

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-520-530



ФОНОВЫЙ МОНИТОРИНГ КРИОЛИТОЗОНЫ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ, ИНТЕРПОЛЯЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПРОГНОЗ

✉ Дроздов Д.С.^{1 2}, Малкова Г.В.¹, Васильев А.А.¹, Пономарева О.Е.^{1 2}, Гравис А.Г.^{1 2}, Бердников Н.М.¹, Губарьков А.А.¹, Коростелёв Ю.В.¹, Устинова Е.В.¹

¹ Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень, Россия

² Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ), Москва, Россия

✉ ds_drozdov@mail.ru

Закономерности распределения температуры пород контролируются региональными, секторальными и местными климатическими ландшафтными и геологическими условиями. Во времени они аналогичны трендам температуры воздуха, но повсеместно имеют меньшие скорости. Температурные различия между криогенными ландшафтами в области сплошного и прерывистого распространения мерзлоты сократились, а в области островного распространения – практически отсутствуют. Наличие в мерзлых грунтах льда и связанные с ним фазовые процессы повышает инертность криолитозоны к тепловым изменениям. По прогнозным оценкам, выполненным для полуострова Ямал, к 2050 г. произойдет существенная перестройка термического состояния вечной мерзлоты, причём она будет не одинакова в разных ландшафтах.

Ключевые слова: мониторинг криолитозоны, среднегодовая температура воздуха и мерзлых пород, потепление климата, мониторинг и прогноз изменения температуры пород, деградация мерзлоты, ландшафтные различия

Введение. В последние десятилетия проблема деградации мерзлоты при потеплении климата в Арктике стала приоритетной. Мерзлота играет важную роль в глобальных изменениях климата, балансе парниковых газов, изменениях арктических экосистем и условий природопользования в арктических регионах [Biskaborn et al., 2019]. Особенностью современных изменений глобального климата является потепление конца XX–начала XXI вв., отмеченное со второй половины 1970-х гг. Согласно данным Рабочей группы по объединенным моделям (WGCM) Всемирной Программы исследования климата (WCRP), средняя скорость потепления для земного шара составляет 0,166 °C/10 лет за 1976–2019 гг. и 0,075 °C/10 лет за 1901–2019 гг., причем, наиболее значительные изменения климата происходят в области высоких широт Северного полушария. Натурные данные свидетельствуют о потеплении климата и повышении температуры мерзлых грунтов в северных регионах криолитозоны. В западном секторе Российской Арктики режимные наблюдения подтверждают изменения в мерзлоте – положительный тренд, осложнённый местной ландшафтной вариабельностью [Vasiliev et al., 2020; Malkova et al., 2022].

Под влиянием природных процессов, меняющегося климата, а также при техногенных воздействиях происходят негативные изменения в ландшафтах (геосистемах) криолитозоны. Учёт и даже предотвращение таких явлений возможно при знании закономерностей природных процессов, а также на основе разработки системы сбалансированного развития территорий. Необходимая для решения этих задач информация может быть получена на основе данных геокриологического мониторинга [Брушков и др., 2023].

Продолжительность рядов наблюдений на объектах мониторинга в криолитозоне России достигает 30-40 лет, а на ряде объектов систематические измерения ведутся более 50 лет [Васильев и др., 2020; Малкова и др., 2023; Дроздов и др., 2018]. Работы ведутся, в том числе, в рамках Международной программы по циркумполярному мониторингу деятельного слоя (CALM) и Международного проекта по термическому состоянию вечной мерзлоты (TSP) [Romanovsky, et al., 2019]. Российское участие в них сейчас практически

приостановлено, но внутрироссийские работы продолжаются. На этих материалах до последнего времени базировался фоновый мониторинг мерзлоты на территории России.

В Российской Арктике мониторинг естественных изменений проводится преимущественно на стационарах и площадках периодического обследования, а его результаты экстраполируются и интерполируются в пределах полигонов на ландшафтной (геосистемной) основе или с использованием дистанционных методов. В институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН наблюдения за термическим режимом ММП проводятся, начиная с 70 - 80-х годов XX века, на опорных стационарах западного сектора Российской Арктики в различных геокриологических и природных зонах – от арктической тундры до северной тайги (рис. 1). Стационары и площадки позволяют сравнить особенности широтной, высотной, секторальной и ландшафтной изменчивости геокриологических условий, а многолетние ряды наблюдений позволяют оценить закономерности их временной изменчивости за последние десятилетия.

