

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-483-490



ТРЕНДЫ ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОТЫ ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ

✉ Васильев А.А., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Хомутов А.В.

Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень, Россия

✉ al.a.vasiliev@gmail.com

Приведены результаты собственных наблюдений, литературных и архивных данных за температурой многолетнемерзлых пород (ММП) в Западной Арктике. Определены многолетние тренды повышения температуры ММП для 16 ключевых участков на побережье Баренцева и Карского морей. Для побережья Баренцева моря средний тренд повышения температуры составил 0,028 °C/год. Для Карского моря средний тренд достигает 0,056 °C/год. Разработаны ГИС-ориентированные карты трендов изменения температуры ММП Западной Арктики. Установлено, что на побережье Баренцева моря тренды остаются неизменными, напротив, на побережье Карского моря тренды имеют тенденцию к возрастанию.

Ключевые слова: *Западная Арктика, многолетнемерзлые породы, температура ММП, тренды повышения температуры.*

Проблема оценки реакции мерзлоты в связи с изменением климата выдвинулась в ряд приоритетных в последние десятилетия. Это связано с влиянием криосферы на многие глобальные процессы - планетарный круговорот влаги и углерода, эволюцию арктических и субарктических экосистем, устойчивость арктической инфраструктуры и другое. Установлено, что реакция мерзлой толщи на климатические изменения отличается во времени и в разных регионах [Романовский, 2006, Brown et al., 2000].

В последние годы все более утверждается мнение об ускоряющемся потеплении климата в Арктике [IPCC, 2018 и др.]. Для выявления параметров потепления климата в Западной Арктике был проанализирован временной ход среднегодовой температуры воздуха для ключевых метеостанций, вблизи которых проводятся долговременный мониторинг температурного режима мерзлоты, по двум временным интервалам климатического стандарта – 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. (рис. 1). На графиках приведены коэффициенты в уравнениях регрессии, которые отражают темпы повышения температуры.

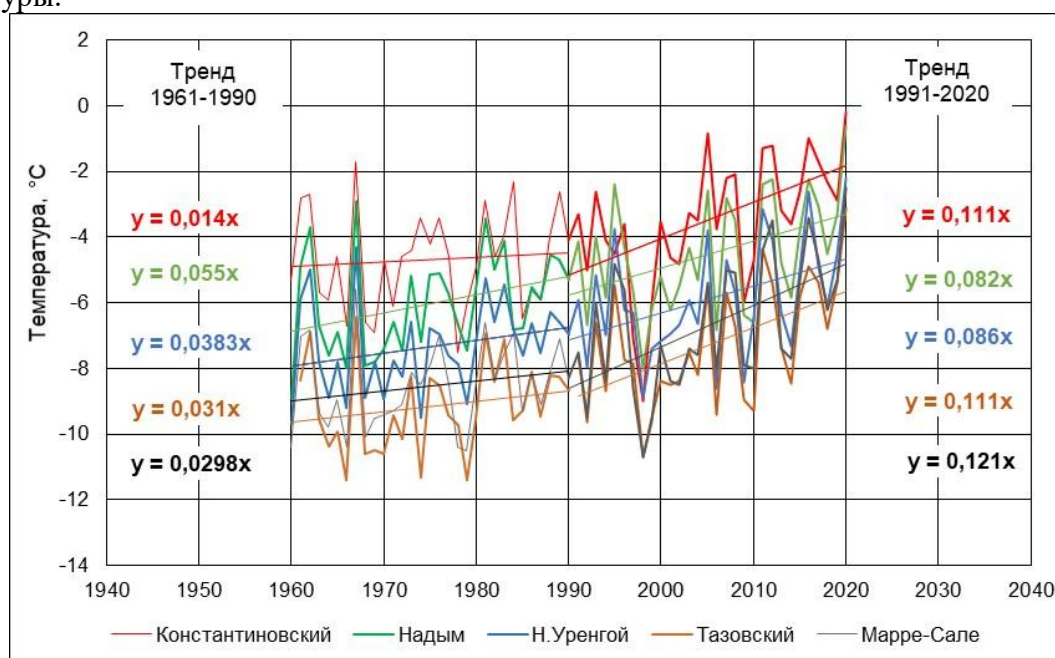


Рис. 1. Временной ход среднегодовой температуры воздуха на ключевых метеостанциях.

