2.1, а NS падает до 0.76 для глубины 5 м и 0.04 – для глубины 10 м в 2024 г. Коэффициент парной корреляции (r) для всех глубин, кроме 10 м, превышает 0.8.

Таблица 3. Оценка адекватности воспроизведения температуры пород моделью GIPL2.0 на различных глубинах, скважина Гольцы, 2022-2025 гг.

Год/ Глубина, м	0.1	0.5	0.75	1	1.5	2	3	5	10
NS 2022*	0.67	0.30	-0.17	-1.47	-1.63	-1.70	0.70	-0.37	0.16
NS 2023*	0.93	0.62	0.26	-0.30	-0.94	-1.37	-0.72	-0.11	-13.87
NS 2024	0.92	0.94	0.93	0.94	0.85	0.84	0.85	0.76	0.04
NS 2025*	0.89	0.92	0.91	0.70	0.40	-0.04	0.25	0.87	0.22
$r_{\text{ср}}$	0.97	0.94	0.92	0.91	0.87	0.87	0.88	0.85	0.33

* в 2022 г. расчет NS выполнен за период 11.10-31.12.2022; в 2023 г. в расчет NS не взят период с 07.04 по 28.09.2023 г. в связи с отсутствием данных наблюдений; в 2025 г. расчет NS выполнен за период 01.01.-15.06.2025 г.

Анализ результатов моделирования на примере 2024 г. также показал, что модель GIPL2.0 задерживает сроки перехода температуры пород через нуль градусов, в период оттаивания на 7-37 дней и на 1-9 дней в период промерзания на разных глубинах (рис. 3).

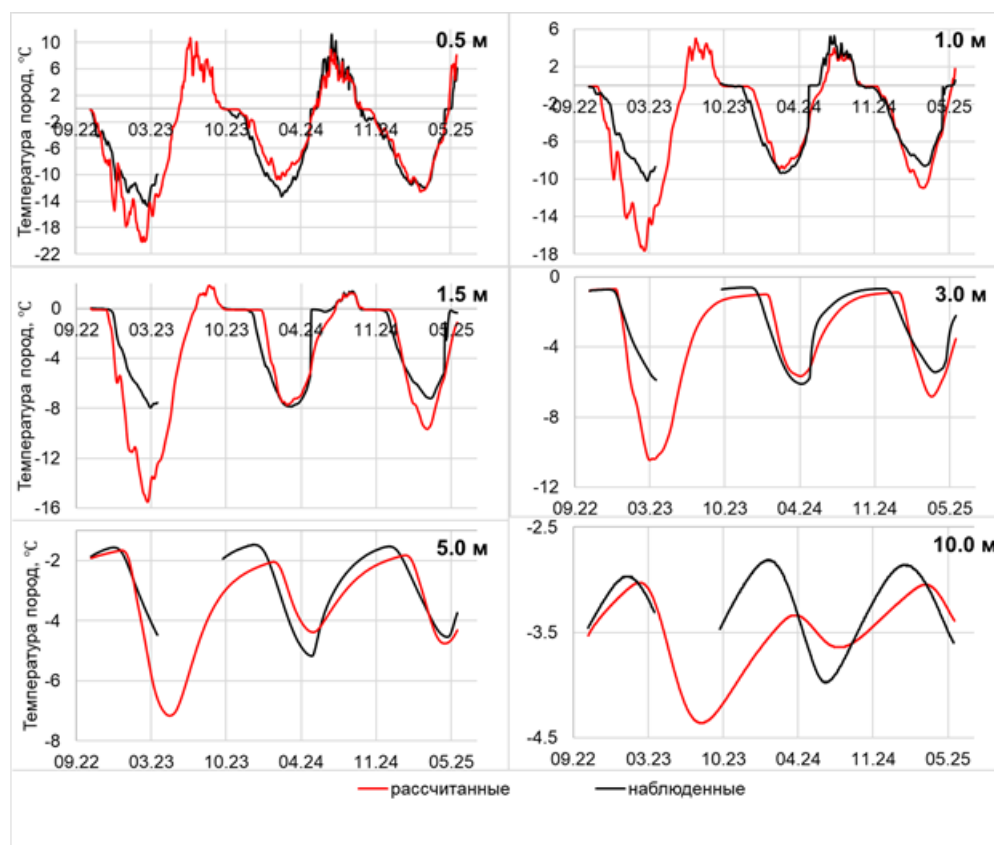


Рис. 3. Динамика температуры пород на различных глубинах по рассчитанным и наблюдаемым данным, скважина Гольцы.