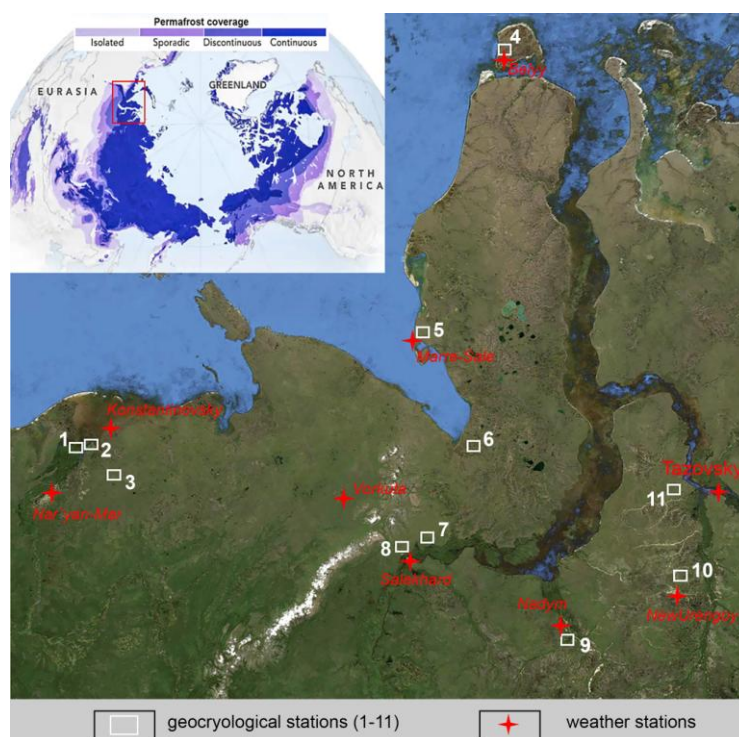


Рис. 1. Схема размещения объектов мониторинга ИКЗ ТюмНЦ СО РАН и опорных метеостанций Росгидромета (красные звездочки)

Объекты мониторинга (геокриологические стационары): 1 – Кашин, 2 – Болванский, 3 – Шапкина, 4 – Белый, 5 – Марре-Сале, 6 – Ерката, 7 – Октябрьский, 8 – Лабытнанги, 9 – Надымский, 10 – Уренгой Южный, 11 – Уренгой Северный.

На территории стационаров функционируют более 10 специализированных площадок по наблюдению за динамикой глубины сезонного протаивания и 78 температурных скважин, расположенных в различных ландшафтных условиях. Подробная характеристика каждого геокриологического стационара приводится в работах [Васильев и др. 2020; Малкова и др., 2022] и в таблице 1. На каждом стационаре в доминантных ландшафтах проводятся круглогодичные наблюдения за температурным режимом пород в скважинах глубиной 10-12 м с помощью автоматизированных регистраторов LPC и НОВО. Точность измерения составляет $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Сезонное протаивание измеряется на площадках по протоколу CALM и на профилях по протоколу инженерно-геокриологической съёмки. В 2018-2019 гг. заложен также ряд новых площадок в северной тайге: «Тарко-Сале», «Нумто», «Ноябрьск».

Данные изменения геокриологических характеристик коррелируются с климатическими характеристиками, полученными на метеостанциях западного сектора Российской Арктики – интернет-сайт свободного доступа <http://meteo.ru/data> и публикации [Второй Оценочный доклад..., 2014; Доклад об особенностях климата..., 2023]. Кроме этого, на каждом геокриологическом стационаре оборудованы собственные режимные площадки для наблюдения за присущим конкретным ландшафтным условиям ходом температуры воздуха и поверхности почвы.

Таблица 1. Характеристика объектов фонового мониторинга в западном секторе Российской Арктики

Номер на рис. 1	Название и координаты	Природная зона	Распространение ММП	Количество скважин и период наблюдений	Площадки CALM и период наблюдений
Европейская территории России					
1	Кашин N 68°14' E 53°51'	Южная тундра	Островное	10 (2012 – наст. время)	R24A и R24B (100×100м), (2010 – наст. время)
2	Болванский N 68°17' E 54°30'	Южная тундра	Сплошное	6 (1983 – наст. время)	R24 (100×100м), (1999 – наст. время)
3	Шапкина N 67°34' E 55°07'	Южная тундра	Прерывистое	4 (1983 – 2019)	-
Север Западной Сибири					
4	Белый N 73°20' E 70°05'	Арктическая тундра	Сплошное	5 (2009 – наст. время)	R55 и R24A (100×100м), (2009 – наст. время)
5	Марре-Сале N 69° 43' E 66° 49'	Типичная тундра	Сплошное	6 (1978 – наст. время)	R3 (1000×1000м), (1995 – наст. время)
6	Еркута N 68°15' E 69°04'	Южная тундра	сплошное	-	R58 (100×100м), (2017 – наст. время)
7	Октябрьский N 66°58' E 67°10'	Лесотундра	Прерывистое	-	R57 (100×100м), (2013 – наст. время)
8	Лабытнанги N 66°40' E 66°24'	Лесотундра	Прерывистое	3 (1967, 1977, 2021)	R56 (100×100м), (2013 – наст. время)
9	Надымский N 65° 18' E 72° 51'	Северная тайга	Островное	15 (1975 – наст. время)	R1A и R1B (100×100м), (1995 – наст. время)
10	Уренгой южный N 66°19' E 76°54'	Лесотундра	Прерывистое	7 (1975 – наст. время)	R50A (100×100м), (2008 – наст. время)
11	Уренгой северный N 67° 28' E 76° 42'	Южная тундра	Сплошное	7 (1975 – наст. время)	R50B (100×100м), (2008 – наст. время)

Общие тенденции изменения климата на территории Европейском севере России и севера Западной Сибири, действительно, оказываются очень схожими: свидетельствуют о потеплении, а различаются только по величине отдельных параметров. В западном секторе обращает на себя внимание тот факт, что в скорости изменения среднегодовой температуры воздуха в конце 1990-х годов наблюдается заметный перелом: отмечается её увеличение относительно климатической нормы в 2-3 и более раз [Малкова и др., 2022].

