



МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОРОД НА ПЛОЩАДКЕ КУМЖА В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ПЕЧОРА

✉ *Малкова Г.В.*

Институт криосферы земли ТНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

✉ *galina_malk@mail.ru*

Приведены результаты комплексного геокриологического мониторинга на площадке «Кумжа», расположенной в дельте реки Печора (зона островного распространения мерзлоты, Европейская территория России). Тренд среднегодовой температуры воздуха за последние 30 лет увеличился в три раза по сравнению с периодом климатической нормы и колеблется для разных метеостанций ЕТР от 0,08 до 0,12°C/год. Среднегодовая температура ММП составляет 0...-0,2°C, средний тренд равен 0,02°C/год. Современные климатические изменения приводят к формированию несквозных таликов в высокотемпературных криогенных ландшафтах ЕТР. В программном пакете «Frost 3D Термо» создан цифровой двойник площадки мониторинга. В результате численного моделирования получена трехмерная модель текущего и прогнозного термического состояния пород до глубины 10 м в естественных ландшафтных условиях. Верификация пространственно-временной 3D-модели температурного режима пород показала хорошую сходимость результатов моделирования и непосредственных измерений на площадке мониторинга.

Ключевые слова: *мониторинг, изменение климата, температурный режим ММП, тренды, моделирование, цифровой двойник*

Современные климатические изменения, происходящие на севере ЕТР, как и во всем Арктическом регионе, оказывают существенное влияние на геокриологическую обстановку и создают новые вызовы для объектов инфраструктуры в криолитозоне [Брушков и др., 2022; Мониторинг..., 2024]. Для Европейского севера характерны быстрая субширотная смена природных и геокриологических зон, вертикальная и горизонтальная прерывистость мерзлых толщ, большая пестрота температурных условий в пределах различных ландшафтов или форм рельефа, широкое развитие высокотемпературных участков с температурой многолетнемерзлых пород (ММП) 0...-1°C, распространение в толще мерзлоты линз и горизонтов криопэгов и охлажденных пород, наличие высокольдистых ММП и повторно-жильных льдов, а также широкое распространение криогенных процессов – термоэрозии, пучения, термокарста, солифлюкции [Вечная мерзлота..., 2002].

В силу того, что криолитозона Европейского севера является более высокотемпературной, а мощность мерзлых толщ – меньше, криогенные ландшафты ЕТР оказываются менее устойчивыми по сравнению с другими территориями Российской Арктики [Biskaborn et al., 2019; Malkova et al., 2022; Васильев и др. 2020; Vasiliev et al., 2020]. Результаты многолетнего геокриологического мониторинга свидетельствуют о том, что на Европейском севере вслед за потеплением климата уже началась деградация криогенных ландшафтов – повышение температуры ММП, сокращение яруса годовых теплооборотов и достижение критических значений глубины протаивания, за которыми следует формирование несквозных таликов [Малкова и др., 2023, 2024, 2025; Kaverin et al., 2021].

Изучение термического состояния и распространения ММП в криолитозоне ЕТР на протяжении трех десятилетий осуществляется коллективом сотрудников ИКЗ ТюмНЦ СО РАН на следующих объектах мониторинга, расположенных в разных геокриологических зонах:

- стационар Болванский расположен на III морской равнине в береговой зоне Печорской губы, сплошное распространение ММП;

- стационар Шапкина, расположен в центральной части Большеземельской тундры в пределах V ледово-морской равнины, прерывистое распространение ММП;
- стационар Кашин включает два наблюдательных участка (Кумжа и Кашин) на останцах I и II аллювиально-морских террас в дельте реки Печора, островное распространение ММП.

Подробное описание опорных температурных скважин, имеющих наиболее длительные ряды наблюдений, включая ландшафтные условия, литологический состав и геокриологические характеристики, опубликованы [Kaverin et al., 2021; Malkova et al., 2022; Малкова и др., 2023]. Проведенные исследования свидетельствуют, что в криогенных ландшафтах ЕТР наблюдаются слабые положительные тренды среднегодовой температуры ММП от 0,01 до 0,03°C/год. При среднегодовой температуры ММП 0...-1°C тренды еще более замедляются, поскольку начинаются фазовые переходы в грунтах, тормозящие процесс растепления. Для последнего десятилетия характерно, что в естественных ландшафтах наблюдается существенное увеличение глубины протаивания, уменьшение глубины промерзания и опускание кровли ММП [Малкова и др., 2024, 2025; Шолянская и др., 2023].

В настоящей работе проведена оценка произошедших за последние 30 лет климатических и геокриологических изменений на севере Европейской территории России на основе данных метеостанций, научных публикаций и собственных режимных наблюдений за температурным режимом пород, воздуха и поверхности на площадках мониторинга. В программном пакете «Frost 3D Термо» создан цифровой двойник площадки мониторинга «Кумжа», расположенной в дельте реки Печора, в зоне островного распространения мерзлоты, в криогенных ландшафтах с неустойчивым температурным режимом и температурой ММП 0...-0,2°C. В результате численного моделирования получена трехмерная модель текущего и прогнозного термического состояния пород до глубины 9-10 м в естественных ландшафтных условиях. Цифровой двойник обеспечивает быстрый и удобный доступ к геокриологической информации и визуализацию происходящих изменений.