На скважине Перевал Кулу результаты расчета показали, что разница между рассчитанными и наблюдаемыми значениями температур в среднем составила 1.1°C для всего периода и варьировалась от 0.2°C для глубины 10 м до 2.5°C – на поверхности. Наибольшие отклонения в абсолютных величинах наблюдались до глубины 1.0 м – амплитуда отклонения модельных данных составила 5.5-10.6 (рис. 4). Величина критерия эффективности NS для этого слоя в среднем колебалась от 0.60 до 0.85 в 2023 и 2024 гг. (табл. 4). В остальные годы NS изменялся от -2.63 (10.0 м 2025 г.) до 0.94 (0.0 м 2024 г.). При увеличении глубины разница между рассчитанными и наблюдаемыми значениями температуры пород по амплитуде сокращается до 0.4-3.5, а NS падает до -0.46 для глубины 10 м и 0.58 – для глубины 3 м в среднем за 2023-2024 гг.

Анализ ошибки расчета в процентном соотношении показал, что на поверхности максимальное отклонение от наблюдаемых данных составляет 30%, с увеличением глубины ошибка растет и достигает 61% на горизонте 1 м, примерно такое же значение отмечается и для глубин 1.5, 2 и 10 м, а в слое 3-5 м максимальная ошибка расчета составила 50%. Коэффициент парной корреляции (r) для всех глубин, кроме 10 м, превышает 0.8. Также как и на скважине Гольцы модель задерживает сроки начала оттаивания и промерзания, что и приводит к увеличению ошибки расчета температуры пород с глубиной.

Таблица 4. Оценка адекватности воспроизведения температуры пород моделью GIPL2.0 на различных глубинах, скважина Перевал Кулу, 2022-2025 гг.

Год/ Глубина, м	0	0.5	1	1.5	2	3	5	10
NS 2022*	0.76	0.70	0.24	-0.40	-0.33	-1.35	0.72	0.70
NS 2023	0.81	0.70	0.39	0.38	0.33	0.40	0.16	-0.62
NS 2024	0.89	0.94	0.81	0.74	0.74	0.76	0.67	-0.51
NS 2025*	0.85	0.83	0.09	0.04	0.05	0.38	0.73	-2.63
$r_{\text{ср}}$	0.97	0.96	0.91	0.87	0.87	0.87	0.85	0.67

* в 2022 г. расчет NS выполнен за период 11.10-31.12.2022; в 2023 г. в расчет NS не взят период с 07.04 по 28.09.2023 г. в связи с отсутствием данных наблюдений; в 2025 г. расчет NS выполнен за период 01.01.-15.06.2025 г.