Как видно из рисунка, на всех метеостанциях наблюдается ускорение потепления в последние 30 лет по сравнению с предшествующими десятилетиями. Тренды потепления увеличились до трех раз. Соответственно, мы вправе ожидать и ускорения темпов деградации мерзлоты.

Для анализа тенденций эволюции ММП в прибрежно-морской области необходимо располагать данными об изменении температуры во времени не только по данным немногочисленных стационаров, которые, безусловно, являются основными, но и данными по разным (максимально возможным) регионам и географическим точкам Западной Арктики. С этой целью был проанализирован весь доступный массив литературных данных и архивных материалов. При анализе важно было получить сравнимые данные об изменении среднегодовой температуры во времени для более-менее одинаковых ландшафтных условий хотя бы для двух временных срезов. Удалось получить корректные данные для двух участков на побережье Баренцева моря и 14 участков Карского моря (таблица 1).

Таблица 1. Тренды повышения среднегодовой температуры ММП в прибрежно-морской области Западной Арктики

Местоположение	Тип ММП	Ранние измерения		Поздние измерения		Тренд, °C/год
		Год	Температура, °C	Год	Температура, °C	
Баренцево море						
Мыс Болванский*	Сплошная	1984	-2,2	2024	-1,3	0,023
о. Кашин	Островная	2012	-1,0	2024	-0,6	0,033
Карское море						
Гыданский п-ов	Сплошная	1985	-8,4	2018	-6,0	0,073
Лабытнанги	Прерывистая	1972	-2,0	2008	-0,1	0,053
о. Белый	Сплошная	1972	-9,5	2009	-7,1	0,065
Ямбург	Сплошная	2000	-4,2	2020	-2,9	0,065
Марре-Сале	Сплошная	1978	-6,5	2023	-4,0	0,056
Надым	Островная	1975	-1,2	2020	-0,2	0,022
Сев. Уренгой	Сплошная	1975	-5,5	2020	-3,2	0,051
Тазовский	Сплошная	2017	-2,7	2024	-2,2	0,071
Южн. Уренгой	Прерывистая	1975	-3,7	2020	-0,5	0,071
Бованенково	Сплошная	1980	-6,0	2020	-4,2	0,045
Крузенштерна	Сплошная	1982	-6,4	2020	-4,2	0,058
Тамбей	Сплошная	1978	-7,0	2012	-4,4	0,076
Харасовей	Сплошная	1980	-7,0	2018	-5,2	0,047
Тарко-Сале	Островная	2006	-0,53	2018	-0,1	0,036

* Выделены участки, на которых ИКЗ ТюмНЦ СО РАН проводит многолетний мониторинг температурного режима ММП.

В графическом виде полученные оценки приведены на рис. 2. Конечно, полученные данные характеризуют весьма приблизительные временные тренды изменения среднегодовой температуры ММП во времени, но, тем не менее, дают возможность оценить пространственное распределение изменений температуры.

По имеющимся ограниченным данным средний тренд для побережья Баренцева моря составляет 0,028 °С/год, Карского моря - 0,056 °С/год. Выделяется регион с повышенными трендами изменения температуры ММП. Наибольшие приращения температуры характерны для севера Тазовского п-ова и Гыданского п-ова.