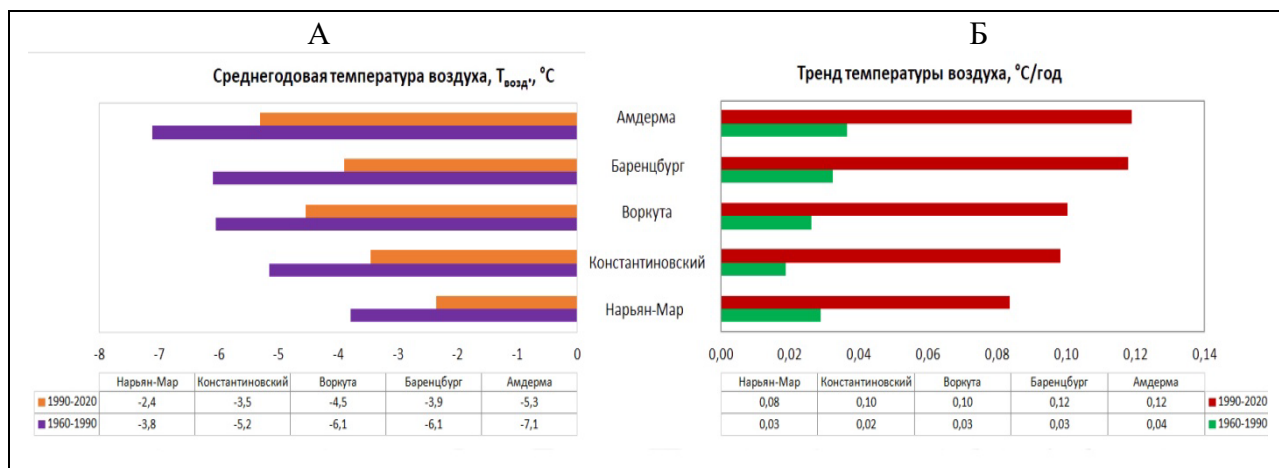


Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха (А) и тренды ее изменения (Б) на метеостанциях Европейского севера.

Изменения климата. Анализ текущих климатических изменений ЕТР за последние десятилетия свидетельствует о повышении среднегодовой температуры воздуха на 1,5...2°C относительно периода климатической нормы (30-летний период 1960-1990 гг.) (рис. 1, А). При этом тренды изменения среднегодовой температуры воздуха в 1990-2020 гг. возросли более чем в три раза по сравнению с тридцатилетним периодом нормы (рис. 1, Б). Следует также отметить, что тренды повышения среднегодовой температуры и температуры зимнего периода в два раза больше, чем в летний период (рис. 2).

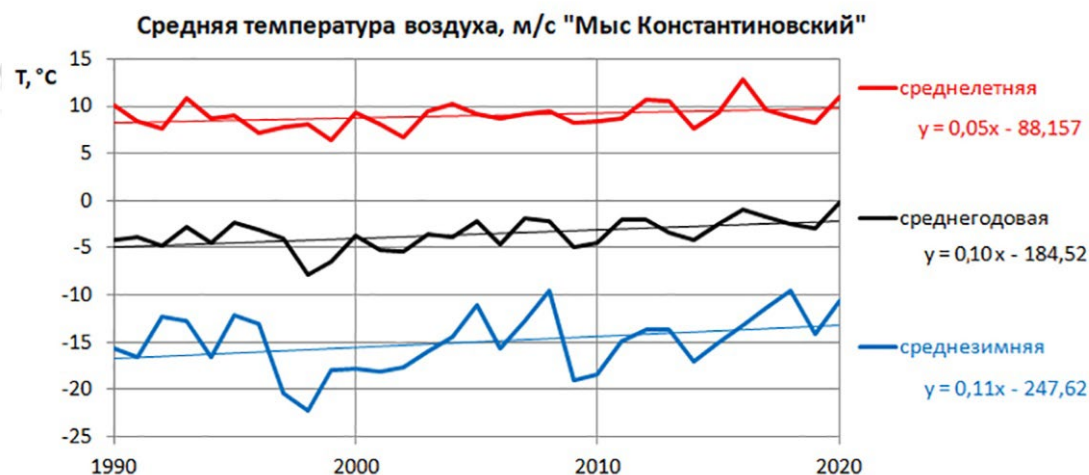


Рис. 2. Изменение среднегодовой, среднелетней и среднезимней температуры воздуха. Метеостанция «Мыс Константиновский».

Амплитуда воздуха варьирует для метеостанций ЕТР от 35°C до 25°C, но ее среднее значение практически не изменилось — в среднем в период климатической нормы амплитуда была равна 32°C, а с 1990 по 2020 гг. равна 31°C. Для современного климата отмечается также увеличение продолжительности теплого периода (дней с положительной температурой воздуха) почти на три недели. Повышение темпов потепления климата отмечается и для других регионов Российской Арктики [Malkova et al, 2022; Vasiliev et al, 2020].

По наблюдениям на пяти метеостанциях ЕТР (см. рис. 1) сумма годового количества осадков увеличилась в среднем с 370 мм до 430 мм по сравнению с периодом климатической нормы. Характер изменения максимальной мощности снега для метеостанции «Мыс Константиновский», ближайшей к объектам мониторинга, расположенной на побережье Печорской губы, показан на рис. 3. Для сравнения на диаграмме приведены данные по метеостанции «Нарьян-Мар», расположенной в 120 км вглубь материка.

