



ТЕМПЫ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И МЕРЗЛОТЫ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

✉ *Облогов Г.Е., Васильев А.А., Малкова Г.В., Белова Н.Г.*

Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень, Россия

✉ *oblogov@mail.ru*

Представлены количественные оценки современных трендов изменения климатических и геокриологических условий в западном секторе Российской Арктики на основе собственных наблюдений и литературных данных. Показано ускорение темпов потепления воздуха (от 0.07 до 0.13 °C/год и выше) с одновременным увеличением количества осадков (от 1.5 до 5.4 мм/год) и смещением центра потепления в высокоширотную область. В результате климатических изменений происходит значительное потепление мерзлоты со скоростью от 0.02 до 0.09 °C/год, а также увеличивается глубина сезонного протаивания в среднем на 2-3 см/год. На основе фактических данных измерений составлена карта тенденций изменения температуры многолетнемерзлых пород для западного сектора Российской Арктики. Для района Марре-Сале (западное побережье п-ова Ямал) показана динамика изменений среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород в отдельных типах ландшафтов для трех временных интервалов – в 1980-х гг., в 2020-х гг. (настоящее время) и на прогнозный период 2040-х гг. Показана разница интенсивности темпов прогрева пород на различной глубине. Наиболее быстро прогреваются верхние горизонты пород в слое сезонного оттаивания и верхние горизонты мерзлоты. На глубине 10 м темпы прогрева в 1.5-2 раза ниже.

Ключевые слова: Западная Арктика, многолетнемерзлые породы, тренды, изменение климата, Марре-Сале, температура ММП

Мониторинг состояния многолетнемерзлых пород (ММП) является ключевым элементом для оценки и прогнозирования динамики криолитозоны. В настоящее время происходит хорошо фиксируемое глобальное повышение температуры приземного воздуха [*Global Climate Highlights, 2024*]. Соответственно наблюдается и реакция мерзлых толщ на климатические изменения, которая отличается во времени и в разных регионах протекает по-разному. Прогнозные оценки изменений ММП проводятся с использованием климатических моделей и данных мониторинга [*Иванов, Рожин, 2021; Nicolsky, Romanovsky, 2018 и др.*]. Обзор литературы показал, что наблюдается преобладание модельных оценок над фактическими наблюдениями за деградацией ММП и мало реальных наблюдений за изменениями в различных биоклиматических зонах и разных типах ландшафтов. Цель данного исследования состоит в анализе и визуализации фактических данных наблюдений и трендов изменений ключевых климатических параметров (температура воздуха, осадки) и температуры мерзлоты в западном секторе Российской Арктики. Полученные данные могут быть использованы для уточнения и верификации существующих прогностических моделей состояния и динамики деградации ММП.

Для области криолитозоны западного сектора Российской Арктики проанализированы ряды среднегодовых значений температуры воздуха и осадков по ряду метеостанций. Исходные срочные и суточные данные получены из открытых архивов (ВНИИГМИ-МЦД, гр5.ru). Для оценки динамики температуры воздуха и осадков были рассчитаны уравнения линейной регрессии и построены линейные тренды динамики среднегодовой температуры воздуха и осадков за три стандартных 30-летних климатологических периода (1961–1990, 1971–2000, 1991–2020 гг.). Для визуализации и анализа пространственно-временных закономерностей на основе интерполяции рассчитанных значений трендов температуры воздуха были построены оценочные карты (рис. 1).

