doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-552-560

ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЕ ВЕРХНИХ ГОРИЗОНТОВ МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ НА ОБЪЕКТАХ МОНИТОРИНГА КРИОЛИТОЗОНЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

✉ *Малкова Г.В., Царев А.М.*

Институт криосферы земли СО РАН, Тюмень, Россия
✉ *galina_malk@mail.ru*

Приведены результаты экспедиционных наблюдений за температурой и глубиной сезонного протаивания многолетнемерзлых пород Европейской территории России. Установлено, что важнейшим последствием потепления климата является изменение температурного режима ММП, повышение их среднегодовой температуры, сокращение глубины яруса годовых теплооборотов. Тренд среднегодовой температуры воздуха за последние 30 лет для разных метеостанций ЕТР изменяется от 0,08°С/год до 0,12°С/год. Тренды повышения температуры ММП всегда отстают от трендов повышения температуры воздуха и изменяются от 0,01°С/год до 0,04°С/год. На участках островной мерзлоты наблюдается формирование горизонтов нестабильного (переходного) состояния ММП, переход температуры пород к положительным значениям и опускание кровли мерзлоты. На фоне климатического потепления повсеместно увеличивается глубина протаивания ММП.

Ключевые слова: *Многолетенмерзлые породы, температурный режим, тренды температуры воздуха, глубина сезонного протаивания*

На протяжении нескольких десятилетий институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН проводит комплексный мониторинг на Европейском севере на площадках и стационарах, расположенных в подзоне южной тундры. Ежегодные экспедиционные работы на Европейской территории России были организованы при поддержке Международного проекта GTN-P, а в последние годы выполняются в рамках Госзадания 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» (рис.1).

Важнейшими задачами экспедиционных работ в рамках проекта является изучение современного состояние верхних горизонтов мерзлых толщ на объектах геокриологического мониторинга, расположенных в различных природных и геокриологических зонах Российской Арктики.

Всего на территории стационаров, расположенных в криолитозоне Европейского севера, функционирует три площадки наблюдения за глубиной сезонноталого слоя (CALM) и 27 действующих температурных скважин глубиной от 3 до 12 м в различных криогенных ландшафтах. Подробная характеристика объектов мониторинга и опорных температурных скважин, имеющих наиболее длительные ряды наблюдений, приведены в [*Malkova et al, 2022; Малкова и др., 2023*].

Все наблюдения за температурой ММП в скважинах выполняются по единому протоколу, измерительными средствами российского производства или логгерами HOBO, переданными при технической поддержке проекта GTN-P [*Malkova et al, 2022*]. Результаты измерения температуры воздуха и пород ежегодно считываются из памяти автоматизированного логгера в компьютер непосредственно в поле, при посещении скважины, затем обрабатываются и заносятся в базу данных. На основе комплексных многолетних экспедиционных исследований в криолитозоне Европейского севера проведена оценка произошедших геокриологических изменений, имеющих пространственные и временные особенности, тесно увязанные с изменениями климата.