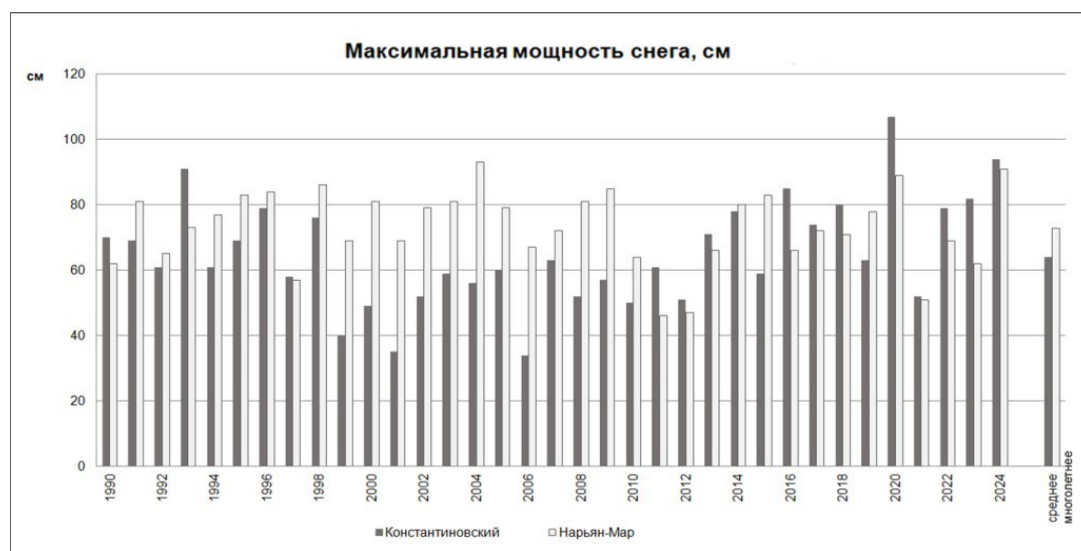


Рис. 3. Максимальная мощность снежного покрова за период 1990-2024 годы.

Среднее многолетнее значение максимальной за год мощности снега для прибрежных районов составляет 64 см, в континентальных районах 73 см. После 2010 года наблюдается постепенное увеличение высоты снежного покрова только на

арктическом побережье ЕТР. В 2020 году максимальная высота снега достигала аномальных 107 см, а в 2024 году 94 см.

Внутригодовой ход изменения среднемесячной высоты снежного покрова по данным метеостанции «Мыс Константиновский» для трех лет наблюдений показан на рис. 4. Продолжительность бесснежного периода составляет около 4 месяцев в году.

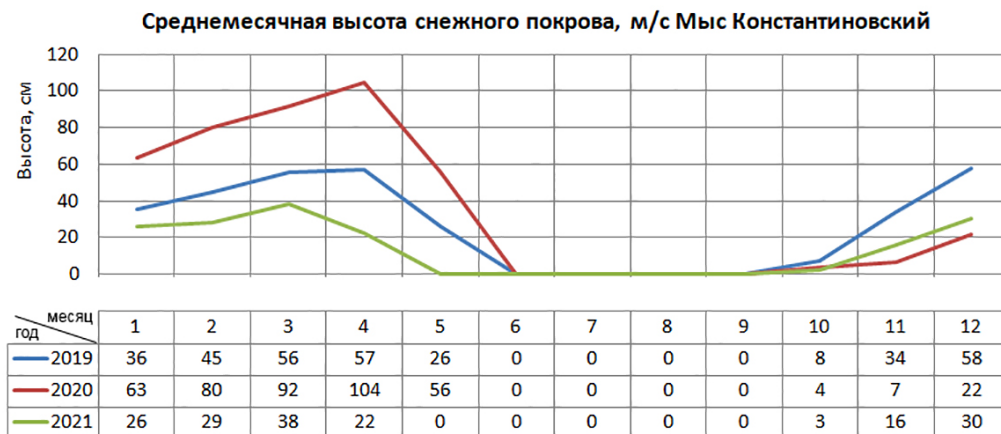


Рис. 4. Среднемесячная высота снежного покрова.

Температурный режим пород на площадке мониторинга. Площадка геокриологического мониторинга «Кумжа» была организована в 2013 году на территории разведанного Кумжинского газоконденсатного месторождения с целью изучения геокриологических условий в области островного распространения ММП и высокотемпературного разреза. Площадка расположена в дельте р. Печоры на останце I аллювиально-морской террасы, занятом преимущественно кустарничково-лишайниковой тундрой (рис. 5, А, Б). Размеры останца составляют 500х600 м, абсолютные отметки поверхности 5...6 м. Поверхностные отложения представлены преимущественно песками с редкими прослоями торфа и суглинка. Наблюдательная площадка с регулярной сеткой пикетов через 10 м организована на относительно не нарушенном техногенезом участке, ее размеры 100х70 м. Наблюдательные скважины 2, 3, и 4 глубиной от 3 до 10 м характеризуют литологический разрез и температурный режим пород в ненарушенных ландшафтных условиях. Скважина 1 расположена в пределах зарастающего карьера рядом с разведывательной скважиной ГКМ и представляет интерес для сравнения температурного режима нарушенных и ненарушенных криогенных ландшафтов. Температурная скважина 5 (глубиной 5 м) оборудована в условиях несквозного талика в талых породах на фрагменте лишайниковой тундры с густым ольховником. Рядом со скважинами организованы специальные площадки для наблюдения за температурой воздуха и поверхности грунта.

В скважинах и на площадках проводятся круглогодичные измерения температуры с помощью автоматизированных логгеров и датчиков, установленных в соответствии с регламентом измерений. За период наблюдений с 2014 г. было установлено, что произошло повышение среднегодовой температуры грунтов на 0,1...0,2°C, и в настоящее время она составляет 0...-0,2°C. С помощью георадиолокационной съемки и сейсмопрофилирования по постоянной сетке профилей установлено, что в пределах площадки происходит неравномерное опускание кровли мерзлоты со средней скоростью 0,25 м/год в зависимости от фациальных условий на поверхности, состава и влажности грунтов [Малкова и др., 2025].