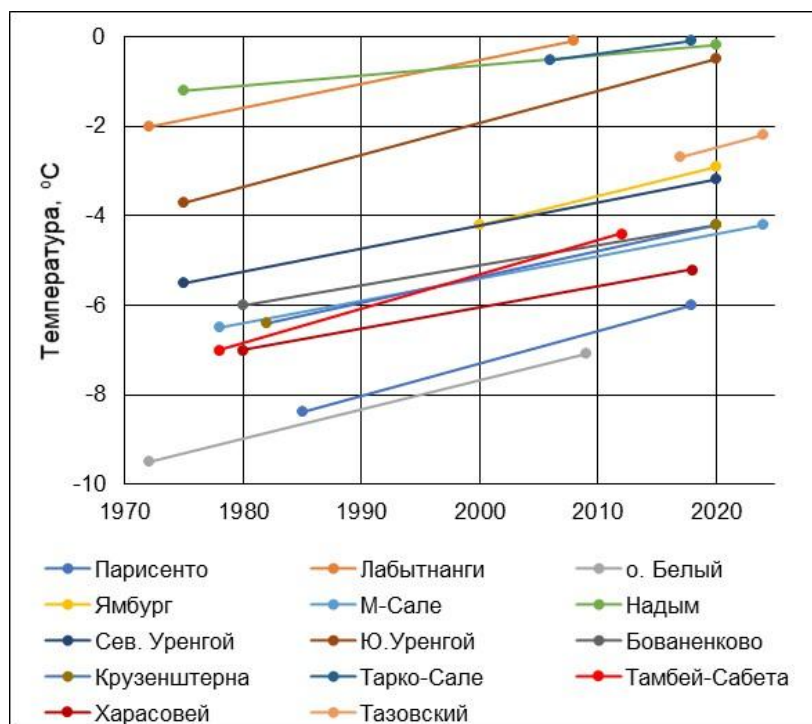


Рис. 2. Многолетние тренды среднегодовой температуры ММП в Западной Арктике.

Были построены ГИС-ориентированные карты пространственно-временного изменения трендов температуры ММП Западной Арктики (рис. 3), из которого хорошо видно, что для побережья Баренцева моря тренды остаются неизменными за исключением восточной части Кольского полуострова, а вот на побережье Карского моря в XXI веке наблюдается ускоренное повышение температуры, и в этот процесс уже включилось СЗ побережье Таймыра.

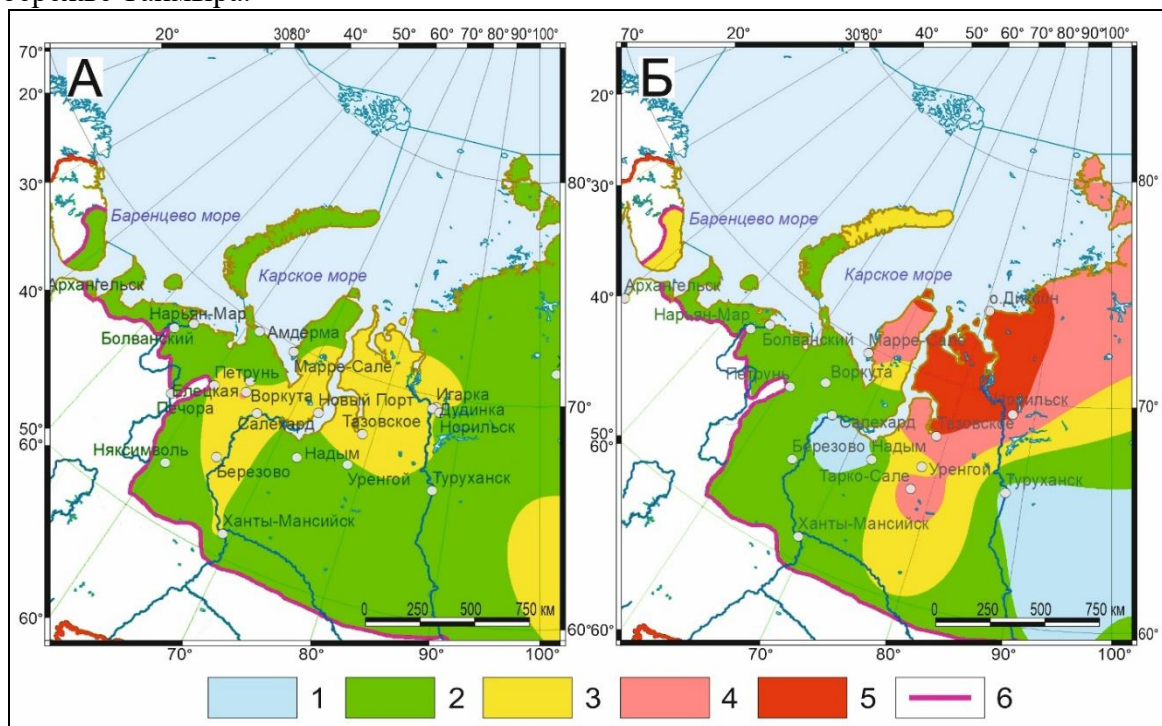


Рис. 3. Пространственное распределение трендов среднегодовой температуры ММП Западной Арктики на конец XX (А) и начало XXI вв. (Б). В легенде линейные тренды, °C/год: 1 – менее 0,01; 2 – 0,01...0,03; 3 – 0,03... 0,05; 4 - 0,05...0,07; 5 - более 0,07, 6 – южная граница распространения ММП.