Важным индикатором климатических изменений, определяющим состояние криолитозоны, является изменение режима и количества атмосферных осадков, в том числе, в зимний период. Преобладает тенденция к увеличению годовых сумм осадков: тренд составляет 1,8% нормы/10 лет. Рост осадков наблюдается во все сезоны, особенно

весной. В последнее десятилетие в западном секторе криолитозоны годовое количество атмосферных осадков возросло в среднем на 50-100 мм по сравнению с периодом нормы. Сохраняется тенденция уменьшения продолжительности присутствия снежного покрова со средним трендом 2 дн./10 лет, при этом наблюдается увеличение максимальной за зиму высоты снежного покрова на большей части страны [Доклад об особенностях климата..., 2023], обуславливая дополнительное отепляющее влияние на мерзлоту. Таким образом, в целом, изменение климатических параметров оказывает негативное влияние на мерзлые породы.

Пространственно-временная изменчивость и мониторинг вечной мерзлоты.

Основными характеристиками ММП являются глубина сезонного протаивания, мощность мерзлых толщ, особенности распространения в плане и в разрезе, температура ММП, льдистость, литологические и теплофизические свойства грунтов, экзогенные геологические процессы. Засоленность часто определяет состояние пород при отрицательных температурах и наличие в толще криопегмов.

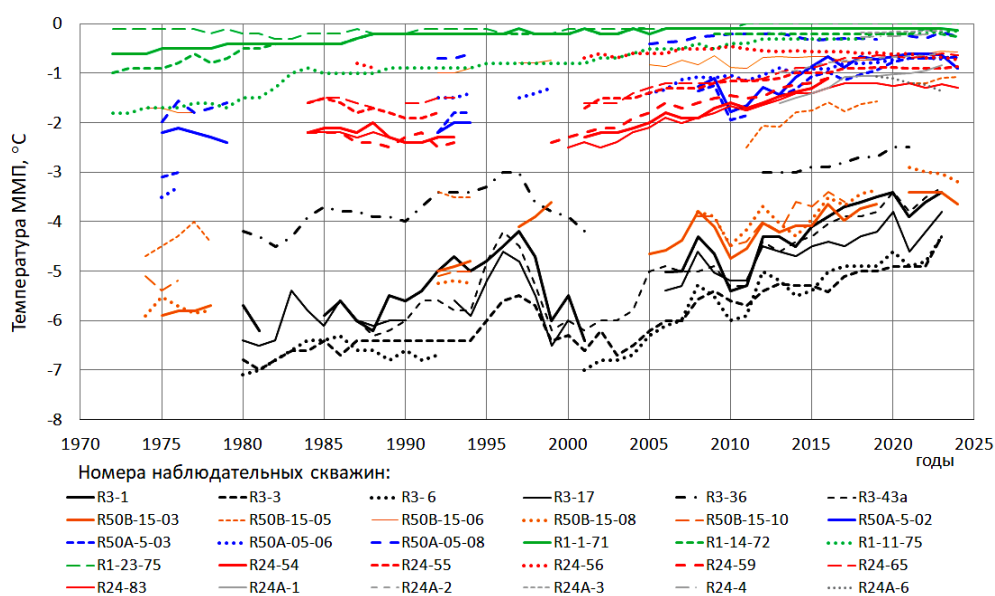


Рис. 2. Изменение среднегодовой температуры ММП по данным геокриологических стационаров в западном секторе Российской Арктики (в номере скважин проставлен индекс площадки CALM).

Общие закономерности распределения температуры пород контролируются региональными и секторальными климатическими факторами, а локальная вариативность — местными ландшафтными и геологическими условиями. Тренды температуры грунтов аналогичны трендам температуры воздуха, но имеют меньшие скорости, которые дополнительно уменьшаются по мере приближения к 0°C. В результате температурные различия между криогенными ландшафтами в области сплошного и прерывистого распространения мерзлоты постепенно сокращаются, а в области островного распространения — практически отсутствуют (рис. 2). В интервале температур ММП 0...-1,5°C положительные тренды замедляются из-за массовых фазовых переходов в грунтах. Иногда тренды сменяются на отрицательные с локальным новообразованием ММП, увеличивая мозаичность мерзлотных условий.

Показательно сопоставление многолетних режимных наблюдений в одинаковых природно-климатических и сходных ландшафтно-морфологических условиях (пологоволнистые равнины в южной тундре) на Европейском севере России и в Западной Сибири. В обоих регионах за прошедшие 30-40 лет наблюдается потепление мерзлоты, однако, среднегодовая температура ММП и ее тренд отличаются в 2-2,5 раза (рис. 3).