Рис. 5. Местоположение объекта мониторинга «Кумжа» (А); общий вид, схема размещения скважин и контур площадки моделирования (Б).

В скважине 4, пробуренной на участке слабодренированной тундры, на графике термоизоплант видно, что на протяжении пяти последних лет мы наблюдаем существенные изменения в верхней части разреза (рис. 6). Только в наиболее холодный зимний период 2018/2019 гг происходило формирование сливающегося типа мерзлоты. В остальные годы происходит расширение зоны переходной температуры пород от $-0,1$ до $+0,1^{\circ}\text{C}$, что приводит к образованию мерзлоты несливающегося типа. Кровля мерзлоты постепенно погружается, а ярус годовых теплооборотов составляет всего 3-4 м. Но среднегодовая температура ММП на глубине 8 м еще остается отрицательной $-0,1...-0,2^{\circ}\text{C}$. При повышении среднегодовой температуры воздуха, несомненно, будет происходить дальнейшее оттаивание мерзлоты, глубина и площадь таликов будут увеличиваться (рис. 6).

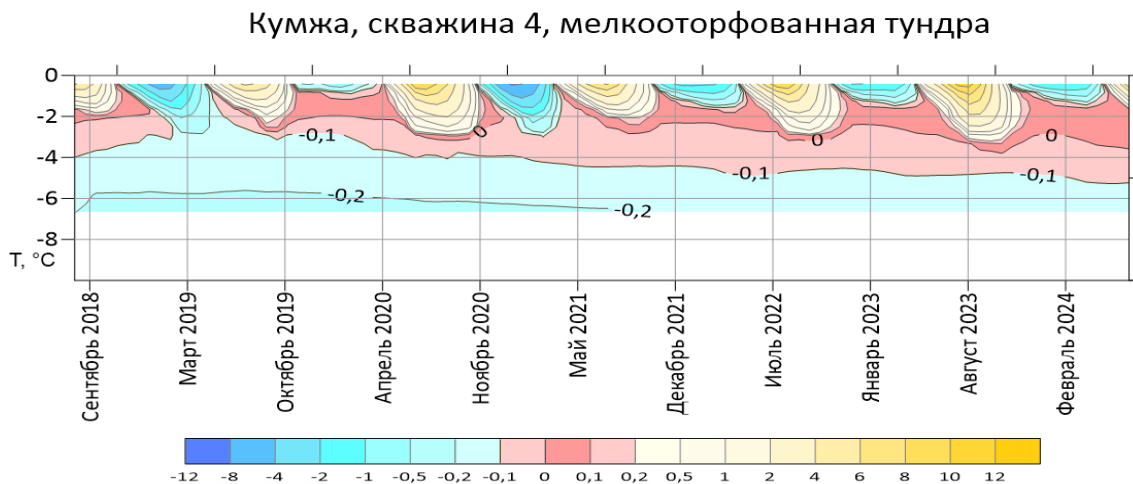


Рис. 6. Динамика температурного режима в скважине 4, площадка «Кумжа».

На талом участке наши температурные измерения показали, что температура пород на глубине 4-5 м в течение года колеблется от $0,1$ до $4,0^{\circ}\text{C}$ и уже не опускается ниже 0°C . Глубина сезонного промерзания в условиях песчаного разреза составляет 2...2,5 м, а зимой 2020/2021 года достигла 3 м. (рис. 7). Для определения глубины талика требуются специальные геофизические исследования или бурение более глубокой скважины.

Цифровой двойник площадки «Кумжа». Площадка геокриологического мониторинга «Кумжа» была выбрана в качестве первого полигона для создания цифрового двойника в программном пакете «Frost 3D Термо», обеспечивающем моделирование теплофизических процессов в грунтовом массиве.

Для моделирования в программе «Frost 3D Термо» необходимы следующие параметры:

- климатические данные с учетом выбранной периодичности;
- состав и теплофизические свойства грунтов, слагающих изученный разрез в пределах площадки;
- начальное распределение температуры на поверхности и в скважинах на разных глубинах;
- граничные условия, принятые для трехмерной модели.

Кумжа, скважина 5, дренированная лишайниковая тундра с ольховником

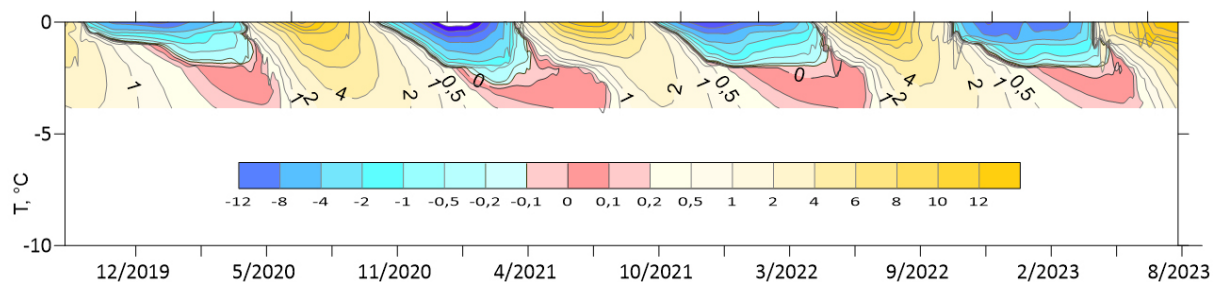


Рис. 7. Динамика температурного режима в скважине 5, площадка «Кумжа».