Таким образом, на основании собственных наблюдений на геокриологических стационарах, литературных и архивных данных впервые получены приближенные количественные оценки трендов изменения температуры ММП на основных морфологических поверхностях Европейского Севера и Западной Сибири.

На основании анализа многолетних изменений температуры ММП на стационарах был сделан вывод, что в Западной Арктике в зоне типичных тундр криолитозона может считаться устойчивой, поскольку здесь на основных поверхностях среднегодовая температура еще далека от температуры замерзания-оттаивания. В зоне южной тундры процесс деградации мерзлоты уже начался, здесь температура ММП в верхних горизонтах криолитозоны Баренцевоморского побережья, как правило, повысилась до -1°C , а в некоторых ландшафтах перешла в область положительных значений, здесь уже наблюдается медленное опускание кровли ММП до глубины 4 м [Малкова и др., 2024]. В северной тайге повсеместно происходит активная деградация мерзлоты, опускание кровли ММП достигает 4-10 м [Васильев и др., 2020].

Низкие переходные поверхности от суши к морю – аккумулятивные морские лайды, пляжи и устьевые части речных пойм характеризуются собственным термическим режимом, отличающимся от основных поверхностей.

Термический режим морских лайд и устьевых частей речных пойм формируется в условиях непосредственного воздействия моря на накопление прибрежных отложений, их промерзание и эволюцию термического режима. По условиям криолитогенеза все отложения низких поверхностей относятся к сингенетическим. Отложения лайды и устьевых частей речных пойм характеризуются морским хлоридно-натриевым засолением. Засоленность супесчано-суглинистых пород на лайдах изменяется от 0,3 до 0,9 % (по весу). Наблюдения показали, что в сочетании приливов и ветровых нагонов происходит затопление устьевых частей речных пойм на глубину до 2 км вверх по течению, при этом пойменные отложения засоляются до 0,1...0,44 %, в среднем засоленность тонкозернистых песков речных пойм составляет 0,32%.

На основании собственных полевых наблюдений и обработки литературных [Маслов, 1985, Горелик и др., 2014 и других] и архивных данных для двух основных литологических разностей найдена экспериментальная зависимость температуры фазовых переходов воды (температуры начала промерзания-оттаивания) от засоленности (рис. 4).

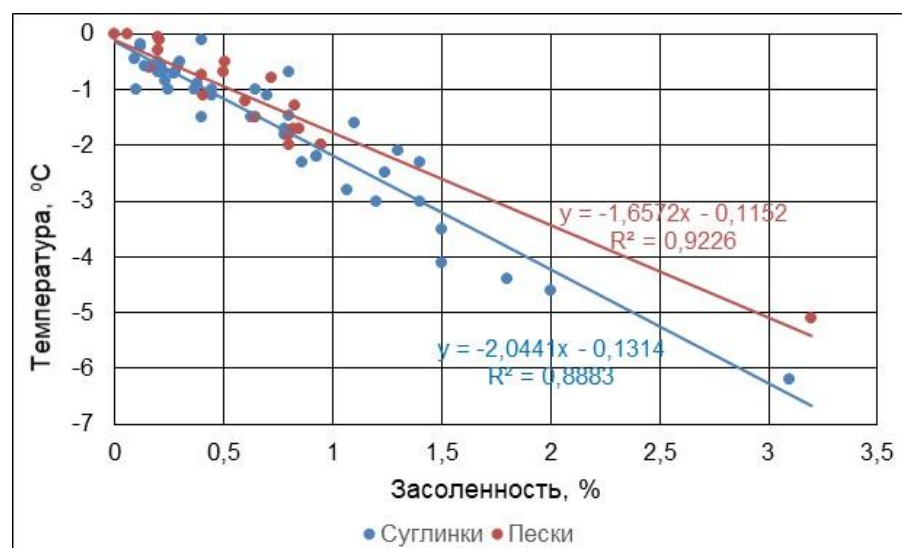


Рис. 4. Зависимость температуры фазовых переходов от засоленности пород. Таким образом, засоленность пород прямо определяет их физическое состояние – талые охлажденные или мерзлые.