Температурные различия однотипных ландшафтных единиц (урочищ) двух регионов, не смотря на их принадлежность к южной тундре, объясняются тем, что ландшафтный облик в наибольшей степени связан с летними условиями, которые в регионах сходны. Но температура мерзлоты определяется, прежде всего, продолжительным зимним периодом, который в Западной Сибири намного суровее. Лишь для аazonальных отепляющих условий (зимнее скопление снега) результаты оказались идентичны [Мониторинг вечной..., 2024]. Таким образом, в условиях потепления климата западносибирские водоразделы всё-таки сохранили низкие температуры пород, а вот склоны из-за комплекса причин начали активно прогреваться.

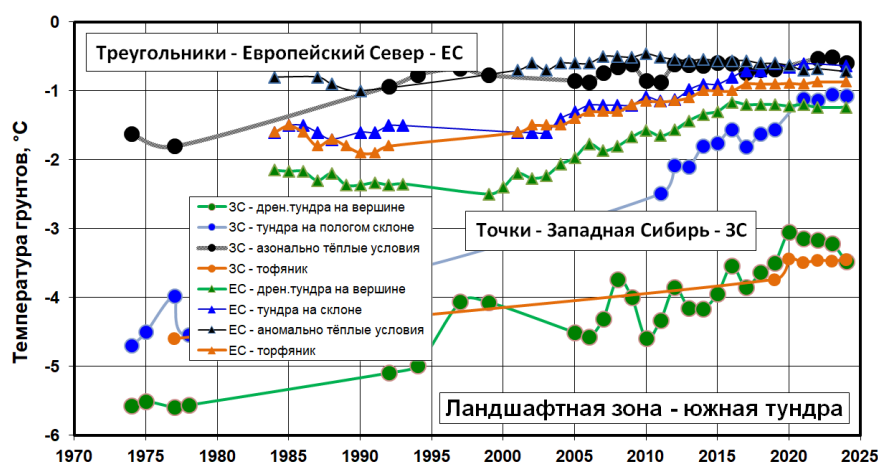


Рис. 3. Повышение температуры ММП в разных ландшафтных условиях южной тундры на Европейском севере и в Западной Сибири.

Мониторинг температуры пород в ограниченном числе наблюдательных скважин (первые десятки) позволяет построить серии временных температурных карт срезов ранее закартированных территорий, где количество съёмочных инженерно-геокриологических скважин измерялось многими сотнями (рис. 4).

Наиболее резко на изменения климата и метеорологические условия отдельных лет реагирует мощность сезонноталого слоя (СТС). По данным ИКЗ ТюмНЦ СО РАН и сайта www.permafrost.su за редким исключением тренды мощности СТС устойчивые положительные для всей криолитозоны РФ (рис. 5).

При этом очень большое значение имеет ландшафтная дифференциация. Во многих ландшафтах формируется зона несливающейся мерзлоты, которая постепенно расширяется. Для примера на рисунке 6 приведены термоизоплеты по скважине, расположенной на вершине миграционного бугра пучения (Надымский стационар). Повышение температуры в верхней части слоя годовых колебаний привело к вытаиванию льдистых пород, образованию понижений на вершине, что способствует дальнейшей деградации мерзлоты с поверхности [Основные результаты..., 2024].