В модельных расчетах использовались климатические параметры для периода 2019-2030 гг., таким образом, они охватывали шесть лет собственных наблюдений на площадке «Кумжа» (2019-2024) и шесть лет прогнозных изменений (2025-2030), происходящих при продолжающемся потеплении климата, принятом аналогично первому периоду. За начало расчетов 2019 год был выбран вследствие того, что с 2019 по 2024 гг. климатические условия были весьма неоднородные: на фоне общего тренда потепления наблюдались как аномально теплые сезоны, так и относительно холодные (рис. 8). Мощность снега также была не одинаковой, но именно 2019 год соответствовал средним многолетним показателям (см. рис. 3, 4). При отсутствии собственных метеорологических данных использовались параметры, полученные на ближайшей метеостанции «Мыс Константиновский».

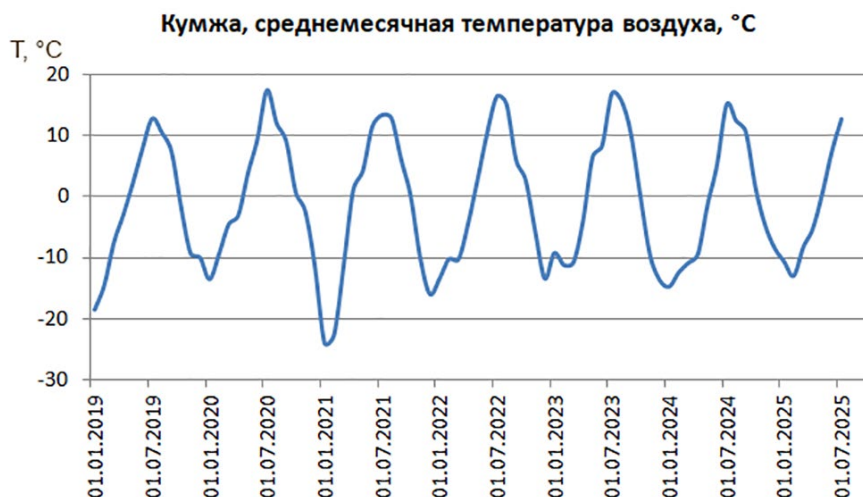


Рис. 8 Среднемесячная температура воздуха на площадке «Кумжа», используемая в моделировании.

При создании цифрового двойника использовались реальные объекты – скважины с их привязкой в пространстве и геологические слои, чередующиеся в разрезе скважины. Начальное распределение температуры в грунте задавалось для каждой скважины отдельно на начало 2019 г. (среднемесячная температура поверхности грунта и вниз по

разрезу скважины). Теплофизические свойства каждого литологического типа пород, которые потом использовались при моделировании, выбирались из общей базы данных программы Frost 3D, с учетом реальных характеристик геологических слоев, описанных в скважинах на площадке.

После создания 3D-модели площадки задавались граничные условия, проводилась дискретизация расчетной области (построение расчетной сетки) и выполнялся расчет модели с трехмерной визуализацией тепловых полей, графиков и разрезов изменения температуры пород в любой точке модели и на любую дату в заданный период моделирования текущего и прогнозного термического состояния грунтов (рис. 9).

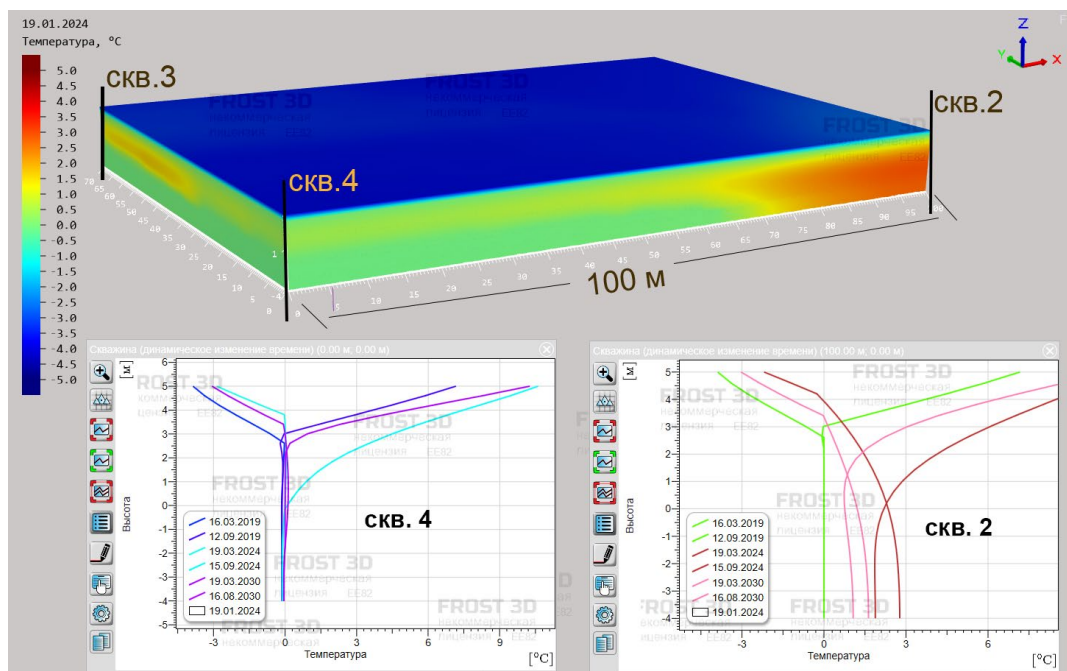


Рис. 9. Визуализация теплофизических расчетов в программе Frost 3D.
Цифровой двойник площадки «Кумжа».