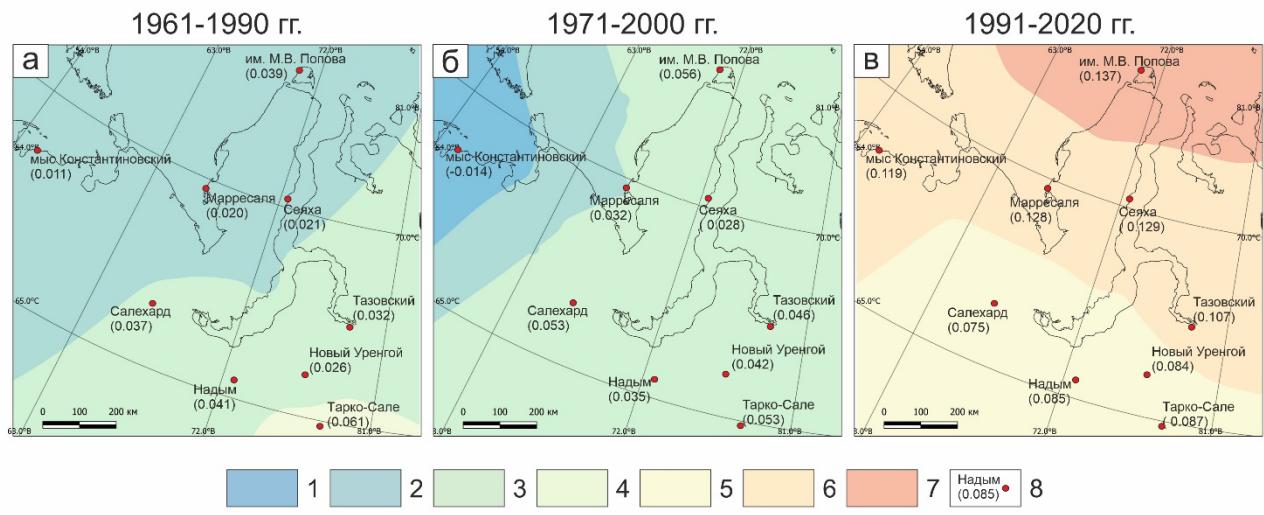


Рис. 1. Динамика изменений среднегодовой температуры воздуха западного сектора Российской Арктики за периоды: а) 1961-1990 гг., б) 1971-2000 гг. в) 1991-2020 гг. 1-7 – градации трендов повышения температуры воздуха, °С/год: 1 – <0.01, 2 – 0.01-0.03, 3 – 0.03-0.05, 4 – 0.05-0.07, 5 – 0.07-0.1, 6 – 0.1-0.13, 7 – >0.13, 8 – ключевые участки измерений климатических параметров (метеостанции) с их названиями и указанием в скобках тренда повышения среднегодовой температуры воздуха в °С/год.

Как видно, наблюдается повсеместное возрастание темпов потепления и существенное пространственное смещение. В современный период (1991–2020 гг.) темпы потепления усилились, а центр климатического потепления сместился в высокоширотную арктическую зону. Увеличение общего количества тепла отражается в росте суммы годовых градусо-дней. Анализ данных показывает, что с начала XXI века увеличение количества тепла происходит преимущественно за счет повышения отрицательной температуры воздуха, то есть в осенне-зимние и весенние периоды.

Наблюдается также увеличение общего годового количества осадков. Рассчитанные тренды за период 1991-2020 гг. составляют от 1.5 до 5.4 мм/год. По сравнению с периодами 1961-1990 и 1971-2000 гг. по всем рассмотренным метеостанциям наблюдается прирост суммы осадков в среднем на 10-12 %.

Для оценки динамики изменений температуры ММП были собраны фактические данные термометрических наблюдений в скважинах по 17 ключевым районам западного сектора Российской Арктики от биоклиматической зоны северной (арктической) тундры до северной тайги. Использованы измерения температуры пород в 45 скважинах, охватывающих основные (доминантные) типы ландшафтов. Регулярность наблюдений сильно варьировалась по участкам и периодам наблюдений. Основной массив данных был собран по участкам геокриологических стационаров ИКЗ ТюмНЦ СО РАН в Марре-Сале (Западный Ямал, типичная тундра), устье р. Печоры (стационар мыс Болванский, Кашин, южная тундра), Уренгое Северном (южная тундра), Уренгое Южном (лесотундра), Надыме (северная тайга). По литературным и архивным данным собраны несистемные, но неоднократные измерения температуры ММП на таких участках, как о. Белый (северная тундра), Харасовэй (северная тундра), Ямбург (южная тундра), Воркута (южная тундра) и другие. Детальные характеристики стационаров ИКЗ ТюмНЦ СО РАН приведены в работе [Малкова и др., 2022; Васильев и др., 2020]. Участки измерения температуры мерзлоты характеризуются неодинаковой обеспеченностью фактическими данными, однако, собранный массив данных позволил выявить основные тенденции реакции криолитозоны севера Западной Сибири на климатические изменения, выраженные в трендах среднегодовой температуры ММП. За среднегодовую температуру ММП принималась температура на глубине 10 м.