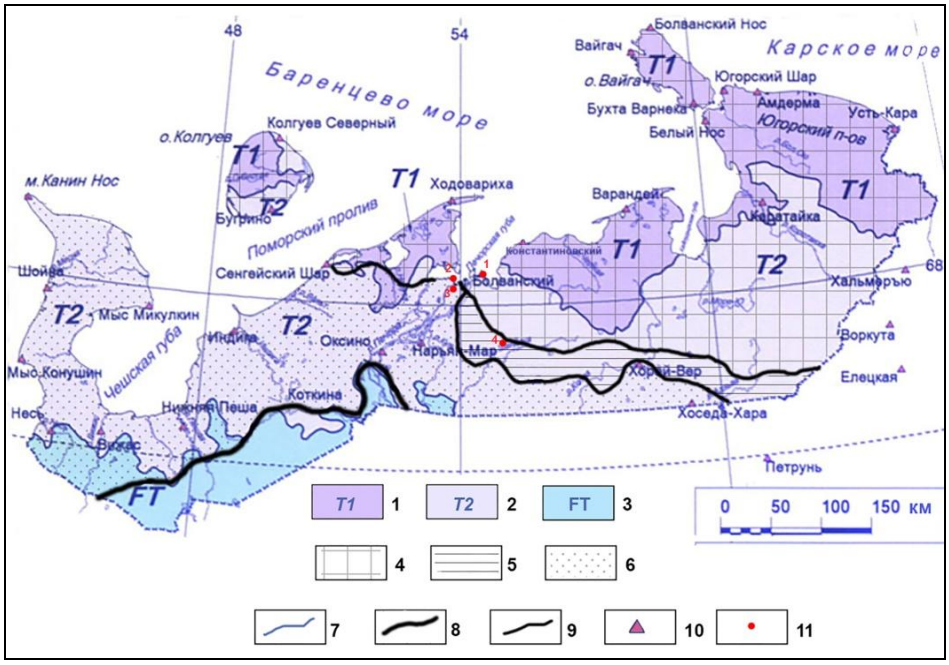

Рис. 1. Природно-климатические зоны и подзоны и их индексы:
1 – типичная тундра; 2 – южная тундра; 3 – лесотундра.
Типы распространения ММП: 4 – сплошное распространение; 5 – прерывистое распространение;
6- островное распространение; 7 – границы природных зон и подзон;
8 – южная границы криолитозоны; 9 – границы разных типов распространения ММП;
10 – метеостанции; 11 – объекты геокриологического мониторинга (1- Болванский,
2 – Кашин, 3 – Кумжа, 4 – Шапкина)

Анализ текущих **климатических изменений** Европейской территории Российской Арктики за последние десятилетия свидетельствует о высоких темпах потеплении климата. Тренд среднегодовой температуры воздуха за последние 30 лет для разных метеостанций ЕТР изменяется от 0,08°С/год до 0,12°С/год. Причем, в скорости изменения среднегодовой температуры воздуха в конце 1990-х годов наблюдается заметный перелом - в XXI веке тренды в два и более раз выше по сравнению с тридцатилетним периодом конца XX века. (рис. 2). Повышение темпов потепления климата отмечается и для других регионов Российской Арктики [*Malkova et al, 2022*]. Теплый период увеличился почти на три недели, а среднее количество атмосферных осадков увеличилось на 50-100 мм/год.

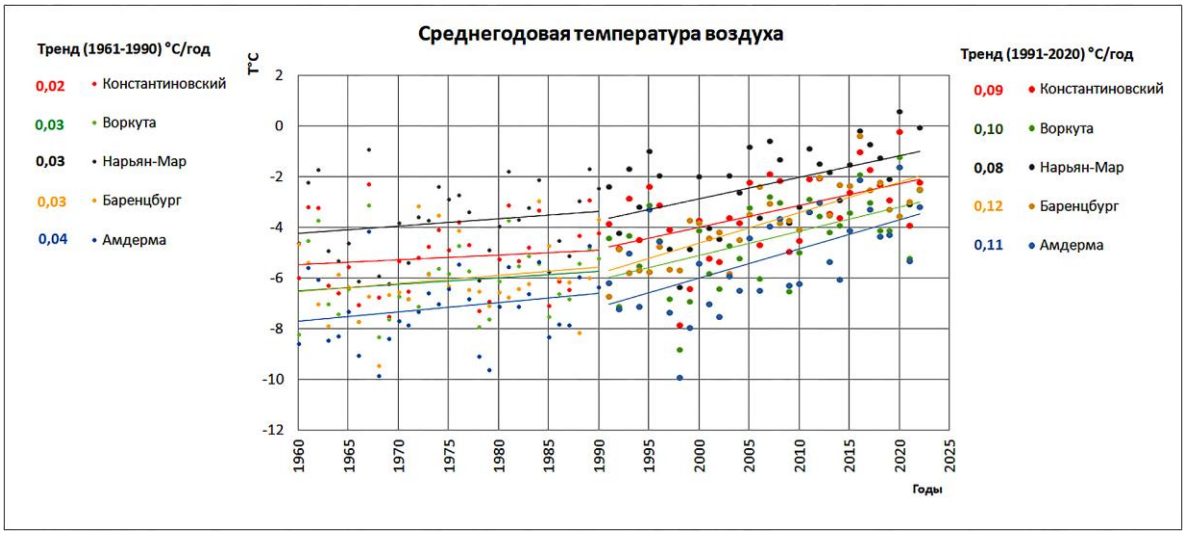

Рис. 2. Тренды среденгодовой температуры воздуха для территории криолитозоны ЕТР

Но климатическое потепление не повлекло за собой такого же резкого повышения **среднегодовой температуры пород.** Результаты мониторинга свидетельствуют, что в зоне сплошного распространения мерзлоты (стационар Болванский) температура ММП на глубине 10 м во всех криогенных ландшафтах стационара Болванский за 40-летний период наблюдений повысилась на 1…1.5°С и составляет в настоящее время -0.7…-1.3°С. Идет постепенный процесс повышения температуры ММП, но с различными скоростями - в низкотемпературных криогенных ландшафтах достигающими 0,04°С/год, а в наиболее высокотемпературных - не превышающими 0,01°С/год, что приводит к сокращению температурных различий (рис. 3). Следует признать, что это очень высокие темпы изменения естественной среды, которые будут вызывать серьезные затруднения при освоении Арктической зоны. По нашим наблюдениям с 2015 г темпы повышения температуры ММП замедлились, т.к. при температуре 0…-1,5°С в верхних 10 м начинаются фазовые переходы в грунтах, тормозящие процесс растепления пород [*Малкова и др., 2022*].