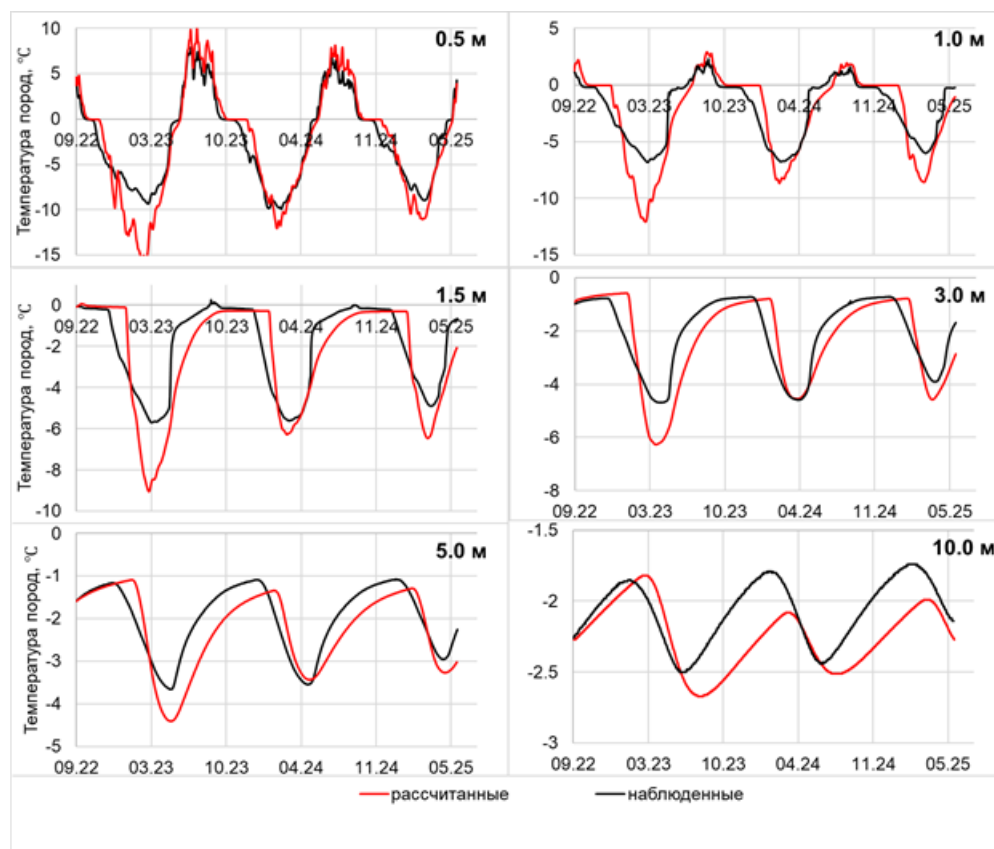


Рис. 4. Динамика температуры пород на различных глубинах по рассчитанным и наблюдаемым данным, скважина Перевал Кулу.

В целом, результаты моделирования можно принять удовлетворительными до глубины 5 м. Одной из основных причин расхождений между расчетными и наблюдаемыми значениями на глубине является неточное задание теплофизических свойств пород. На глубине более 5 м часто встречаются литологические слои с различными тепловыми свойствами (например, прослойки песка, глины, торфа, льда). Из-за отсутствия детальных лабораторных исследований керна в процессе моделирования расчетные слои были заданы упрощенно, то есть модель не учитывала неоднородность состава пород и использовала усредненные значения параметров, что могло привести к накоплению ошибки с глубиной.

Другой причиной неудовлетворительного результата моделирования мог стать недостаточный «разгон» модели, который бы позволил выйти на равновесное состояние с учетом начальных условий температурного профиля. Существенное влияние на тепловой режим пород оказывают влага и фильтрационные потоки, которые переносят тепло. Базовая версия GIPL2.0 является моделью теплового потока и не учитывает конвективный перенос тепла с влагой. В тех случаях, когда такие процессы важны, модель дает систематические ошибки.

Прогноз температуры пород по данным климатических моделей и модели GIPL2.0

Главным методом предупреждения опасностей, связанных со строительством на мерзлоте, является геокриологический прогноз [\[35\]](#).

Прогноз температуры пород до 2040 г. с использованием данных климатической модели

AMIP-LFMIP-rmLC был выполнен до глубины 10 м для двух скважин – Гольцы и Перевал Кулу.

По данным климатической модели в рамках эксперимента AMIP-LFMIP-rmLC были проанализированы температура воздуха и высота снежного покрова, необходимые для запуска модели GIPL2.0. Результаты расчета показали, что температура воздуха в верховьях бассейна р. Колыма будет повышаться (рис. 5) в среднем на 0.9/5 лет. Выявленного тренда по увеличению или сокращению максимальной высоты снежного покрова не установлено.

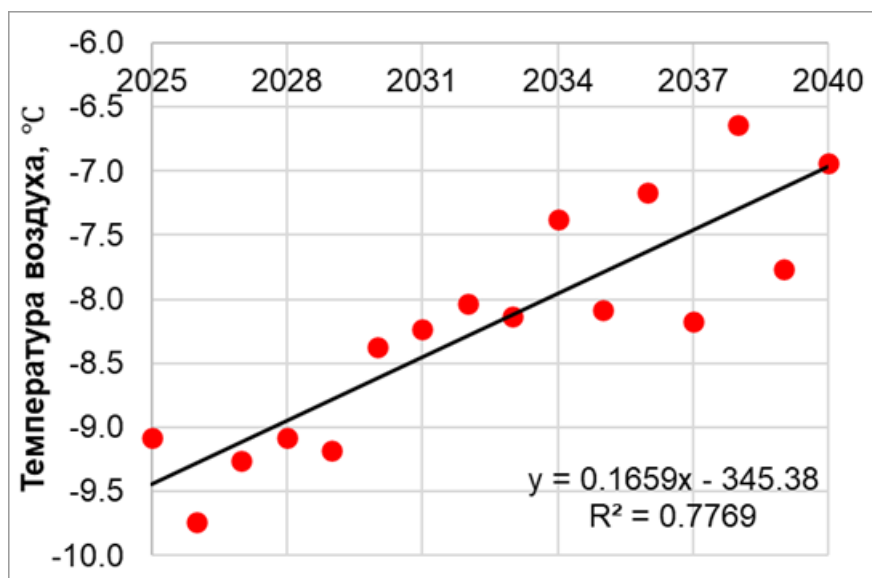


Рис. 5. Изменение средней годовой температуры воздуха по данным климатической модели за период 2025-2040 гг.