По рассчитанным трендам динамики среднегодовой температуры ММП в программном комплексе ГИС QGIS на основе интерполяции значений методом обратно-взвешенных расстояний построена оценочная карта пространственного изменения трендов температуры ММП западного сектора Российской Арктики (рис. 2).

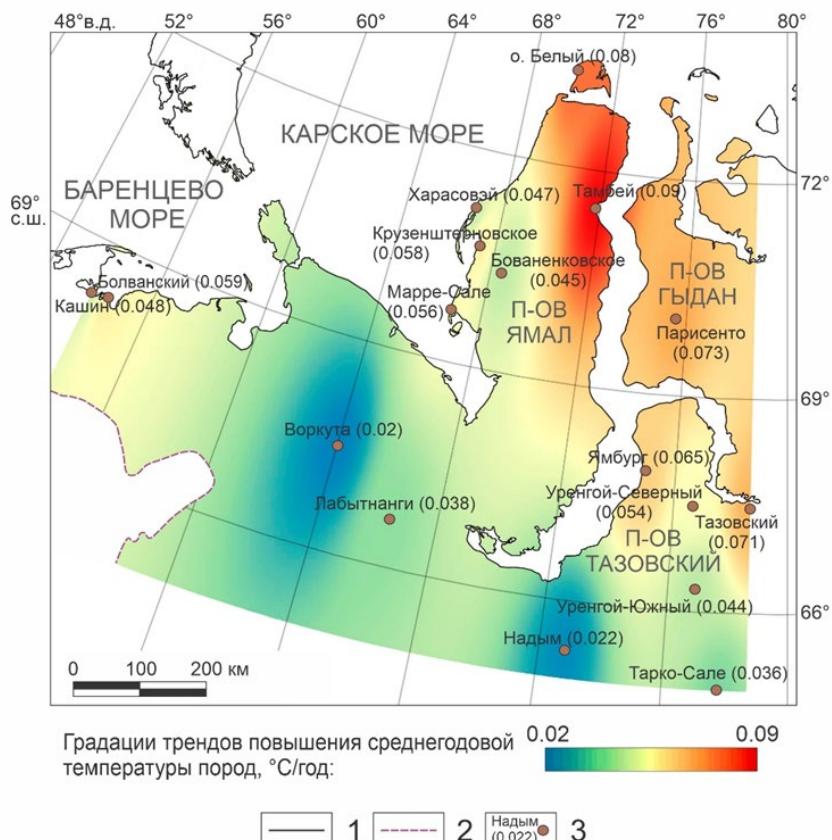


Рис. 2. Карта тенденций изменения температуры многолетнемерзлых пород криолитозоны западного сектора Российской Арктики. 1 – граница береговой линии, 2 – южная граница криолитозоны, 3 – ключевые участки измерений с их названиями и указанием в скобках тренда повышения среднегодовой температуры пород в °С/год.