Цифровой геокриологический двойник, созданный в программе Frost 3D Термо, обеспечивает быстрый и удобный доступ ко всей информации в пределах площадки мониторинга.

По модельным расчетам для конца зимнего периода (март) установлено:

- С 2019 по 2024 г глубина промерзания сократилась в обеих скважинах с 2,5 м до 1,5 м и еще несущественно сократится к 2030 г.
- С 2019 по 2024 г температура ММП глубже деятельного слоя и до глубины около 5 м в скважине 4 будет близкой к 0°C, ниже по разрезу составит -0,2°C, а в скважине 2 ниже СМС температура пород положительная и колеблется в интервале 0...+1,5°C.
- К 2030 г в скважине 4 сформируется непромерзающий зимой горизонт до глубины 6 м от поверхности, ниже сохранятся ММП с температурой около -0,1°C.
- К 2030 г в скважине 2 в пределах изученного разреза мерзлота отсутствует, а температура пород продолжит повышаться.

По модельным расчетам для конца летнего периода (август) установлено:

- С 2019 по 2024 г в скважине 4 и скважине 2 мощность деятельного слоя увеличилась, глубина потенциального протаивания стала больше СМС, образовавшегося в зимний период. В скважине 4 кровля ММП продолжает опускаться. В скважине 2 ММП отсутствуют на всю глубину изученного разреза.
- К 2030 г в скважине 4 сформируется несквозной талик в интервале глубин 3-7 м от поверхности, ниже сохранятся мерзлые породы с температурой 0...-0,1°C.

- К 2030 г в скважине 2 в пределах изученного разреза мерзлота отсутствует, а температура пород положительная.

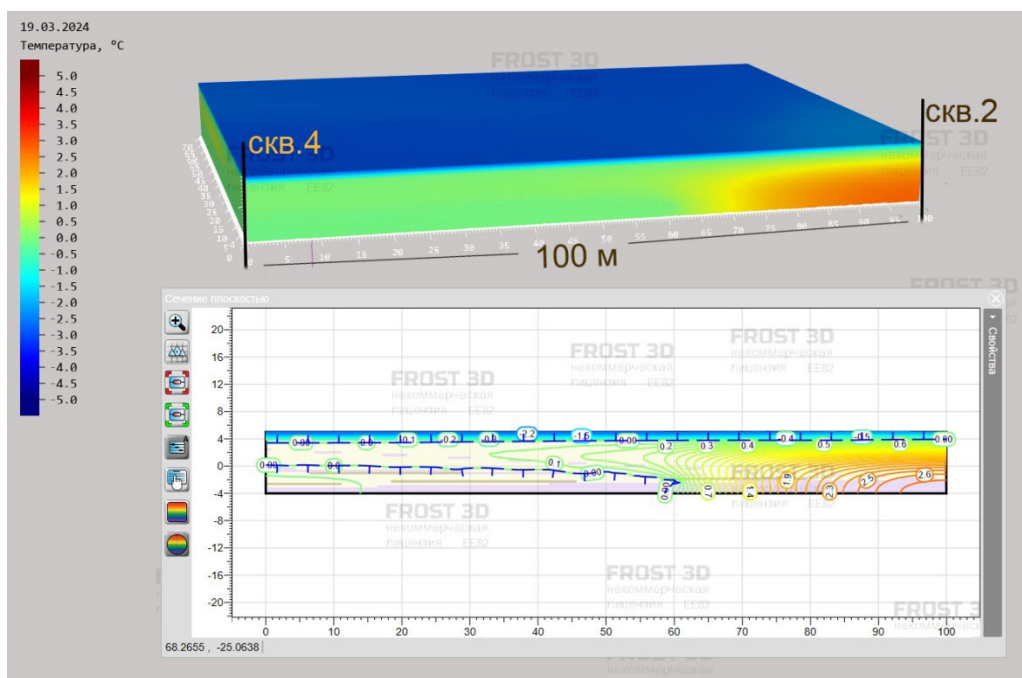


Рис. 10. Построение геокриологического разреза в программе Frost 3D.
Цифровой двойник площадки «Кумжа».