Рис.3. Многолетние изменения среднегодовой температуры ММП на стационаре Болванский

Среднегодовая температура ММП на участках Кумжа и Кашин (зона островного распространения ММП) в различных ландшафтах в 2024 г. изменяется от -0,1 до -1,35°С. Наиболее низкая температура наблюдается на прибровочных участках острова Кашин в скважине 6, где сдувается снег и наблюдается стабильное зимнее охлаждение верхних горизонтов пород (рис. 4). За пять лет наблюдений мы наблюдаем отрицательный тренд и понижение среднегодовой температуры пород с -1,06°С до -1,35°С.

На талых участках наши температурные измерения показали, что глубина сезонного промерзания в условиях плоского микрорельефа и песчаного разреза достигает 2…2,5 м. Но на возвышенной дренированной песчаной гриве, где пробурена скважина 5 (Кумжа), глубина промерзания может достигать 3-х и более метров (рис.5).

Результаты мониторинга показали, что в последние 10-15 лет происходит не только повышение температуры пород в скважинах на разных глубинах, но и сокращение **глубины яруса годовых теплооборотов** (ЯГТО). Для условий сплошного распространения ММП (Болванский) ЯГТО в настоящее время составляет 4-5 м, для области прерывистого распространения ММП (Шапкина) равен 3-4 м, а на участках мерзлоты в области островного распространения (Кашин, Кумжа) - ограничен сезонноталым слоем и не превышает 2-3 м.

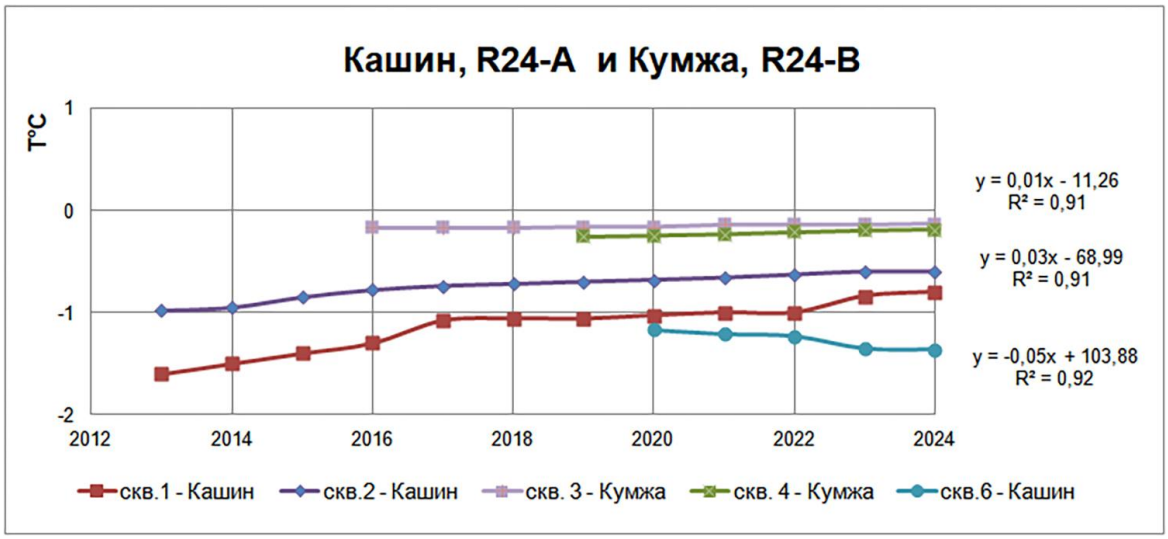

Рис.4. Графики среднегодовой температуры пород в скважинах на острове Кашин и площадке Кумжа