Максимальная высота снежного покрова вблизи скважины Гольцы будет достигать в среднем 0.9 м (от 0.6 до 1.2 м), а вблизи скважины Перевал Кулу – в среднем 0.8 м и изменяться от 0.5 до 1.0 м. При оценке тренда изменения температуры пород из анализа были исключены данные за 2035 г. На рис. 6 и рис. 7 видно, что температура пород в этом году выше относительно соседних лет на 1.0°, что в условиях мерзлых пород на глубинах более 1 м физически невозможно. Исключенный из анализа год отличается наибольшей максимальной высотой снежного покрова, которая составила более 1 м.

Анализ данных средней годовой температуры пород на скважине Гольцы показал, что ожидается ее повышение на всех глубинах. В слое 0.1-1.0 м наибольшие изменения будут наблюдаться в период до 2034 г. Коэффициент парной корреляции до глубины 5 м составил более 0.7 для расчетного периода 2026-2040 гг., а на период до 2034 г. по всем глубинам, за исключением 3 и 10 м, более 0.8. Так, к 2040 г. температура пород в слое до 1 м повысится на 2-3° (см. рис. 6). Глубина сезонного оттаивания составит более 2 м. Это значит, что при оправдывании прогноза изменения климатических условий в ближайшие 15 лет произойдет отступление верхней кровли мерзлоты.

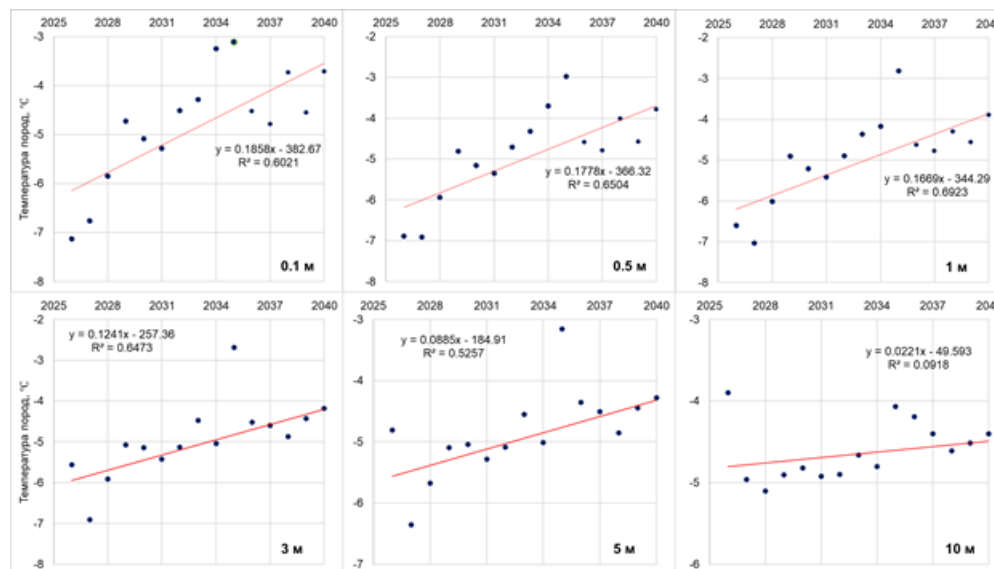


Рис. 6. Изменение средней годовой температуры пород на различных глубинах по данным климатической модели и модели GIPL2.0, скважина Гольцы.

Анализ результатов моделирования на скважине Перевал Кулу показал схожие изменения – повышение температуры пород по всем глубинам, в слое до 1 м – на 3.0°, на глубине 3 и 5 м – на 2.5 и 1.5° (рис. 7), соответственно. Коэффициент парной корреляции в слое 0.2-4.5 м составил более 0.8, у поверхности и на глубинах 5-7 м – более 0.8 для расчетного периода 2026-2040 гг. На период до 2034 г. выраженный тренд повышения температуры пород наблюдался до 0.75 м с коэффициентом более 0.9.