Наблюдения за температурным режимом многолетнемерзлых пород на поверхности низкой аккумулятивной лайды проводились с 2007 по 2016 г в районе

Марре-Сале (Западный Ямал) и были прекращены в связи с тем, что наблюдательная скважина располагалась на пути летней миграции белых медведей, дальнейшие наблюдения стали опасны. Скважина располагалась на низкой аккумулятивной поверхности морской лайды в северной части Марресальских кошек с абсолютной отметкой устья в 0,5 м над уровнем моря и ежедневно затопливалась во время приливов. Морская лайда являет собой территорию новообразования многолетнемерзлых засоленных пород. Температура фазовых переходов составляет около $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кровля мерзлоты ежегодно определялась по наличию ледяных включений в кернах ручных скважин. Результаты наблюдений за среднегодовой температурой пород приведены на рис. 5.

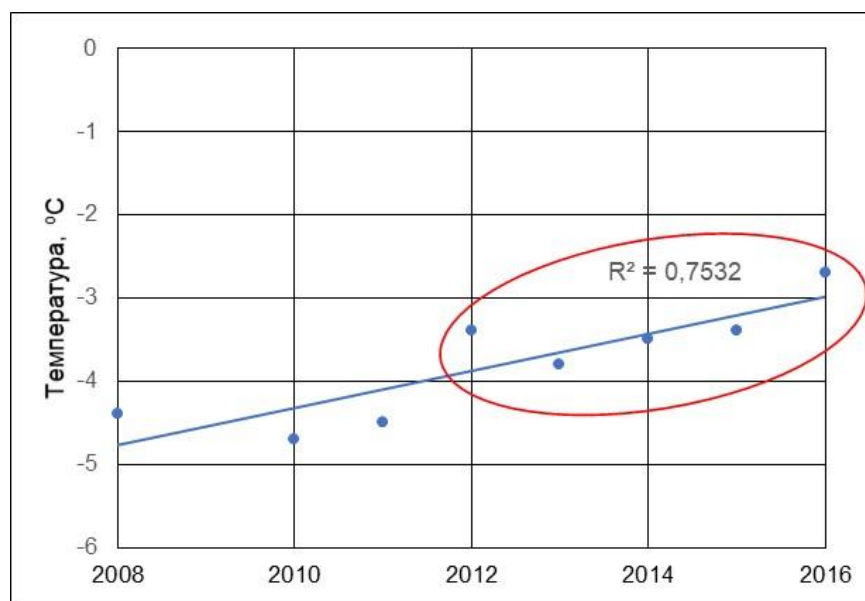


Рис. 5. Изменение среднегодовой температуры ММП на морской лайде Марресальских кошек. Красным овалом отмечен период, когда признаков мерзлоты не обнаружено.

Как видно из рисунка, среднегодовая температура образующихся ММП с 2008 по 2016 гг. повысилась с $-4,4$ до $-2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и приблизилась к температуре фазовых переходов $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. После 2012 г. бурение не выявило присутствия ледяных включений, керн был представлен пластичными легкими суглинками. Из этого можно сделать вывод, что в настоящее время здесь нет условий для формирования мерзлой толщи, дальнейшее повышение среднегодовой температуры пород выше $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызовет деградацию новообразованных многолетнемерзлых пород. Скорее всего, по аналогии с данными наблюдений на высоких поверхностях этот процесс уже происходит, но не зафиксирован нами из-за прекращения наблюдений. В любом случае можно констатировать, что новообразование мерзлоты на морских лайдах Карского моря не происходит, по крайней мере, южнее широты 70°с.ш.