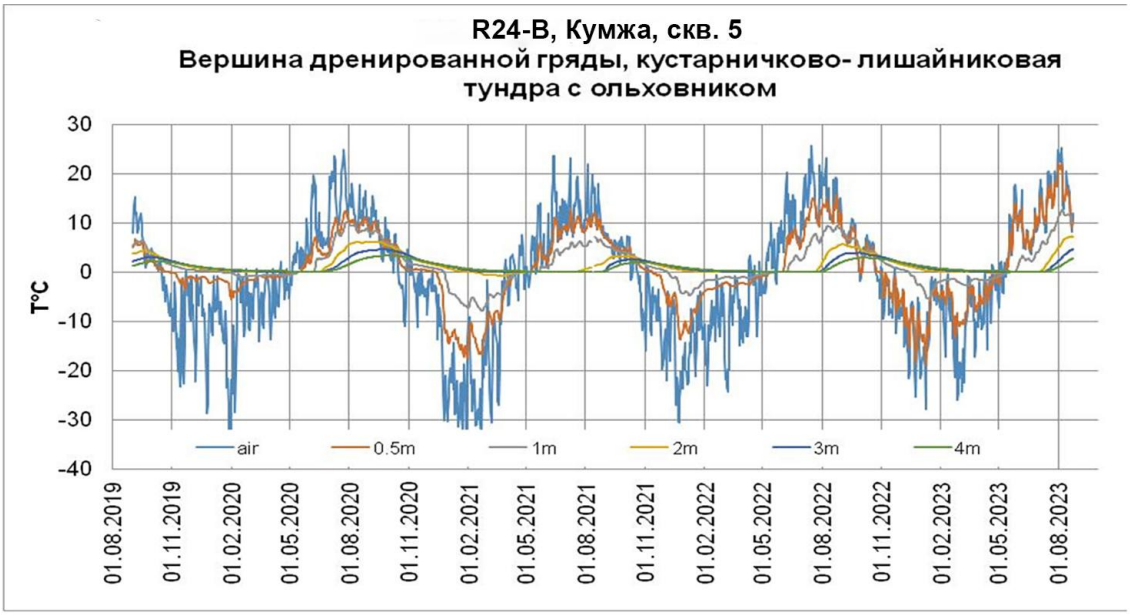

Рис. 5. Динамика температуры пород в талой скважине 5, Кумжа

Круглогодичные наблюдения за температурным режимом пород позволили оценить изменения в температурном поле верхних горизонтов пород с помощью графиков термоизоплет (рис. 6). В условиях сплошного распространения ММП, если среднегодовая температура пород не поднялась выше –1°С, температурное поле остается вполне устойчивым, горизонтов с переходными температурами около 0°С не наблюдается, или эти зоны еще очень незначительные (скв. 83, Болванский).

В зоне островного распространения ММП в криогенных ландшафтах со среднегодовой температурой около -1°С (рис. 6, скв. 6, Кашин) в самых верхних горизонтах уже начали прослеживаться тенденции к формированию талого прослоя, который может не успеть промерзнуть зимой. Такие условия, например, создались в 2022 г., когда маломощный горизонт, не промерзший зимой, сохранился до следующего теплого сезона. При условии последующих теплого лета и достаточно теплой и снежной зимы в данных ландшафтных условиях возможно образование мерзлоты несливающегося типа.