На всех ключевых участках среднегодовая температура ММП растет, но с разной скоростью – от 0.02 до 0.09 °С/год. Наиболее быстрый прогрев пород (более 0.07 °С/год) характерен для высокотропных областей – северо-восточной части п-ова Ямал, п-ова Гыдан, острова Белый. Средние темпы (от 0.04 до 0.06 °С/год) характерны для западного побережья и центральной части Ямала, побережья Баренцева моря. Относительно низкие темпы потепления мерзлоты (от 0.02 до 0.04 °С/год) отмечаются для южной области криолитозоны – зон северной и южной тундры, лесотундры, северной тайги. В районе г. Воркута (Воркутинский полигон) отмечаются наиболее низкие темпы потепления мерзлоты – около 0.02 °С/год. Среднегодовая температура пород на ключевых участках стационаров в целом остается отрицательной, за исключением отдельных скважин в районах Южного Уренгоя, Воркуты, Надыма и Тарко-Сале. Наиболее интенсивное потепление наблюдается в высокоширотных тундровых областях, в то время как в южных районах (лесотундра, северная тайга) и Воркуте темпы значительно ниже. В верхних горизонтах криолитозоны на побережье Баренцева моря температура ММП повысилась до примерно -1°C , а в ряде ландшафтов перешла в положительную область. Здесь фиксируется медленное понижение кровли (верхней границы) ММП до глубины 4–6 м [Малкова и др., 2024]. В пределах северной тайги наблюдается повсеместная активная деградация: кровля многолетнемерзлых пород опускается значительно глубже, достигая 4–10 м [Malkova et al., 2022].

Практически везде в Западной Арктике происходит оттаивание пород сверху и понижение кровли ММП. По данным мониторинга глубины сезонного протаивания по программе CALM [Circumpolar..., 2025], на мониторинговых площадках западного сектора криолитозоны Российской Арктики наблюдается преимущественно тренд увеличения глубин протаивания (в среднем около 2-3 см/год, максимум 6.5 см/год). Глубина протаивания сильно зависит от состава и структуры ландшафтов. Активное оттаивание наблюдается в ландшафтах, сложенных слабольдистыми породами (пески и супеси). Это, как правило, дренированные участки на вершинах холмов. Наличие торфа в верхних частях разреза существенно уменьшает глубину протаивания и замедляет рост сезонно-талого слоя. Минимальная глубина протаивания отмечается под моховым покровом, развитым на мощных торфяниках, так как торф обладает хорошими теплоизолирующими свойствами и высокой льдистостью.

На основе геосистемного подхода и данных замеров температур пород с 1978 года, разработана модель динамики температурного режима криолитозоны в районе стационара Марре-Сале – типичной области тундр п-ова Ямал. Территория стационара, преимущественно расположенная на третьей морской террасе с высотами от 15 до 30 м н.у.м., а также пойме реки Марре-Яха, поделена на ландшафты, каждый из которых имеет специфический термический режим. На рисунке 3 представлена карта изменений среднегодовой температуры ММП на глубине 10 м территории Марре-Сале для трех временных интервалов – в 1980-х гг., в 2020-х гг. (настоящее время) и на прогнозный период 2040-х гг. (при условии сохранения темпов повышения температуры).