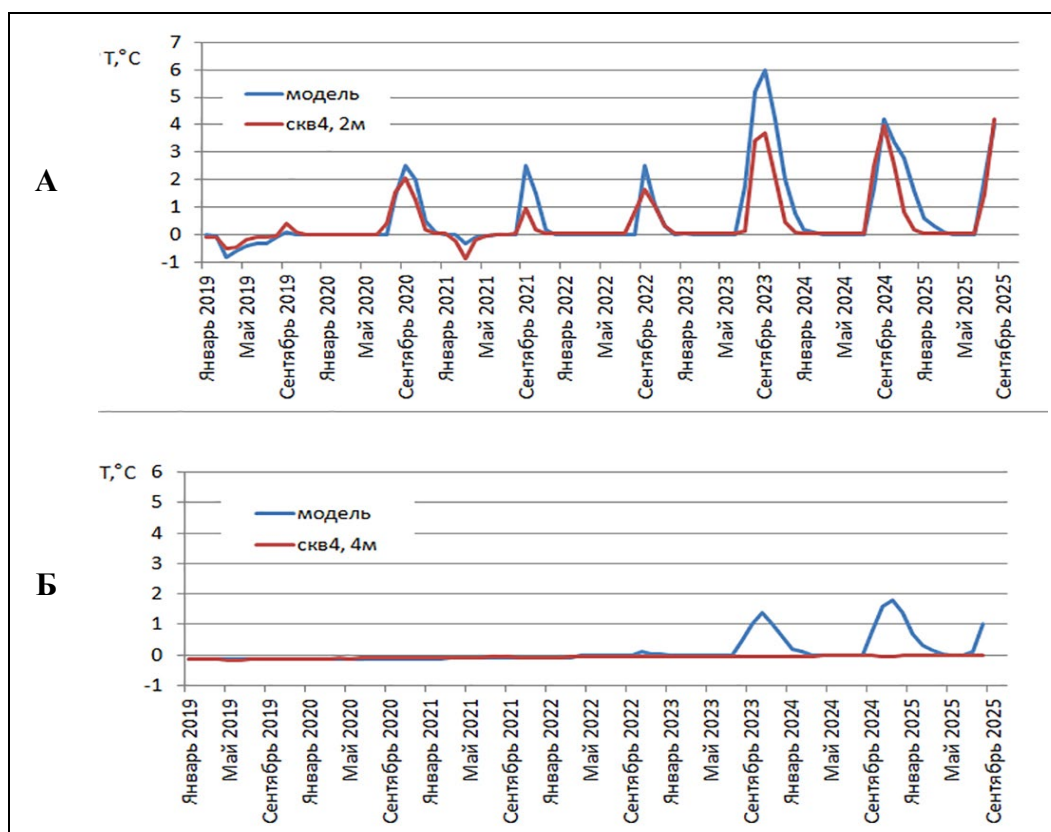


Рис. 11. Динамика изменения температуры пород по результатам измерений и модельным расчетам. Площадка «Кумжа», скважина 4: А – на глубине 2 м; Б – на глубине 4 м

Созданная модель площадки позволяет также, кроме визуализации трехмерных полей пространственно-временного изменения температуры пород, проследить в любом заданном разрезе изменение во времени глубины сезонного протаивания/промерзания

пород и мощности несквозных таликов. В нашем случае для отображения границы между талыми и мерзлыми породами бергштрихами синего цвета показана заданная температура 0°C. Остальные изолинии показаны разным цветом в соответствии с легендой (рис. 10).

Верификация пространственно-временной 3D-модели температурного режима пород осуществлялась для локальных участков температурных скважин 4 и 2. Была получена хорошая сходимости и синхронный ход графиков по результатам моделирования и непосредственных измерений температуры в скважинах на разных глубинах (рис. 11). Некоторые расхождения требуют дополнительного анализа и получения новых данных мониторинга.

Выводы. Выполненное в программе «Frost 3D Термо» моделирование показало, что цифровой двойник площадки «Кумжа» сочетает в себе результаты многолетних наблюдений и инновационные технологии для управления рисками в условиях деградации мерзлоты, что позволяет оперативно выполнять:

- моделирование и прогноз трехмерных полей пространственно-временного изменения температуры пород;
- моделирование и визуализацию начала формирования несквозных таликов и скорости деградации мерзлоты;
- пространственно-временное моделирование и визуализацию сроков формирования СТС/СМС, перелетков и горизонтов нессливающейся мерзлоты.

Результаты моделирования были представлены на VII Всероссийской конференции с международным участием «Цифровые технологии будущего — современные решения в науках о Земле. ITES-2025», проходившей 22-26 сентября 2025 года в г. Владивосток [Малкова и др. 2025].

Финансирование и благодарности. Исследования выполнены в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FWRZ-2021-00012), проект IX.133.1.1. «Изучение формирования, структуры, изменчивости и прогнозирования состояния криосферы, в том числе многолетнемерзлых толщ и криогенных ландшафтов».

Благодарим компанию «Simmakers» за предоставление для некоммерческого использования полного комплекта программ Frost 3D, профессиональные инструкции и оказанные консультации.

ЛИТЕРАТУРА

Брушков А. В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Осокин А.Б., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Малкова Г.В. Структура и параметры геокриологического мониторинга // Научный вестник Арктики. 2022. № 12. С. 78–88. doi: 10.52978/25421220_2022_12_78-88

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. 24. № 2. С. 15–30. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)

Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов. М., ГЕОС, 2002. 400 с.

Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М. Деградация мерзлоты Европейской территории Российской Арктики: результаты многолетнего геокриологического мониторинга // Фундаменты, издательство Международная ассоциация фундаментостроителей IAFC (Москва). 2024. № 1. С. 52–59.

Малкова Г.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Коростелев Ю.В., Царев А.М. Фоновый мониторинг температурного режима и распространения многолетнемерзлых пород Европейского Севера в условиях современного климатического потепления / Сборник докладов Всерос. научно-практ. конференции с междунар. участием «К познанию цельного образа криосферы Земли», 29-30 ноября 2023 г. Тюмень. С. 13–20.

Малкова Г.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Коростелев Ю.В., Царев А.М., Давыденко С.Ю., Судакова М.С. Цифровой двойник площадки геокриологического мониторинга «Кумжа», расположенной в дельте реки Печора // Цифровые технологии будущего — современные решения в науках о Земле. ITES-2025: Материалы VII Всероссийской конференции с международным участием, Владивосток, 22-26 сентября 2025 г. Владивосток: Изд-во Дальневосточного федерального ун-та, 2025. С. 51-52.