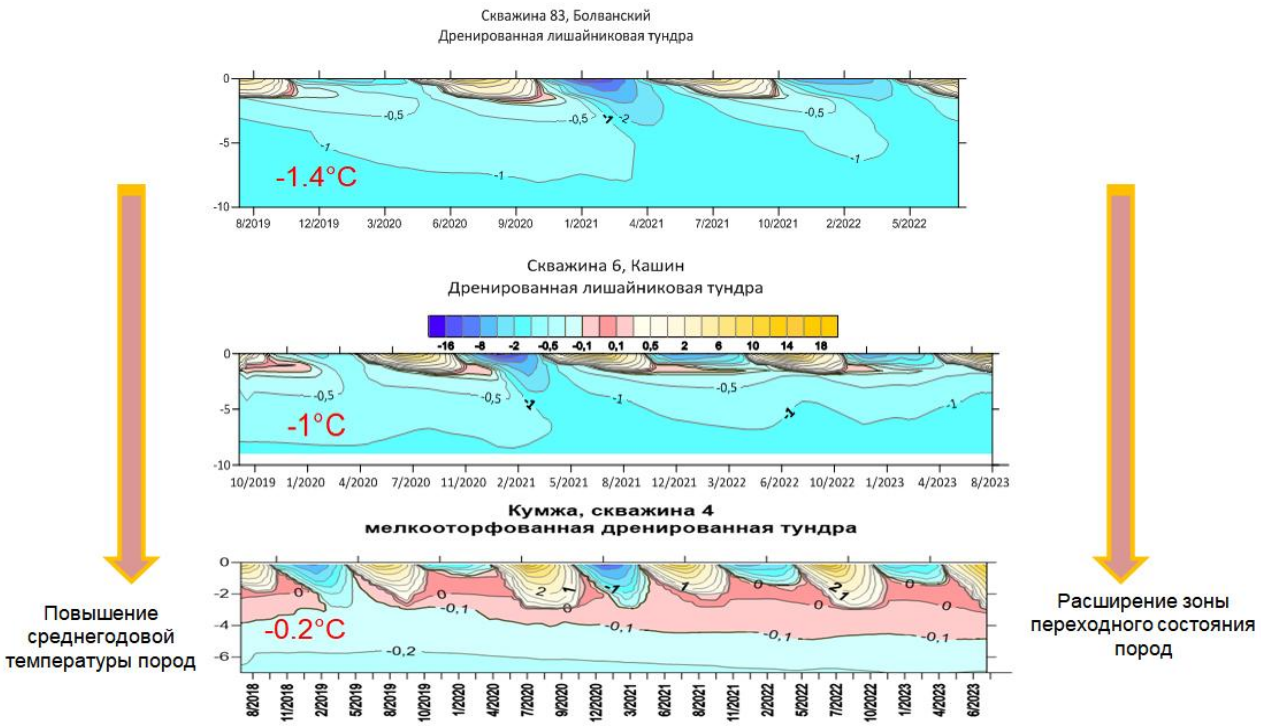

Рис. 6. Результаты температурного режима в скважинах

Для скважины 4 (площадка Кумжа), пробуренной на участке мелкоторфованной слабодренированной тундры, на графике термоизоплет 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 происходило формирование сливающегося типа мерзлоты. В остальные годы происходит расширение зоны переходной температуры пород от -0.1 до +0,1°С, что приводит к образованию мерзлоты несливающегося типа. Среднегодовая температура ММП на глубине 7-8 м составляет -0.2°С, а ЯГТО – всего 3-4 м. При дальнейшем повышении среднегодовой температуры воздуха возможно дальнейшее оттаивание мерзлоты с поверхности и формирование несквозного талика.

Изучение динамики деятельного слоя (слоя сезонного протаивания/промерзания) является важной задачей геокриологического мониторинга. Мощность деятельного слоя характеризуется большой изменчивостью в пространстве и времени. Фактические данные о мощности деятельного слоя оказываются необходимыми в качестве опорных сведений о динамике сезонного протаивания и реакции деятельного слоя на изменения природных характеристик.

Положение кровли мерзлоты и межгодовая изменчивость глубины сезонного протаивания изучается на трех площадках Европейского севера (Болванский, Кашин, Кумжа), входящих в международную сеть CALM. До глубины 1,5 - 2,0 м протаивание определяется с помощью металлического щупа. При бóльших глубинах залегания кровли ММП и на участках таликов хорошо себя зарекомендовала георадарная съемка и сейсмические методы [*Садуртдинов и др., 2017; Sudakova, et al., 2017*].

На площадке CALM R24 (Болванский) глубина протаивания постепенно увеличивается год от года. После 2012 г. на многих пикетах сетки глубина СТС стала превышать 150 см, что в условиях суглинистого разреза с примесью крупнообломочного материала делает измерение щупом физически невозможным или недостаточно точным. Если до 2012 года глубина протаивания измерялась практически на всей площадке (на 112-115 пикетах), за исключением несквозного талика в пределах закустаренного склона и краевой части озерной котловины, то в 2020 г удалось измерить глубину протаивания на 74 пикетах, а в 2022 году лишь на 59 пикетах (рис. 7).

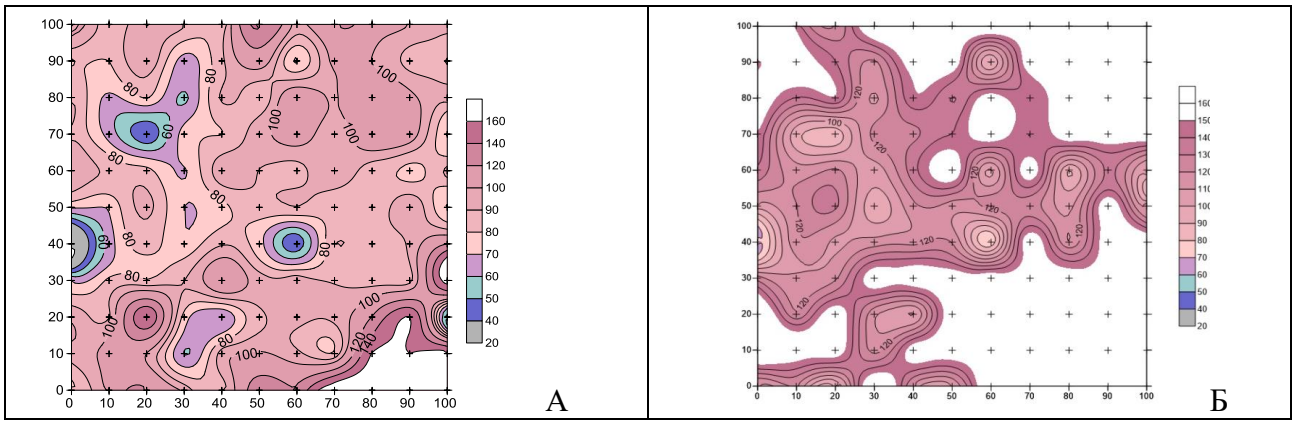

Рис. 7. Глубина протаивания пород на площадке CALM R-24 (Болванский) в 2017 г (А) и в 2022 г (Б)