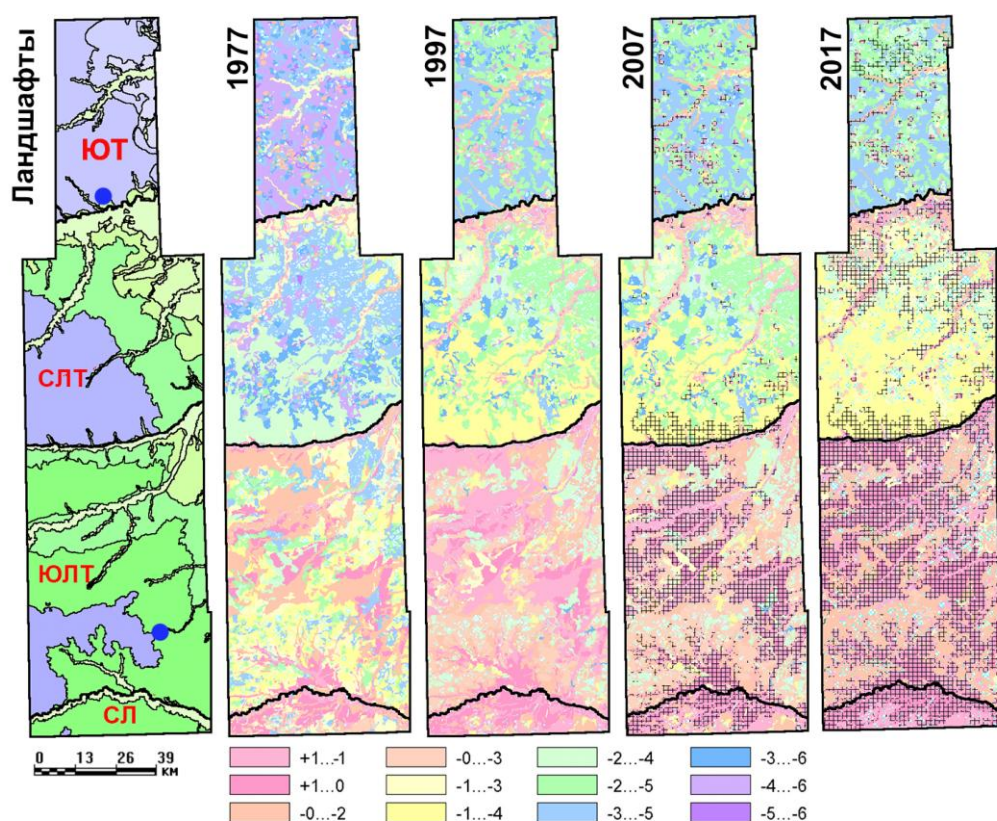


Рис. 4. Образ комплекта температурных ГИС-карт территории Уренгойского месторождения [Дроздов и др., 2018]

Левая колонка – ландшафтные подпровинции и ландшафты; остальные колонки – температура пород по годам; чёрный GRID – площади текущего опускания кровли ММП; синие точки – геокриологические площадки 1974-2024 гг.

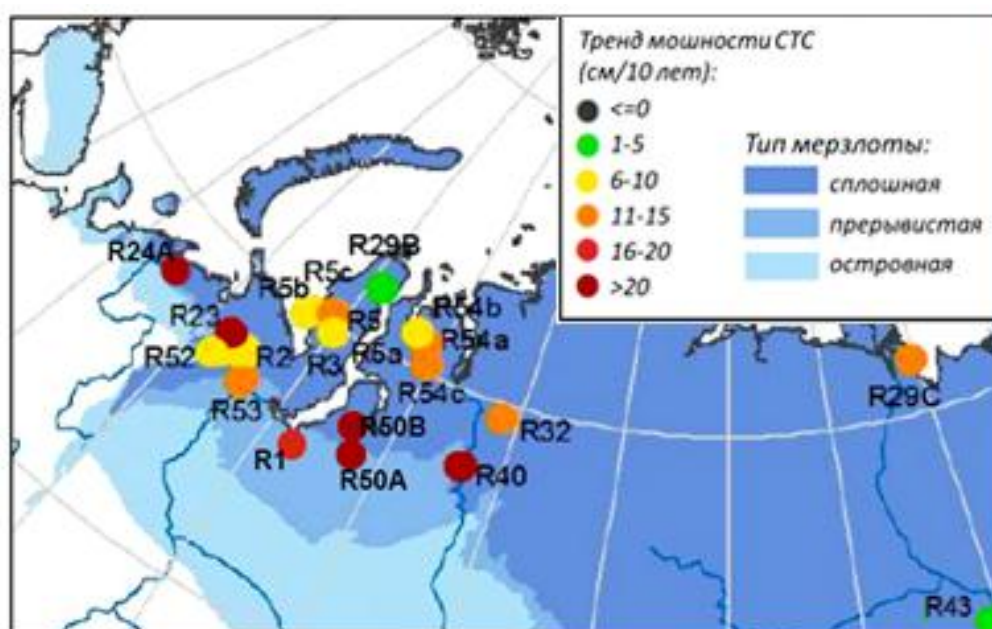


Рис. 5. Тренд мощности СТС на площадках CALM РФ за период с начала наблюдений до 2023 г. [Доклад об особенностях ..., 2023; www.permafrost.su], с дополнениями авторов.

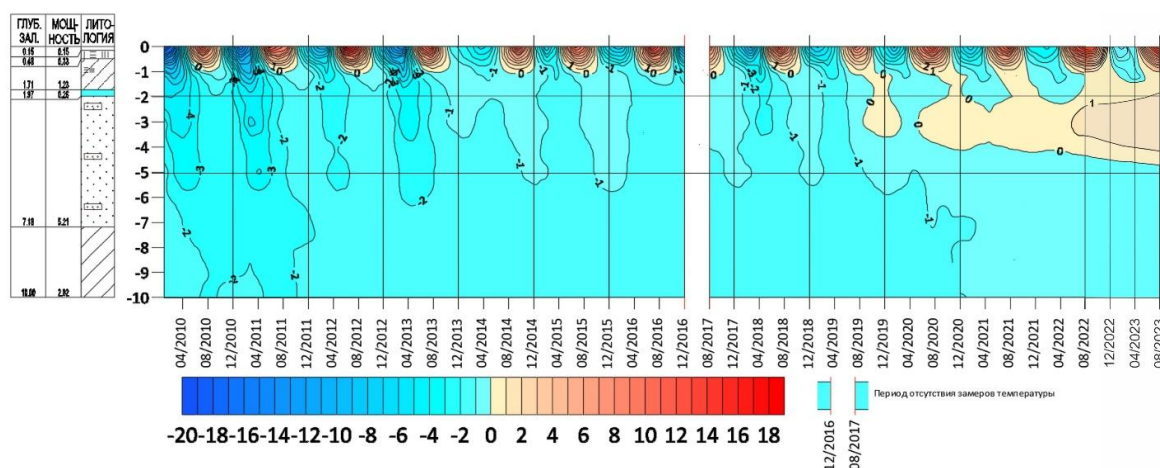


Рис. 6. Термоизоплеты по данным мониторинга температуры в скважине 1-09 (Надымский стационар, северная тайга, островная мерзлота, вершина миграционного бугра пучения).