Наблюдения за термическим режимом низких поверхностей речных пойм в их устьевой части проводятся с 2017 по 2023 гг. в районе Марре-Сале в мелкой скважине, расположенной на высокой пойме местной реки Марре-Яха. Эти территории подтапливаются при морских приливах, особенно в сочетании с ветровыми нагонами. Засоленность песчаных отложений значительно ниже, чем морских лайд, и в среднем составляет около 0,3 %. При этом температура фазовых переходов достигает $-0,2\text{...}-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Целью наблюдений было установить превышают ли фактические среднегодовые температуры пород температуру фазовых переходов. Как и Кристофер Бёрн [Burn, 2004], мы полагаем, что деградация мерзлоты реализуется, только если хотя бы в части разреза (обычно – верхней) среднегодовая температура пород стала выше температуры фазовых переходов. Наиболее критический случай деградации мерзлоты, когда наблюдается

устойчивое оттаивание верхнего горизонта, опускание кровли многолетнемерзлых пород, а иногда и формирование перелетков.

На рис. 6 приведены результаты наблюдений за температурным режимом верхнего горизонта ММП на пойме. Как видно из рисунка, среднегодовая температура пород на глубине 1 м до 2019 г еще оставалась чуть ниже температуры фазовых переходов, а позже устойчиво перешла в диапазон температур, превышающих температуру начала промерзания -оттаивания. Это означает, что верхняя часть разреза перешла из сезонно-талого в сезонно-мерзлое состояние. Ручное бурение показало опускание кровли мерзлоты до глубины 2,3-2,7 м.

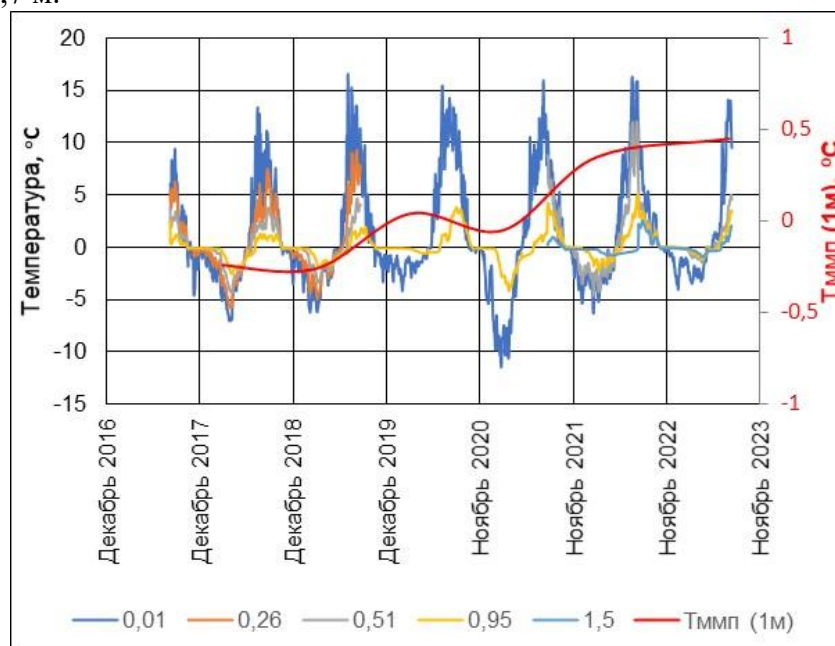


Рис. 6. Временной ход температуры пород на высокой пойме. Красная линия – среднегодовой температура пород на глубине 1 м.

Можно констатировать, что в типичных тундрах в устьевой части пойм, подверженных приливам и нагонам, зафиксировано начало деградации мерзлоты, при этом на основных поверхностях мерзлота в типичных тундрах пока еще остается устойчивой. На нижних мерзлых горизонтах около 10 м среднегодовая температура ММП на пойме приближается к $-1,5^{\circ}\text{C}$, что существенно ниже температуры замерзания-оттаивания.