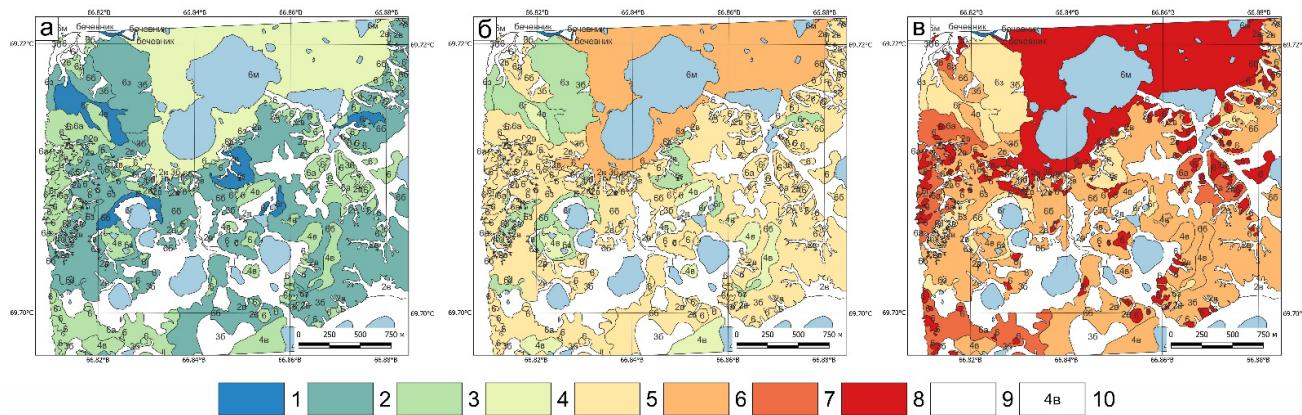


Рис. 3. Карта изменений среднегодовой температуры многолетнемерзлых пород на глубине 10 м для территории стационара Марре-Сале на периоды: а) 1980-х гг., б) 2020-х гг. (настоящее время), в) на прогнозный период 2040-х гг. 1-9 – диапазон среднегодовой температуры, °С: 1 – -8...-7, 2 – -7...-6, 3 – -6...-5, 4 – -5...-4, 5 – -4...-3, 6 – -3...-2, 7 – -2...-1, 8 – -1...0, 9 – нет данных, 10 – ландшафтный индекс по [Мельников и др., 1983].

Как видно из рисунка, наблюдается общее повышение температуры ММП на глубине 10 м во всех типах ландшафтов. В период 1980-х годов (начало измерений) температура ММП не превышала -5 °С на всей основной поверхности террасы. Самые низкие температуры от -8 до -6 °С были характерны для дренированные и слабодренированные полигональных тундр с моховым покровом. Дренированные равнинные тунды и области песчаных раздузов имели температуру от -6 до -5 °С, самая высокая температура пород составляла около -4.5 °С в пределах поймы реки Марре-Яха. В настоящее время (2020-2024 гг.) минимальная температура ММП повысилась до -4.5 °С. На преобладающей площади температура варьируется от -4 до -3 °С. В пойме реки температура не ниже -2 °С. При условии сохранения данных темпов повышения температуры ММП в 2040-е годы диапазон вариаций среднегодовой температуры ММП составит -3...0 °С, редко до -4 °С. На значительной площади температура ММП превысит -1 °С, что спровоцирует развитие и расширение зон несквозных таликов, главным образом

в понижениях (болотах, озерных котловинах, ложбинах стока поверхностных вод), где формируется глубокий снежный покров, а также в пойме реки.

Поскольку амплитуда флюктуаций теплового потока экспоненциально затухает с увеличением глубины и наблюдается увеличение фазового сдвига (времени задержки) тепловых потоков относительно поверхности, было выполнено сравнение тенденций изменения среднегодовой температуры пород (СТП) на разных глубинах для основных типов ландшафтов в Марре-Сале (рис. 4). Как видно из рисунка, наблюдается закономерное снижение темпов роста (тренда) СТП с увеличением глубины практически во всех исследованных скважинах. Наиболее интенсивные темпы прогрева (от 0.1 до 0.2 °C/год) зафиксированы в приповерхностных слоях, залегающих непосредственно под растительным покровом. Ниже слоя сезонного протаивания (на глубине 2 м), тренды снижаются приблизительно на 0.05 °C (от 0.02 до 0.17 °C/год), на глубине 5 м составляют от 0.03 до 0.15 °C/год, на глубине 10 м – от 0.05 до 0.11 °C/год. Также отмечается сокращение межландшафтной вариативности трендов СТП с увеличением глубины, что проявляется в уменьшении разницы между максимальным и минимальным значениями трендов.