В XX веке основными объектами мониторинга на Надымском стационаре были профили, ориентированные перпендикулярно оси первой ветки газопровода Надым-Пунга, пересекающие доминантные ландшафты стационара и площадки, организованные для наблюдений за изменением растительного покрова, на которых помимо геоботанических наблюдений определялась глубина протаивания. На всех этих объектах мощность органического слоя была меньше 0,5 м, глубина сезонного протаивания в 1970-90-е годы увеличивалась незначительно и, считалось, что торфяники являются устойчивыми ландшафтами. В настоящее время под влиянием потепления климата глубина сезонного протаивания на всех старых объектах мониторинга ускорилась и достигла более 2 м. Единственным исключением оказалась площадка с торфяным бугром пучения. Здесь протаивание практически не выходит за пределы органического горизонта (1 м торфа), не превышая 0,7-1,20 м (в среднем 0,95 м).

Прогноз изменения температуры пород. Опираясь на общие закономерности изменения температуры ММП и дифференциацию проявления этих закономерностей по типам ландшафтов (геосистем) с их морфологией, растительностью, составом и теплофизическими свойствами грунтов, возможно прогнозирование температуры пород на различные сроки, в том числе экстраполяционными методами [Бердников, 2024]. Поскольку при низких значениях температуры её изменение проходит практически без фазовых процессов, оно идёт быстро. При температурах близких к 0°C включается тормозящий процесс фазовых переходов. Так, в малолдыстых грунтах, преимущественно в песках, перестройка температурного поля может проходить достаточно быстро. Но на участках торфяников при теплоизолирующей роли торфа даже с температурой пород 0...-1°C протаивание верхней 10-метровой толщи может длиться десятки и даже сотни лет.

Дифференциация хорошо проявилась на примере полуострова Ямал, где в XX веке большая часть территории имела среднегодовые температуры ММП ниже -5°C. Для Ямала при среднем тренде температуры воздуха порядка 0,08°C/год получена достаточно контрастная прогнозная схема среднегодовой температуры ММП на 2050 год (рис. 7).

Прогнозная оценка сделана на основе совместного анализа и наложения трех карт – (1) карты температуры ММП (2000 год), (2) прогнозной карты изменения среднегодовой температуры воздуха на 2050 год по среднему сценарию RCP 4.5 на базе ансамбля глобальных климатических моделей, принявших участие в 5-ом оценочном докладе МГЭИК (опубликована на сайте Главной геофизической обсерватории им. Воейкова – www.voeikovmgo.ru), а также (3) карты коэффициента чувствительности ММП к изменению климата [Malkova et al., 2022]. Но сюжетные линии сценариев изменения климата основаны на различных гипотезах, которым не всегда суждено сбыться, поэтому и прогноз термического состояния криолитозоны является гипотетическим.

**ПРОГНОЗНАЯ СХЕМА СРЕДНЕГОДОВОЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПОРОД НА 2050 г.
Масштаб 1: 5 000 000**

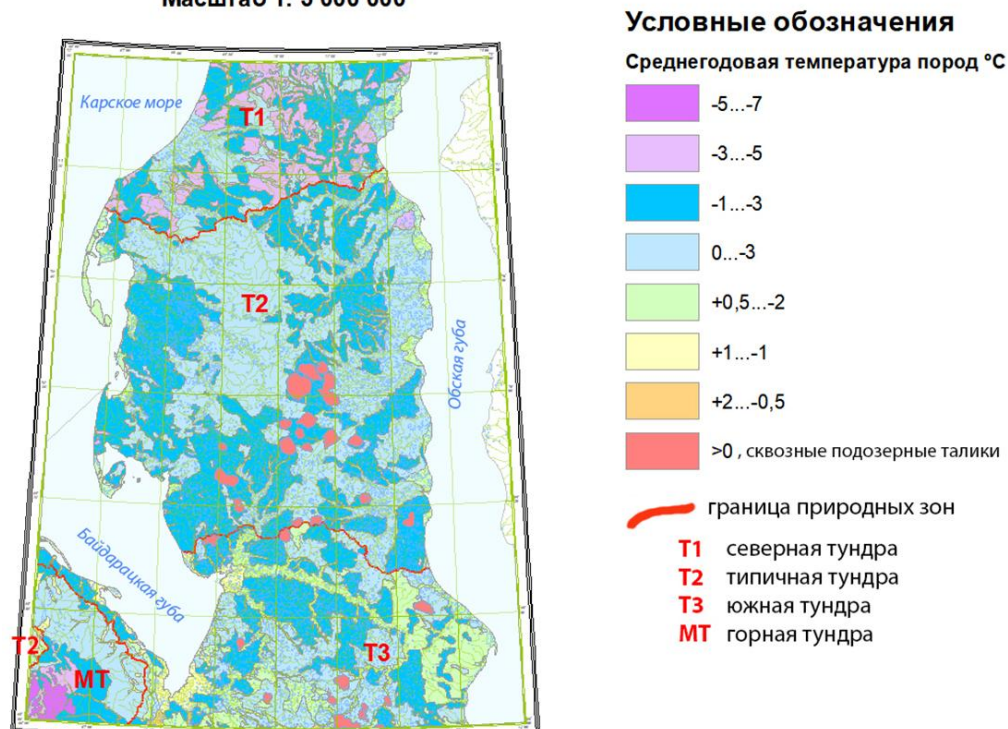


Рис. 7. Прогнозная схема среднегодовой температуры ММП п-ва Ямал на 2050 год.