В отличие от результатов моделирования условий скважины Гольцы глубина оттаивания пород составит около 1 м. Данные наблюдений 2022-2024 гг. на этом объекте показали, что она уже достигает не менее 1.3 м. Таким образом, можно сделать вывод, что из-за недоучета периодов оттаивания/промерзания, несмотря на повышение температуры пород на всех глубинах, модель GIPL2.0 не предсказывает увеличение глубины оттаивания и, как следствие, отступление верхней кровли мерзлоты. В работе [36] также было установлено, что при прогнозе характеристик многолетнемерзлых пород максимальное значение деятельного слоя моделью GIPL2.0 было занижено.

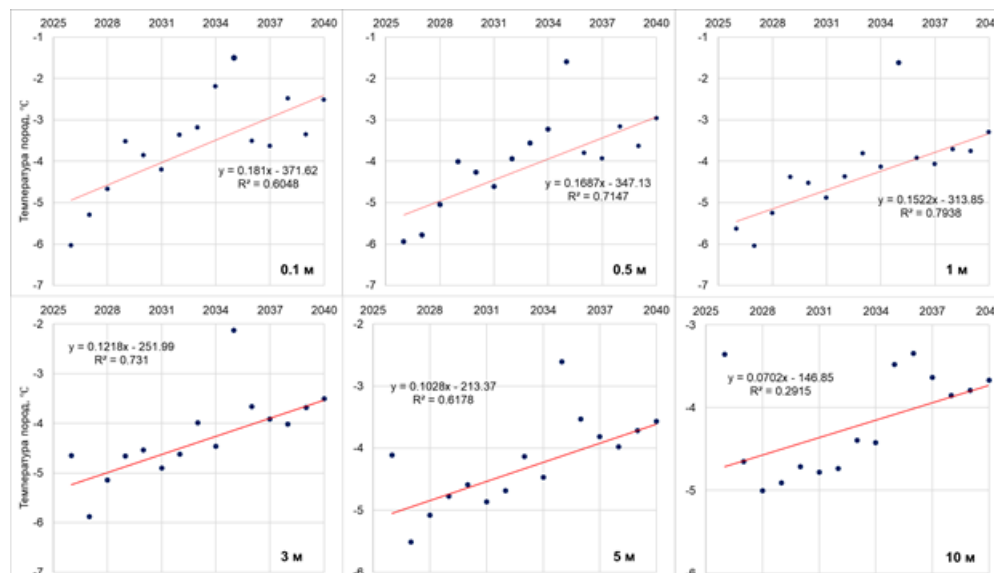


Рис. 7. Изменение средней годовой температуры пород на различных глубинах по данным климатической модели и модели GIPL2.0, скважина Перевал Кулу.

Выводы

В последние десятилетия в России отмечаются признаки повышения температуры многолетнемерзлых пород, что усиливает вероятность развития опасных геокриологических процессов. Поскольку натурные данные сети государственного мониторинга температуры пород в зоне мерзлоты для ученых пока недоступны, важным методом исследования и прогноза состояния мерзлоты является математическое моделирование.

Для двух репрезентативных объектов в горной криолитозоне Северо-Востока проведены: параметризация геокриологической модели GIPL2.0, ее верификация до глубины 10 м, моделирование и прогноз изменения температуры горных пород до 2040 г. В работе использованы уникальные данные наблюдений, полученные с термометрических скважин региональной геокриологической сети мониторинга Магаданской области в горной части бассейна р. Колымы.

Анализ адекватности воспроизведения температуры пород моделью GIPL2.0 по материалам двух скважин показал, что результаты расчета можно принять удовлетворительными, но только до глубины 5 м. Расхождения между результатами моделирования и наблюдаемыми данными являются комплексной проблемой, вызванной совокупностью факторов: несовершенством модели, неточностями в параметризации свойств горных пород, отсутствием информации о литологической неоднородности и влиянием гидрологических процессов.

Выполнен прогноз температуры пород до 2040 г. на двух рассматриваемых скважинах с использованием модели GIPL2.0 и данных климатического прогноза AMIP-LFMIP-rmLC из проекта CMIP6. Согласно климатической модели, прогнозируется постепенное повышение среднегодовой температуры воздуха в верховьях бассейна реки Колымы примерно на 0.9 °C каждые пять лет. Температура пород на обеих скважинах повысится, особенно в приповерхностном слое до глубины 1 м на 2-3 °C. При этом глубина сезонного оттаивания превысит 2 м, что приведет к отступанию верхней границы мерзлоты на скважине Гольцы. Вместе с тем, модель GIPL2.0 адекватно не воспроизвела сроки начала оттаивания и промерзания на скважине Перевал Кулу, из-за чего результаты прогноза глубины деятельного слоя оказались заниженными. Это подчеркивает необходимость использования натурных данных для параметризации и верификации геокриологических моделей в целях повышения точности прогнозов.