Таким образом, на основании собственных полевых наблюдений, литературных и архивных данных можно заключить, что на побережье Баренцева моря в условиях южной тундры началась деградация мерзлоты с образованием несливающихся таликов глубиной до 4 м. На побережье Карского моря в его южной части, представленной южной тундрой, также наблюдаются процессы деградации мерзлоты на основных поверхностях, а в центральной части, где развиты типичные тундры, мерзлота остается устойчивой на основных поверхностях, но уже наблюдаются признаки ее деградации на низких поверхностях. Здесь также стало невозможным новообразование мерзлоты на аккумулятивных образованиях Карского моря. На северном побережье (севернее 70°с.ш.) мерзлота остается устойчивой как на высоких, так и на низких поверхностях.

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 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)

Горелик Я.Б., Солдатов П.В., Селезнев А.А. Инженерно-геоэкологические условия Ямбургского газоконденсатного месторождения и динамика состояния кустовых площадок эксплуатационных скважин // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 1. С. 58–69.

Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М. 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.

Маслов А.Д. Физико-механические и теплофизические свойства донных отложений юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского морей // Инженерно-геологические свойства донных отложений Мирового океана. Л., Севморгеология, 1985, с. 51–63.

Романовский В.Е. Температурный режим вечной мерзлоты Аляски последних 20 лет // Материалы Международной конференции «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений», т.1, Тюмень, ТюмГНУ, 2006. с. 96-101.

Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: research designs and initial results // Polar Geography. 2000. Vol. 24. Is. 3. P. 166-258. doi: 10.1080/10889370009377698

Burn C.R. The Thermal Regime of Cryosols. Cryosols (Permafrost-Affected Soils). J. Kimble (ed.). Berlin–Heidelberg– New York, Springer-Verlag, 2004. P. 391–414.

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty /Masson-Delmotte V., P. Zhai H.-O. Pörtner et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 p. doi: 10.1017/9781009157940

PERMAFROST DEGRADATION TRENDS OF WESTERN RUSSIAN ARCTIC

Vasiliev A.A., Malkova G.V., Oblogov G.E., Khomutov A.V.

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

The results of our observations, published and archival data of the permafrost temperature in the Western Arctic are presented. Long-term trends of the Permafrost temperature increase have been determined for 16 key sites on the coast of the Barents and Kara Seas. For the Barents Sea coast, the average temperature rise trend was 0.028 °C/year. For the Kara Sea, the average trend reaches 0.056 °C/year. GIS-oriented maps of the Permafrost temperature trends in Western Arctic have been developed. It has been found that trends remain unchanged on the coast of the Barents Sea, in the contrast, trends tend to increase on the Kara Sea coast.

Keywords: *Western Arctic, permafrost, temperature, temperature trends.*

REFERENCES:

Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: research designs and initial results // Polar Geography. 2000. Vol. 24. Is. 3. P. 166-258. doi: 10.1080/10889370009377698

Burn C.R. The Thermal Regime of Cryosols. Cryosols (Permafrost-Affected Soils). J. Kimble (ed.). Berlin–Heidelberg– New York, Springer-Verlag, 2004. P. 391–414.

Gorelik Ya.B., Soldatov P.V. Engineering-geological conditions of the Yamburg gas field and boreholes areas // Earth Cryosphere. 2015. Vol. XIX. № 1. P. 58–69.

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty /Masson-Delmotte V., P. Zhai H.-O. Pörtner et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 p. doi: 10.1017/9781009157940

Malkova G.V., Korostelev Yu.V., Sadurtdinov M.R. et al. Permafrost Degradation in European North of Russia under climate warming // Proceeding of all Russian conference “III Yudakhin memory”, Arkhangelsk, June 25-28, 2024. P. 248-253.

Maslov A.D. Physical-mechanical and thermophysical properties of bottom sediments of the southeastern part of the Barents and southwestern parts of the Kara Seas // Engineering and geological properties of bottom sediments of the World Ocean. Leningrad, Sevmorgeologiya, 1985, pp. 51-63.

Romanovsky V.E. The thermal regime of the permafrost in Alaska in the last 20 years // Proceedings of the International Conference "Theory and practice of assessing the state of the Earth's cryosphere and forecasting its changes", vol. 1, Tyumen, Tyumen State University. 2006. P. 96-101.

Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A. et al. 2020. Permafrost Degradation; Results of the long-term Permafrost monitoring in the western sector of Russian Arctic // Earth Cryosphere. 2020. Vol. XXIV. № 2. P. 15–30. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30)