График межгодовой измененчивости глубины СТС показывает очень несущественный тренд 0,12 см/год. Такое значение тренда нельзя считать достоверным и истинным показателем современной геокриологической обстановки. Это связано с тем, что на большей половине площадки глубина протаивания уже превышает возможности ее измерения щупом и не учитывается при расчетах среднего значения (рис. 8). После 2022 г. измерения глубины протавиания пород щупом на площадке R-24 (Болвансикй) не проводятся.

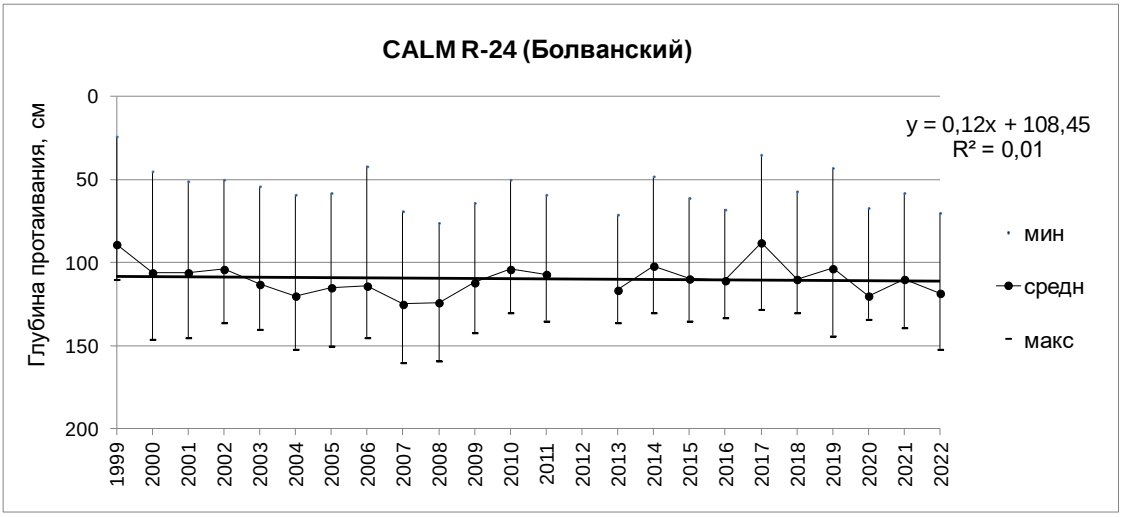

Рис. 8. Межгодовая изменчивость глубины протаивания пород на площадке CALM R-24 (Болванский)

На площадке CALM R-24A (Кашин) ежегодные измерения проводятся по всем 121 точкам сетки, начиная с 2010 года. Обобщение данных межгодового изменения глубины протаивания приводится в среднем по всей площадке CALM (рис.9).

В 2010 г. средняя глубина протаивания на площадке Кашин составляла 60 см. В 2023 году на площадке CALM была зафиксирована максимальная глубина протаивания по сравнению с предыдущими годами, она достигла 140 см. Этому способствовали теплое лето 2023 г. и предшествовавшая многоснежная зима 2022/2023 гг. Но в короткое и прохладное лето 2024 года средняя глубина протаивания составила всего 100 см. Таким образом, средний многолетний тренд увеличения глубины протаивания в данных ландшафтных условиях равен 3,8см/год.