Библиография

1. Романовский В. Е., Смит С. Л., Кристиансен Х. Х. Пермафрост термального состояния в полярном Северном полушарии во время Международного полярного года 2007–2009: синтез // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010. Т. 21. С. 106-116. DOI: 10.1002/ppp.689. EDN: NBENET.
2. Гарагуля Л. С., Гордеева Г. И., Оспенников Е. Н. Роль геокриологических процессов в формировании и динамике экосистем криолитозоны // *Криосфера Земли*. 2012. Т. XVI, № 4. С. 31-41. EDN: NVQLGU.
3. Шерстюков А., Шерстюков Б. Пространственные особенности и новые тенденции в

- термических условиях почвы и глубине ее сезонного оттаивания в зоне пермафроста // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. Т. 40. С. 73-78. DOI: 10.3103/S1068373915020016. EDN: UFOVKJ.
4. Хьорт Й., Стрелецкий Д., Дорэ Г., У Wu Q., Бьелла К., Лютто М. Влияние деградации пермафроста на инфраструктуру // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Т. 3. С. 24-38. DOI: 10.1038/s43017-021-00247-8. EDN: JSXFHX.
5. Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О., Стрелецкий Д. А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 12. С. 1228–1239. DOI: 10.31857/S0869-587389121228-1239. EDN: BWVJSZ.
6. Стоцкуте Ю. В., Василевская Л. Н. Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России // Географический вестник. 2016. № 2. С. 85-97. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-2-84-96. EDN: WGBLSB.
7. Павлов А. В. Оценка погрешностей измерений температуры грунтов в неглубоких скважинах в условиях сплошной криолитозоны // Криосфера Земли. 2006. Т. 10, № 4. С. 9-16. EDN: HVUXNZ.
8. Павлов А. В. Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 3. С. 22-27. EDN: JWEIID.
9. Данкерс Р., Берк Е. Дж., Прайс Дж. Моделирование пермафроста и глубины сезонного оттаивания в схеме наземной поверхности JULES // The Cryosphere. 2011. Т. 5. С. 773-790. DOI: 10.5194/tc-5-773-2011. EDN: PHLDIP.
10. Тшумука А. Л., Крими́й А., Фуамба М. Моделирование теплового потока через пермафростную почву, подвергающуюся сезонному замораживанию и оттаиванию // Land. 2022. Т. 11, № 10. С. 1770. DOI: 10.3390/land11101770. EDN: HQTНОС.
11. Филимонов М. Ю., Камнев Ю. К., Шеин А. Н., Ваганова Н. А. Моделирование температурного поля в замерзшей почве под зданиями в городе Салехард с учетом температурного мониторинга // Land. 2022. Т. 11. С. 1102. DOI: 10.3390/land11071102. EDN: TNOUUP.
12. Мачульская Е. Е., Лыков В. Н. Математическое моделирование процессов взаимодействия атмосферы и криолитозоны // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 6. С. 736-753. EDN: GONZBZ.
13. Макарьева О. М., Абрамов Д. А., Землянскова А. А., Осташов А. А., Нестерова Н. В. Температура многолетнемерзлых пород Верхнеколымского нагорья по данным термометрических скважин за 2021–2022 годы // Криосфера Земли. 2024. Т. 28, № 3. С. 19-33. DOI: 10.15372/KZ20240302. EDN: XJQOYL.
14. Макарьева О., Землянскова А., Абрамов Д., Нестерова Н., Осташов А. Геокриологические условия малого горного водосборного бассейна в Верхнеколымском нагорье (Северо-Восточная Азия) // Geosciences. 2024. Т. 14. С. 88.
15. Модель GIPL // CSDMS: The Community Surface Dynamics Modeling System. [Электронный ресурс] URL: <https://csdms.colorado.edu/wiki/Model:GIPL> (дата обращения: 10.06.2025).
16. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Ред. Э. Д. Ершов. М.: Недра, 1989. 515 с.
17. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Хребтовская. Лист Р-55 [Карта] / Санкт-Петербург: ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2007.
18. Банцекина Т. В. Особенности гидротермического режима слоя сезонного протаивания крупнообломочных склоновых отложений в весенне-летний период (на примере Верхнеколымского нагорья): дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.08 / Банцекина

Татьяна Викторовна. – Якутск, 2003. – 137 с. EDN: NMLMBZ.