Прогнозная температура ММП рассчитана по следующей формуле:

$$[Средняя\ температура\ ММП\ 2050] = [Средняя\ температура\ ММП\ 2000] + [Изменение\ температуры\ воздуха\ за\ период\ 2000\div2050] \times [Коэффициент\ чувствительности\ мерзлоты\ к\ изменению\ климата] \times [Дополнительный\ коэффициент].$$

Дополнительный коэффициент учитывает влияние зональности криолитозоны на замедление тренда повышения температуры ММП, по мере ее приближения к нулевым значениям. При расчете дополнительного коэффициента используются эмпирические кривые повышения температуры ММП за последние десятилетия, полученные на полевых стационарах ИКЗ ТюмНЦ СО РАН, а также экспериментально установленная закономерность повышения содержания незамерзшей воды по мере приближения температуры мерзлого грунта к 0°C. Вдоль южной границы вечной мерзлоты господствуют близкие к 0°C температуры ММП и происходит замедление тренда повышения температуры грунтов за счет затрат тепла на фазовые переходы. При значениях температуры ниже -5°C дополнительный коэффициент принят равным 1, и не влияет на прогнозную температуру. При более высоких и околонулевых температурах коэффициент становится меньше единицы. Таким образом, при деградации мерзлоты затраты тепла на фазовые переходы максимальны в южных районах криолитозоны, где наблюдаются значения температуры наиболее близкие к 0 °C. Здесь же характерна наибольшая инерционность в реакции мерзлоты на потепление климата и, соответственно, выбраны наименьшие значения дополнительного коэффициента.

Экспедиционные работы были организованы при поддержке Международного проекта GTN-P, а с 2022 г. выполняются в рамках ГЗ Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FWRZ-2021-00012), проект IX.133.1.1. «Изучение формирования, структуры, изменчивости и прогнозирование состояния криосферы, в том числе многолетнемерзлых толщ и криогенных ландшафтов» при финансовой поддержке Научного центра изучения Арктики (ЯНАО, г. Салехард).

ЛИТЕРАТУРА

Бердников Н.М. Картографическая визуализация ожидаемого изменения южной границы области распространения многолетнемерзлых пород в Западной Сибири // Криосфера Земли. 2024. Т. XXVIII. № 4. С. 3–15. doi: 10.15372/KZ20240401

Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданев О.В., Железняк М.Н., Мельников В.П., Окунев С.Н., Осокин А.Б., Остарков Н.А., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 742-756.

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 геоэкологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 2. С. 15–30. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет. 2014. 60 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. Москва: Росгидромет. 2023. 104 с.

Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Романовский В.Е., Васильев А.А., Брушков А.В., Лейбман М.О., Садуртдинов М.Р., Пономарева О.Е., Пендин В.В., Горобцов Д., Устинова Е.В., Коростелев Ю.В., Стрелецкий Д.А., Слагода Е.А., Скворцов А.Г., Гравис А.Г., Бердников Н.М., Орехов П.Т., Лаухин С.А., Царёв А.М., Фалалаева А.А., Железняк М.Н. Цифровые карты криолитозоны и оценка современных изменений в криолитозоне // «Актуальные проблемы геоэкологии», МГУ, 15-16 мая 2018 г. Т.1. М.: Университетская книга. 2018. С. 295-301.

Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Мельников В.П., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Судакова М.С., Царев А.М. Геоэкологический мониторинг и динамика криогенных геосистем Ненецкого автономного округа / Сборник докладов Шестой конференции геоэкологов России «Мониторинг в криолитозоне», МГУ имени М.В. Ломоносова, 14 - 17 июня 2022 г. С.272-279. doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130.

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 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «К познанию цельного образа криосферы Земли», 29-30 ноября 2023 г. Тюмень. С. 13-20.

Мониторинг вечной мерзлоты / А.В. Брушков, А.Г. Алексеев, Д.С. Дроздов, и др. М.: Академический проект. 2024. 463 с. doi: 10/61828/9785829142780-2024-1-468

Основные результаты мониторинга мощности деятельного слоя на площадках CALM Надымского стационара / Гравис А.Г., Устинова Е.В., Пономарева О.Е. // Вестник МГТУ. Тр. Мурманского гос. технического университета. 2024. Т. 27. № 1. С. 39-51. doi: 10.21443/1560-9278-2024-27-1-39-51

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10, 264 doi:10.1038/s41467-018-08240-4

Malkova G.V., 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. 2311. doi: 10.3390/en15072311

Romanovsky V. E., Smith S. L., Isaksen K. et al., Terrestrial permafrost [in “State of the Climate in 2018”] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2019. Vol. 100. Is. 9. S153–S156. doi:10.1175/2019BAMSSStateoftheClimate.1

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. 045001. doi: 10.1088/1748-9326/ab6f12

www.permafrost.su – сайт «Вечная мерзлота и климат».

www.voeikovmgo.ru – сайте Главной геофизической обсерватории им. Воейкова.