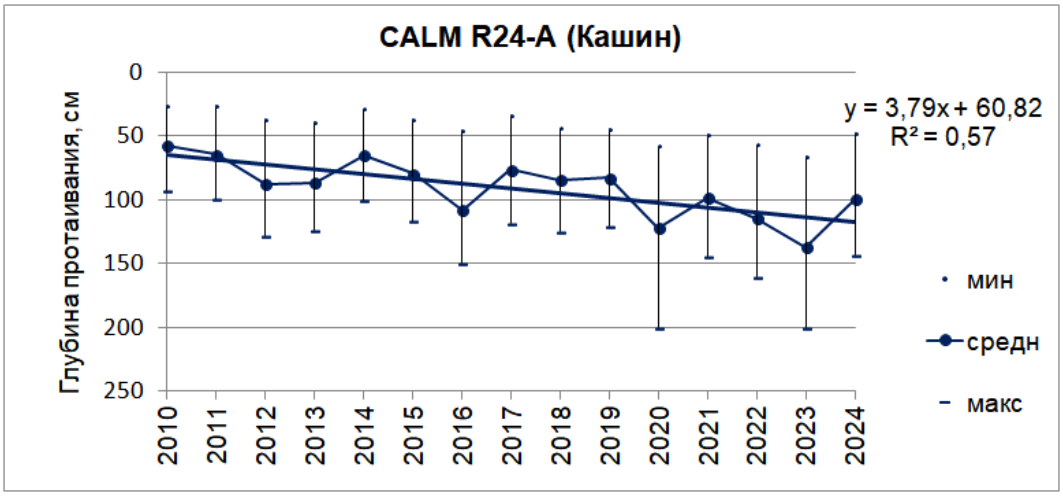

Рис. 9. Динамика глубины сезонного протаивания пород за 15-летний период мониторинга, площадка CALM R24-A, Кашин

Литологический состав СТС является важным фактором для формирования глубины СТС. Наличие в верхних частях разреза торфа на площадке CALM R24-A, Кашин, отличающегося хорошими теплоизолирующими свойствами, существенно уменьшает глубину протаивания ММП на локальных участках. Но увеличение глубины протаивания наблюдается повсеместно (рис. 10).

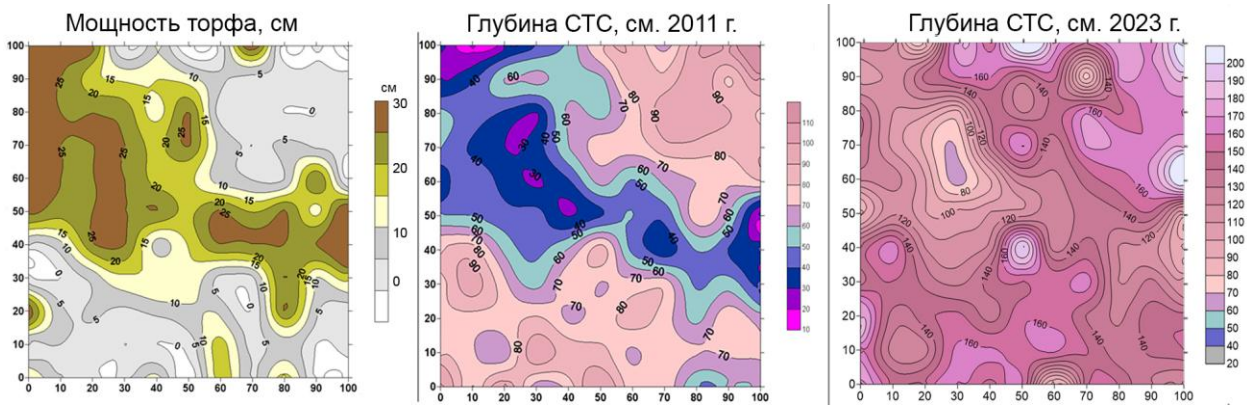

Рис. 10. Мощность торфа и изменчивость глубины протаивания пород на площадке CALM R24-A, Кашин

На площадке CALM R-24B (Кумжа) в условиях песчаного разреза до 2014 г использовался металлический щуп длиной 2 м и бурение зондировочных неглубоких скважин до кровли мерзлоты. Для контроля данных инструментального измерения глубины протавиания были привлечены геофизические методы – сейсмопрофилирование и георадарная съемка. По данным геофизических исследований в пределах практически всей площадки CALM R-24B (Кумжа) в 2015 г. начал формироваться несквозной талик, а глубина залегания кровли ММП изменялась от 2 до 8 м (рис. 11)

Начиная с 2015 г. на этой площадке проводится регулярный геофизический мониторинг, который позволил определить скорости опускания кровли мерзлоты на каждом пикете и на опорных профилях в разные годы. Подробнее этот вид мониторинга, его возможности и результаты опубликованы [*Садуртдинов и др., 2017; с. 81; Sudakova, et al., 2017*]. Средняя скорость опускания кровли мерзлоты составляет 25 см/год.