19. Джафаров Е. Е., Романовский В. Е., Жене Х., МаГуир А. Д., Марченко С. С. Влияние огня на термическую стабильность пермафроста в низменных и высоких черноелочных лесах внутренней Аляски в условиях изменения климата // *Environmental Research Letters*. 2013. Т. 8, № 3. DOI: 10.1088/1748-9326/8/3/035030. EDN: RZNBXZ.

20. Джафаров Е. Е., Николски Д. Дж., Романовский В. Е., Уолш Дж. Е., Панда С. К., Серрезе М. С. Влияние снега: как лучше моделировать температуры поверхности грунта // *Cold Regions Science and Technology*. 2014. Т. 102. С. 63-77. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.02.007. EDN: SKNSCD.

21. Николски Д. Дж., Романовский В. Е., Панда С. К., Марченко С. С., Мускетт Р. Р. Применимость подхода типа экосистемы для моделирования динамики пермафроста по всему Северному склону Аляски // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2017. Т. 122. С. 50-75. DOI: 10.1002/2016JF003852. EDN: YUYGUF.

22. Luo J., Yin G., Niu F., Lin Z., Liu M. Высокая пространственная разрешающая способность моделирования воздействия изменения климата на термические условия пермафроста для бассейна Бейлухе, плато Цинхай-Тибет // *Remote Sensing*. 2019. Т. 11, № 11. С. 1294.

23. Luo D. L., Jin H. J., Marchenko S. S., Romanovsky V. E. Распределение и изменения толщины активного слоя (ALT) и температуры почвы (ТТОР) в источнике реки Желтой с использованием модели GIPL // *Science China: Earth Sciences*. 2014. Т. 57. С. 1834–1845. DOI: 10.1007/s11430-014-4852-1. EDN: UUMFCZ.

24. Джафаров Е. Е., Марченко С. С., Романовский В. Е. Численное моделирование динамики пермафроста на Аляске с использованием набора данных с высокой пространственной разрешающей способностью // *The Cryosphere*. 2012. Т. 6. С. 613-624. DOI: 10.5194/tc-6-613-2012. EDN: PDQHML.

25. WCRP Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6) // WCRP. [Электронный ресурс] URL: <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cmip6-ipsl/> (дата обращения: 10.06.2025).

26. ван ден Хурк Б., Ким Х., Криннер Г., Сеневирагн С. И., Дерксен С., Оки Т., Дувиль Х., Колин Ж., Дюшарн А., Шерю Ф., Вио В., Пума М. Дж., Вада Й., Ли В., Цзя Б., Цампьеры М., Материя С., Лоу Р. М., Шеффилд Дж. LS3MIP (v1.0) вклад в CMIP6: Проект межсравнения моделей наземной поверхности, снега и влаги в почве – цели, настройки и ожидаемые результаты // *Geoscientific Model Development*. 2016. Т. 9. С. 2809–2832. DOI: 10.5194/gmd-9-2809-2016. EDN: XUCPXV.

27. Макарьева О., Нестерова Н., Лебедева Л., Сушанский С. Исследования водного баланса и гидрологии в горном пермафростном водосборе в верховьях рек Колымы, Россия: база данных со станции водного баланса Колымы, 1948–1997 // *Earth System Science Data*. 2018. Т. 10, № 2. С. 689-710. DOI: 10.5194/essd-10-689-2018. EDN: UYBVMO.

28. Шестернев Д. М. Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 266 с.

29. Замолотчикова С. А., Зуев И. А. Юкагино-Ануйский и Колымский регионы // *Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток*. М.: Недра, 1989. С. 293-309.

30. Гаврильев Р. И. Каталог теплофизических свойств горных пород Северо-Востока России. Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова, 2013. 172 с. EDN: TUIJXU.

31. Методы геокриологических исследований / под ред. Э. Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.

32. Роман Л. Т., Царапов М. Н., Котов П. И., Волохов С. С., Мотенко Р. Г., Черкасов А. М., Костоусов А. И. Пособие по определению физико-механических свойств

промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. М.: КДУ, "Университетская книга", 2018. 188 с.

33. Соболев В. Р., Гоман П. Н., Дедюля И. В., Бровка А. Г., Мазуренко О. Н. Тепловые свойства напочвенного материала леса при характерном содержании влаги // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84, № 5. С. 1079–1084. EDN: NYLOCZ.