MONITORING OF THE CRYOLITHOZONE: METHODOLOGICAL ISSUES, INTERPOLATION OF RESULTS, FORECAST

Drozdov D.S.^{1 2}, Malkova G.V.¹, Vasilev A.A.¹, Ponomareva O.E.^{1 2}, Gravis A.G.^{1 2}, Berdnikov N.M.¹, Gubarkov A.A.¹, Korostelev Yu.V.¹, Ustinova E.V.¹

¹ Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center SB RAS (ECI Tyumen Scientific Centre SB RAS), Tyumen, Russia,

² Russian State Geological Exploration University (MGRI), Moscow, Russia

The patterns of temperature distribution of permafrost are controlled by regional, sectoral and local climatic landscape and geological conditions, they are similar in time to air temperature trends, but everywhere have lower speeds. Temperature differences between cryogenic landscapes in the area of continuous and intermittent permafrost distribution have decreased, while in the area of island distribution they are practically absent. The presence of ice in frozen soils and associated phase processes increases the inertia of the cryolithozone to thermal changes. According to the forecast estimates made for the Yamal Peninsula, by 2050 there will be a significant restructuring of the thermal state of permafrost, and it will not be the same in different landscapes.

Keywords: *monitoring of the cryolithozone, the average annual temperature of air and permafrost, climate warming, monitoring and forecast of permafrost temperature, permafrost degradation, landscape differences.*

REFERENCES:

Berdnikov N.M. Cartographic visualization of the expected change in the southern permafrost limit in Western Siberia // *Kriosfera Zemli (Cryosphere of the Earth)*. 2024. Vol. XXVIII. No 4. P. 3–15. doi: 10.15372/KZ20240401. (In Russian).

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J. 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., Alekseev A.G., Badina S.V., et al. Experience in the operation of structures and the need to control the thermal regime of soils in the cryolithozone // *Notes of the Mining Institute*. 2023. P. 1-15. (In Russian).

Drozdov D.S., Malkova G.V., Romanovsky V.E. et al. Digital maps of the cryolithozone and assessment of modern changes in the cryolithozone // "Actual problems of geocryology", Moscow State University, May 15-16, 2018. Vol.1. M.: University Book. 2018. P. 295-301. (In Russian).

Malkova G.V., Korostelev Yu.V., Melnikov V.P., Sadurtdinov M.R., Skvortsov A.G., Sudakova M.S., Tsarev A.M. Geocryological monitoring and dynamics of cryogenic geosystems of the Nenets Autonomous Okrug / Collection of reports of the Sixth Conference of geocryologists of Russia "Monitoring in the cryolithozone", Lomonosov Moscow State University, June 14 – 17. 2022. (In Russian).

Malkova G.V., 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. 2311. doi: 10.3390/en15072311

Malkova G.V., Sadurtdinov M.R., Skvortsov A.G., Korostelev Yu.V., Tsarev A.M. Background monitoring of the temperature regime and distribution of permafrost rocks of the European North in conditions of modern climatic warming / Collection of reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Towards the knowledge of the integral image of the Earth's cryosphere", November 29-30. 2023. Tyumen. Pp. 13-20. (In Russian).

Permafrost monitoring / Brushkov A.V., Alexeev A.G., Drozdov D.S. et al. Moscow: Akademicheskii proect. 2024. 463 p. doi: 10/61828/9785829142780-2024-1-468

Romanovsky V. E., Smith S. L., Isaksen K. et al., Terrestrial permafrost [in “State of the Climate in 2018”] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2019. Vol. 100. Is. 9. S153–S156. doi:10.1175/2019BAMSSStateoftheClimate.1

Report on climate peculiarities on the Russian Federation territory for 2022. Moscow: Roshydromet. 2023. 104 pp.

The main results of active layer thickness monitoring on Nadym CALM grounds / Gravis A.G., Ustinova E.V., Ponomareva O.E. // Annals of Murmansk State Technical University. 2024. Vol. 27. No 1. P. 39-51.

The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. – M.: Roshydromet, 2014. - 60 p. Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2022. – Moscow, Roshydromet, 2023. – 104 p. (In Russian).

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. 045001. doi: 10.1088/1748-9326/ab6f12

Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A. and others. Permafrost degradation: results of long-term geocryological monitoring in the western sector of the Russian Arctic // Kriosfera Zemli (Cryosphere of the Earth). 2020. Vol. XXIV. No. 2. P. 15-30 (In Russian).

www.permafrost.su – Permafrost and Climate website

www.voeikovmgo.ru – the website of the Voeykov Main Geophysical Observatory