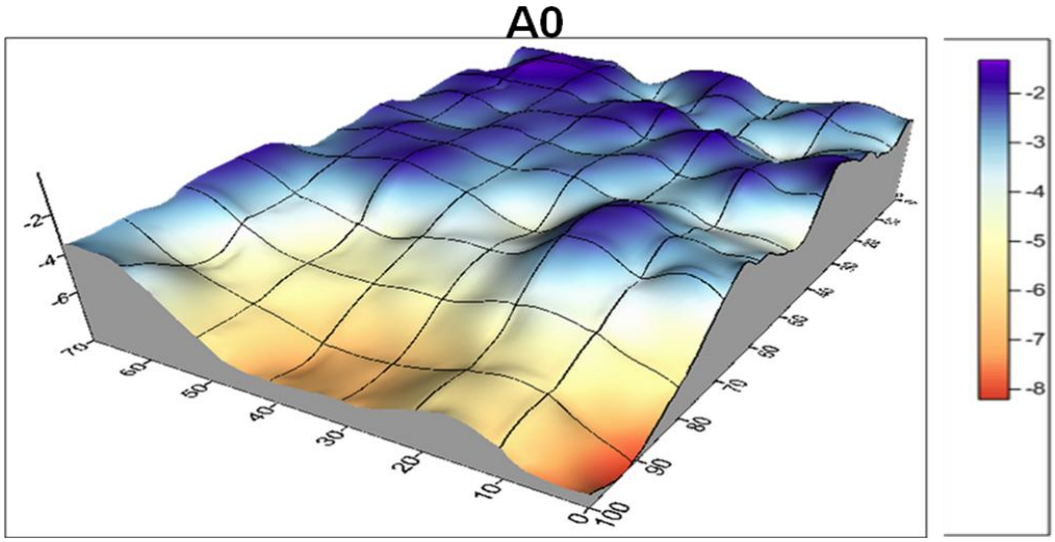

Рис. 11. Глубина залегания кровли ММП на площадке CALM R-24B (Кумжа), полученная с помощью геофизических методов

Таким образом, для Европейской территори Российской Арктики важнейшим последствием потепления климата является изменение температурного режима ММП, повышение их среднегодовой температуры, сокращение глубины ЯГТО, в некоторых случаях формирование горизонтов нестабильного (переходного) состояния, переход температуры к положительным значениям и опускание кровли мерзлоты. На площадках CALM Европейского севера мы наблюдаем многолетний положительный тренд глубины протаивания ММП. Величина тренда существенно отличается в разных ландшафтных условиях. В последнее десятилетие наблюдается значительное увеличение мощности слоя сезонного протаивания. К 2020-2023 гг. глубина протаивания ММП достигла своей критической величины, а в отдельных ландшафтных условиях начали формироваться несквозные талики и мерзлые толщи несливающегося типа. Дальнейшие наблюдения позволят установить, насколько устойчивы и неизменны наметившиеся тенденции изменения мерзлоты, является ли деградация необратимой или мерзлота еще восстановится.

ЛИТЕРАТУРА

Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Мельников В.П., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Судакова М.С., Царев А.М. Геокриологический мониторинг и динамика криогенных геосистем Ненецкого автономного округа / Сборник докладов Шестой конференции геокриологов 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.

Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Судакова М.С., Царев А.М., Малкова Г.В. Использование сейсмических и георадиолокационных методов при геокриологических исследованиях // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН, 2017, № 4, с.75-85. (In Russian).

Malkova G., 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

Sudakova M., Sadurtdinov M., Skvortsov A., Tsarev A., Malkova G., Molokitina N., Romanovsky V. Using Ground Penetrating Radar for Permafrost Monitoring from 2015-2017 at CALM Sites in the Pechora River Delta // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Is. 16, 3271 doi:10.3390/rs13163271

STUDYING THE CURRENT STATE OF THE UPPER PERMAFROST HORIZONS AT THE CRYOLITHOZONE MONITORING SITES OF THE EUROPEAN TERRITORY OF RUSSIA

Malkova G.V., Tsarev A.M.

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

The results of expedition observations of the permafrost temperature and thawing depth of the European territory of Russia are presented. It has been established that the most important consequence of climate warming is a change in the temperature regime of permafrost, an increase in their average annual temperature, and a decrease in the depth of zero annual amplitude. The trend of the average annual air temperature over the past 30 years for different weather stations of the ETR varies from 0.08°C/year to 0.12°C/year. Permafrost temperature trends always lag behind air temperature trends and vary from 0.01°C/year to 0.04°C/year. In the areas of the island permafrost, the formation of horizons of an unstable (transitional) state of the permafrost is observed, the transition of grund temperature to positive values and the lowering of the permafrost roof. Against the background of climate warming, the depth of thawing of permafrost is increasing everywhere.

Keywords: *permafrost rocks, temperature regime, trends air temperature, thawing depth*

REFERENCES:

Malkova G., 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., 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 doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130 (In Russian).

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).

Sadurtdinov M.R., Skvortsov A.G., Sudakova M.S., Tsarev A.M., Malkova G.V. The use of seismic and geo-radar methods in geocryological studies // Bulletin of the North-Eastern Scientific Center of the FEB RAS, 2017, No. 4, pp.75-85. (In Russian).

Sudakova M., Sadurtdinov M., Skvortsov A., Tsarev A., Malkova G., Molokitina N., Romanovsky V. Using Ground Penetrating Radar for Permafrost Monitoring from 2015-2017 at CALM Sites in the Pechora River Delta // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Is. 16, 3271 doi:10.3390/rs13163271