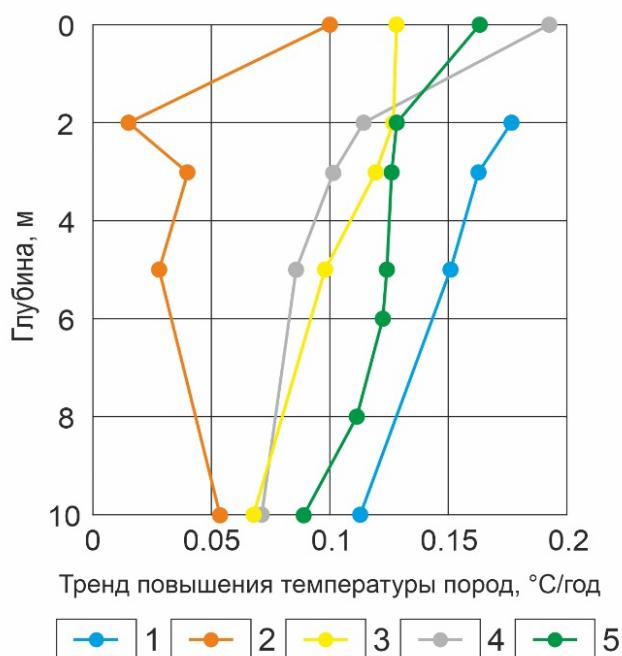


Рис. 4. Тренды изменений среднегодовой температуры пород на различных глубинах для разных типов ландшафтов в районе Марре-Сале. 1 – дренированная поверхность песчаных раздувов с фрагментами тундровой растительности, 2 – увлажненная поверхность типичной кустарничково-травяно-моховой тундры, 3 – увлажненная поверхность торфяника с кустарничково-лишайниково-моховым покровом, 4 – дренированная поверхность полигональной травяно-кустарничково-лишайниковой тундры, 5 – ровная дренированная поверхность с разряженным травяно-кустарничково-лишайниковым покровом.

Таким образом, на основе многолетних наблюдений и архивных данных получены количественные оценки изменений климатических и геокриологических условий криолитозоны Западного сектора Российской Арктики, которые указывают на ускоренное потепление и деградацию мерзлоты. Произошло как увеличение темпов потепления, так и перемещение центра климатического потепления в высокоширотную область Арктики. Повышение температуры воздуха сопровождается увеличение количества выпадающих осадков, в том числе, мощности снежного покрова, что оказывает значительное негативное влияние на стабильность мерзлых пород, способствуя их прогреву и

деградации. На составленной карте тенденций изменения температуры ММП западного сектора криолитозоны Российской Арктики показаны значительные различия в темпах потепления мерзлоты, которые варьируются от 0.02 до 0.09 °С/год. Наибольший тренд повышения температуры пород характерен для высокоширотных областей. В южной части криолитозоны региона в настоящее время уже активно происходят процессы частичной и даже полной деградации мерзлоты на основных поверхностях. Однако здесь нужно отметить, что при отрицательной, но близкой к 0 °С температуре ММП происходит уменьшение тренда повышения температуры пород за счет затрат тепла на фазовые переходы, что значительно замедляет полное оттаивания мерзлоты. В районах типичной тундры, мерзлота остается устойчивой на водораздельных поверхностях, но уже наблюдаются признаки ее деградации в понижениях рельефа. При условии сохранения темпов повышения температуры ММП даже в районе типичной тундры к середине 2040-х гг. на значительной площади можно ожидать развитие и расширение зон несквозных таликов, главным образом в понижениях, озерных котловинах, ложбинах стока. Наибольшие тренды повышения температуры наблюдаются в верхних горизонтах пород в слое сезонного оттаивания и в верхних горизонтах мерзлоты. На глубине 10 м темпы прогрева в 1.5-2 раза ниже. Для района Марре-Сале установлено, что наибольшие темпы потепления характерны для дренированных поверхностей с разреженной растительностью и песчаным составом пород, а наиболее устойчивы к прогреву заболоченные тундры с суглинистым разрезом пород, перекрытые слоем торфа мощностью около 0.2 м. В условиях потепления климата, отрицательная среднегодовая температура пород, измеренная на глубине нулевых годовых амплитуд, не гарантирует многолетнемерзлое состояние вышележащей толщи.

Работа выполнена в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0005).

ЛИТЕРАТУРА

Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 2. С. 15–30. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).

Иванов В.А., Рожин И.И. Моделирование деградации многолетнемерзлых пород при потеплении климата в условиях Центральной Якутии на ближайшие 300 лет // Современные научные технологии. 2021. № 10. С. 41-47.

Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Садуртдинов М.Р. и др. Деградация многолетнемерзлых пород на Европейском севере в условиях современного потепления климата / Всероссийская конференция с международным участием «III Юдахинские чтения»: сборник научных материалов, 25–28 июня 2024. Архангельск: КИРА, 2024. С. 248-253.

Мельников Е.С., Тагунов Л.Н., Лазарев Н.А. и др. Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1983. 165 с.

Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM): Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System. 2025. [Электронный ресурс]. <https://www2.gwu.edu/~calm/data>. Дата обращения 25.07.2025.

Global Climate Highlights 2024. “The 2024 Annual Climate Summary” Copernicus European Commission. 2024. [Electronic resource]. URL: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024#>. Data access 10.07.2025.

Malkova G.V., Drozdov D., Vasiliev A., 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.

Nicolsky D.J., Romanovsky V.E. Modeling long-term permafrost degradation // J. Geophys. Res.: Earth Surface. 2018. 123. doi: 10.1029/2018JF004655.

RATES OF AIR TEMPERATURE AND PERMAFROST CHANGE IN THE WESTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC

Oblogov, G.E., Vasiliev, A.A., Malkova, G.V., Belova, N.G.

Earth Cryosphere Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

Quantitative assessments of current trends in climatic and geocryological conditions in the western sector of the Russian Arctic are presented, based on the authors' own observations and published data. An acceleration of air warming rates (from 0.07 to 0.13 °C/year and higher) is shown, accompanied by an increase in precipitation (from 1.5 to 5.4 mm/year) and a shift of the warming center toward higher latitudes. As a consequence of these climatic changes, permafrost is experiencing significant warming at rates ranging from 0.02 to 0.09 °C/year, and the depth of seasonal thaw is increasing on average by 2–3 cm/year. Using actual measurement data, a map of trends in permafrost temperature change has been compiled for the western sector of the Russian Arctic. For the Marre-Sale area (western coast of the Yamal Peninsula), the dynamics of changes in mean annual permafrost temperature in specific landscape types are shown for three time intervals—the 1980s, the 2020s (present), and the projected period of the 2040s. The difference in the intensity of warming rates at various depths is demonstrated. The upper horizons—within the seasonally thawed layer and the upper permafrost—warm the fastest. At a depth of 10 m, warming rates are 1.5–2 times lower.

Keywords: *Western Arctic, permafrost, trends, climate change, Marre-Sale, permafrost temperature*

REFERENCES:

- 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 [Earth's Cryosphere]. 2020. Vol. XXIV. No. 2. P. 15-30. (In Russian)
- Ivanov V.A., Rozhin I.I. Modeling the degradation of permafrost rocks during climate warming in Central Yakutia over the next 300 years // Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern science-intensive technologies]. 2021. No. 10. P. 41-47. (In Russian)
- Malkova G.V., Korostelev Yu.V., Sadurtdinov M.R. et al. Degradation of permafrost in the European North under conditions of modern climate warming / All-Russian conference with international participation "III Yudakhin Readings": collection of scientific materials, June 25-28, 2024. Arkhangelsk: KIRA, 2024. pp. 248-253. (In Russian)
- Melnikov E.S., Tagunov L.N., Lazarev N.A., et al. Landshafty kriolitozony Zapadno-Sibirskoj gazonosnoj provincii [Landscapes of the permafrost zone of the West Siberian gas province]. Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch. 1983. 165 p. (In Russian)
- Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM): Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System.* 2025. [Electronic resource]. <https://www2.gwu.edu/~calm/data>. Date of access 25.07.2025.
- Global Climate Highlights 2024. “The 2024 Annual Climate Summary”* Copernicus European Commission. 2024. [Electronic resource]. URL: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024#>. Data access 10.07.2025.
- Malkova G.V., Drozdov D., Vasiliev A., 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.
- Nicolsky D.J., Romanovsky V.E. Modeling long-term permafrost degradation // J. Geophys. Res.: Earth Surface. 2018. 123. doi: 10.1029/2018JF004655