34. Нэш Дж. Е., Сатклифф Дж. В. Прогнозирование речного потока через концептуальные модели: 1 Обсуждение принципов // Journal of Hydrology. 1970. Т. 10, № 3. С. 282-290.

35. Мельников В. П., Осипов В. И., Брушков А. В., Багина С. В., Садуртдинов М. Р., Дроздов Д. С., Федоров Р. Ю. Прошлое и будущее мониторинга пермафроста: стабильность российской энергетической инфраструктуры // Energies. 2022. Т. 15. С. 3190. DOI: 10.3390/en15093190. EDN: CVFSSD.

36. Чжоу Ф., Яо М., Фан Х., Инь Г., Менг Х., Линь Ц. Доказательства потепления на основе долгосрочных записей климата и пермафроста в глубинной части плато Цинхай-Тибет // Frontiers in Environmental Science. 2022. Т. 10. С. 836085. DOI: 10.3389/fenvs.2022.836085. EDN: RZTVZQ.

Результаты процедуры рецензирования статьи

Рецензия выполнена специалистами [Национального Института Научного Рецензирования](#) по заказу ООО "НБ-Медиа".

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

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

Статья представляет собой законченное научное исследование, посвященное верификации и применению численной геокриологической модели GIPL2.0 для оценки и прогнозирования термического режима многолетнемерзлых пород (ММП) в горных условиях Магаданской области для двух характерных ландшафтов. Стиль статьи научный. Использован адекватный список литературы. Рисунки и таблицы информативны. Аннотация и выводы отражают содержание статьи.

В условиях наблюдаемого изменения климата и деградации мерзлоты, несущей прямые риски для инфраструктуры, разработка и апробация надежных методов прогнозирования состояния ММП являются критически важной научной и практической задачей. Поэтому актуальность выполненной работы не вызывает сомнений.

Научная новизна и практическая ценность заключается в том, что проведено тестирование модели GIPL2.0 на специфичных ландшафтах Северо-Востока России с использованием оригинальных данных мониторинга. Исследование включает полный цикл: от параметризации и верификации модели на ретроспективных данных до построения прогноза на основе климатического сценария. Использование данных с двух термометрических скважин, репрезентативных для разных ландшафтов (гольцовый пояс и лиственничное редколесье), позволяет провести сравнительный анализ и оценить влияние различных условий на результаты моделирования. Авторы не просто представляют результаты, а критически их анализируют, честно указывая на ограничения модели, расхождения с натурными данными и возможные причины ошибок (например, недоучет литологической неоднородности, отсутствие учета конвективного переноса тепла, и т.п.). Полученные прогнозные оценки повышения температуры пород и отступления верхней кровли мерзлоты имеют прямое прикладное значение для планирования строительства, оценки рисков и разработки превентивных мер повышения надежности функционирования инженерных объектов в регионе.

К замечаниям по работе, которые могут быть учтены авторами статьи в дальнейших

исследованиях, следует отнести следующие. Главный недостаток работы, на который справедливо указывают и сами авторы, связан с отсутствием детальных лабораторных данных о теплофизических свойствах пород. Использование справочных данных и номограмм, несмотря на свою вынужденность, вносит существенную неопределенность в расчеты, что особенно заметно на глубинах свыше 5 метров. Ограниченная глубина адекватности модели. Результаты верификации четко показывают, что модель дает удовлетворительные результаты лишь до глубины 5 м. На глубине 10 м значения критерия NS часто оказываются близки к нулю или отрицательны, что ставит под сомнение надежность прогнозных оценок для нижних горизонтов. Существует также проблема с воспроизведением сезонной динамики температурного режима гелиотермозоны. Систематическая задержка моделью сроков оттаивания и промерзания, выявленная в работе, указывает на фундаментальную сложность в точном описании процессов на границе раздела «атмосфера-литосфера». Этот аспект требует более глубокого анализа. Использование климатической модели с шагом сетки 100 км для горного региона, характеризующегося высокой пространственной неоднородностью климатических условий, является существенным ограничением. Это может быть одной из причин расхождений, особенно для прогноза высоты снежного покрова – ключевого фактора для термического режима мерзлоты. При статистической обработке данных, приведенных на рис. 6 и 7 коэффициент корреляции для многих зависимостей близок к 0,5 или даже составляет величину меньше 0,3. Это свидетельствует о слабой корреляции результатов, а для глубины 10,0 м и вовсе о полном ее отсутствии. Авторам необходимо учесть это в дальнейшем.