Мониторинг вечной мерзлоты. М.: Академический проект, 2024. 468 с. doi: 10.61828/9785829142780-2024-1-468

Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Криолитозона западного сектора Российского Севера в условиях меняющегося климата // Геориск. 2023. Том XVII. № 2. С. 24-38. doi:10.25296/1997-8669-2023-17-2-24-38

Biskaborn B.K., Smith S.L., Vieira G., Streletskiy D.A., Romanovsky V.E., Drozdov D., Malkova G., Vasiliev A. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10, 264 doi:10.1038/s41467-018-08240-4

Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D., Shiklomanov N., Pastukhov A., Novakovskiy A., Sadurtdinov M., Skvortsov A., Tsarev A., Pochikalov A., Malitsky S., Kraev G. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North // Polar Geography. 2021. Vol. 44. Is. 3. P. 203-216. doi: 10.1080/1088937X.2021.1981476

Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K. et al. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // Energies. 2022. Vol. 15, 2311. doi:10.3390/en15072311

Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.E., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15. Is. 4, 45001. doi:10.1088/1748-9326/ab6f12

MONITORING, MODELING, AND FORECASTING OF SPATIOTEMPORAL VARIATIONS IN ROCK TEMPERATURES AT THE KUMZHA SITE IN THE PECHORA RIVER DELTA

Malkova G.V.

Earth Cryosphere Institute of Tyumen Research Centre SB RAS, Tyumen, Russia,,

The results of geocryological observations at the Kumzha monitoring site located in the Pechora River delta (permafrost island zone, ETR) are presented. The trend of average annual air temperature over the past 30 years has increased threefold compared to the period of the climatic norm and varies from 0.08 to 0.12°C/year for different weather stations in the ETR. The trend of the average annual permafrost temperature does not exceed 0.02°C/year, intra-year thermal variations are mostly dampened in the active layer at depths of 2...3 m, and the average annual temperature of permafrost varies from 0 to -0.2°C. A digital twin of the monitoring site has been created in the Software package «Frost 3D Thermo», providing quick and convenient access to geocryological information and visualization of ongoing changes. As a result of numerical modeling, a 3D-model of the current and predicted thermal condition of permafrost up to 10 m depth was obtained in natural landscape conditions. Verification of the spatial-temporal 3D-model of the permafrost temperature regime showed good convergence of the simulation results and direct measurements in temperature wells at the monitoring site.

Keywords: *monitoring, climate change, temperature regime, trends, modeling, digital twin*

REFERENCE:

Biskaborn B.K., Smith S.L., Vieira G., Streletskiy D.A., Romanovsky V.E., Drozdov D., Malkova G., Vasiliev A. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10, 264 doi:10.1038/s41467-018-08240-4

Brushkov A. V., Drozdov D. S., Dubrovin V. A., Zheleznyak M. N., Osokin A. B., Sadurtdinov M. R., Sergeev D. O., Malkova G. V. Structure and Parameters of Geocryological Monitoring // Scientific Bulletin of the Arctic. 2022. № 12. P. 78–88. doi: 10.52978/25421220_2022_12_78-88

Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D., Shiklomanov N., Pastukhov A., Novakovskiy A., Sadurtdinov M., Skvortsov A., Tsarev A., Pochikalov A., Malitsky S., Kraev G. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North // *Polar Geography*. 2021. Vol. 44. Is. 3. P. 203-216. doi: 10.1080/1088937X.2021.1981476

Malkova G. V., Korostelev Yu. V., Sadurtdinov M. R., Skvortsov A. G., Tsarev A. M. Permafrost Degradation in the European Territory of the Russian Arctic: Results of Long-Term Geocryological Monitoring." Foundations, International Association of Foundation Builders (IAFC), Moscow, 2024. No. 1. P. 52–59. (in Russian).

Malkova G. V., Sadurtdinov M. R., Skvortsov A. G., Korostelev Yu. V., Tsarev A. M. "Background Monitoring of Temperature Regime and Distribution of Permafrost in the European North Under Current Climate Warming." In: *Toward a Holistic Understanding of the Earth's Cryosphere: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*, Tyumen, November 29–30, 2023, pp. 13–20. (in Russian).

Malkova G. V., Sadurtdinov M. R., Skvortsov A. G., Korostelev Yu. V., Tsarev A. M., Davydenko S. Yu., Sudakova M. S. Digital Twin of the Geocryological Monitoring Site 'Kumzha' Located in the Pechora River Delta. In: *Digital Technologies of the Future — Modern Solutions in Earth Sciences. ITES-2025: Proceedings of the VII All-Russian Conference with International Participation*, Vladivostok, September 22–26, 2025. Compiled by A. A. Streltsova. Vladivostok: Far Eastern Federal University Press, 2025. P. 51–52.

Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K. et al. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // *Energies*. 2022. Vol. 15, 2311. doi:10.3390/en15072311

Permafrost and Development of Oil and Gas Regions. Moscow: GEOS, 2002. 400 p. (in Russian).

Permafrost Monitoring. Moscow: Academic Project, 2024. 468 p. doi: 10.61828/9785829142780-2024-1-468. (in Russian)

Shpolyanskaya N. A., Osadchaya G. G., Malkova G. V. Cryolithozone of the Western Sector of the Russian North Under Changing Climate Conditions // *Georisk*. 2023. Vol. XVII, No. 2. P. 24–38. (in Russian).

Vasiliev A. A., Gravis A. G., Gubarkov A. A., Drozdov D. S., Korostelev Yu. V., Malkova G. V., Oblogov G. E., Ponomareva O. E., Sadurtdinov M. R., Streletskaya I. D., Stretsky D. A., Ustinova E. V., Shirokov R. S. Permafrost Degradation: Results of Long-Term Geocryological Monitoring in the Western Sector of the Russian Arctic // *Earth's Cryosphere*. 2020. Vol. 24. No. 2. P. 15–30. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)

Vasiliev A. A., Drozdov D. S., Gravis A. G., Malkova G. V., Nyland K. E., Streletskiy D. A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15. Is. 4, 45001. doi:10.1088/1748-9326/ab6f12