

doi:10.24411/2687-1092-2019-10603

## СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ЭВОЛЮЦИИ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

<sup>1,2</sup> Васильев А.А., <sup>3</sup> Никитин К.А., <sup>3</sup> Стрелецкая И.Д., <sup>1,2</sup> Облогов Г.Е., <sup>1</sup> Задорожная Н.А.

<sup>1</sup> Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет

<sup>3</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова

Приведены обобщенные результаты многолетнего геокриологического мониторинга на восьми стационарах в западном секторе Российской Арктики. Повышение среднегодовой температуры воздуха составило около 2.8 °С (1970-2018 гг.). Получены данные о динамике среднегодовой температуры в сезонно-талом слое и толще многолетнемерзлых пород доминантных ландшафтов в различных биоклиматических зонах: типичной тундре, южной тундре, лесотундре и северной тайге. Предложено выделять три стадии устойчивости мерзлоты по отношению к потеплению климата – устойчивая мерзлота, неустойчивая мерзлота и мерзлота в стадии активной деградации.

Ключевые слова: *многолетнемерзлые породы, температура пород, деградация мерзлоты, кровля мерзлоты*

Криолитозона играет важную роль в глобальных изменениях климата, балансе парниковых газов, изменениях арктических экосистем и условий природопользования в арктических регионах. [Hinzman et al., 2005; Romanovsky et al., 2010 и др.]. В связи с этим в последние десятилетия проблема деградации мерзлоты при потеплении климата в Арктике стала приоритетной. Потепление климата в западном секторе Российской Арктики фиксируется после 1970 г. Здесь наблюдается повышение температуры воздуха в среднем для региона на 2.8 °С и увеличение продолжительности теплого периода, изменение количества атмосферных осадков, возрастание толщины снежного покрова [Павлов, Малкова, 2005].

Вследствие комплексного воздействия климатических факторов на мерзлые толщи в последние 40-50 лет повышается температура многолетнемерзлых пород (ММП), увеличивается мощность сезонно-талого слоя [Васильев и др., 2008]. В научной литературе преимущественно приводятся данные о повышении температуры мерзлых пород, южной границе их распространения, но практически отсутствуют реальные сведения о деградации криолитозоны.

Здесь мы анализируем результаты наблюдений за температурой мерзлых пород и их физическим состоянием на восьми геокриологических стационарах, охватывающих доминантные ландшафты в криолитозоне типичной тундры, южной тундры, лесотундры и северной тайги, – мыс Болванский и Кумжа (устье Печоры), Воркута (по данным Д.А. Каверина [Каверин и др., 2017]), Марре-Сале (Западный Ямал), северный и южный Уренгой, Надым и Тарко-Сале. Рассматривается наиболее критический вариант деградации криолитозоны, когда температура пород достигает 0 °С и начинается оттаивание мерзлых толщ сверху.

Длительные наблюдения за температурой многолетнемерзлых пород (ММП) в скважинах глубиной 10 м, в некоторых случаях до 15 м, позволяет проследить временной ход среднегодовой температуры ММП в доминантных ландшафтах основных биоклиматических зон на фоне потепления климата (Рис. 1).

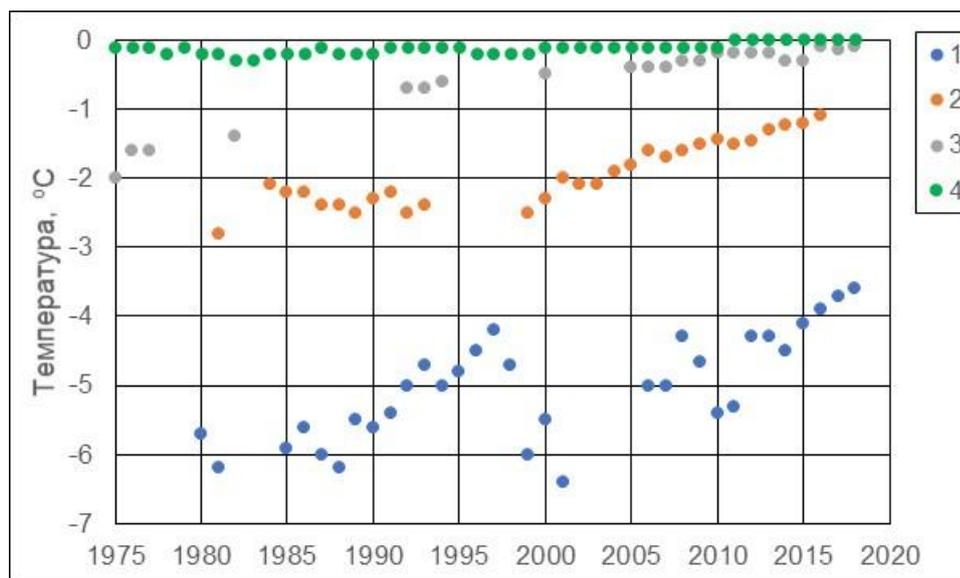


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры ММП в доминантных ландшафтах основных биоклиматических зон. 1-типичная тундра, 2-южная тундра, 3-лесотундра, 4-северная тайга.

Как видно из рисунка, вслед за повышением температуры воздуха наблюдается повышение среднегодовой температуры ММП во всех биоклиматических зонах. Скорость повышения среднегодовой температуры ММП в зоне типичной тундры составило  $0,056$  °C/год, в зоне южной тундры –  $0,04...0,05$  °C/год, в зоне лесотундры –  $0,045$  °C/год и в зоне северной тайги – менее  $0,03$  °C/год. В зоне северной тайги в некоторых ландшафтах среднегодовая температура пород стала положительной, здесь наблюдается опускание кровли мерзлоты на 4-6 м по сравнению с началом наблюдений. Опускание кровли на 8 - 10 м наблюдается и в зоне лесотундры на хорошо дренированных ландшафтах. В южной тундре среднегодовые температуры ММП приблизились к температуре фазовых переходов, но перешли ее только в самой верхней части разреза (не глубже 1 м). В зоне типичной тундры величины среднегодовой температуры ММП еще далеки от критических значений, и опускания кровли мерзлоты не наблюдается.

Анализ данных по среднегодовым температурам ММП, температурам в сезонном слое и физическом статусе пород позволяет оценить состояние криолитозоны применительно к западной части Российской Арктики. Криолитозона типичной тундры характеризуется низкими среднегодовыми температурами ММП и обычными величинами сезонного оттаивания. Здесь можно считать мерзлоту устойчивой. В южной тундре наблюдается приближение среднегодовых температур ММП к критическим значениям, в некоторых ландшафтах в верхней части разреза наблюдается ее переход к положительным величинам. Можно говорить, что здесь криолитозона находится на пороге деградации. В лесотундре среднегодовые температуры пород близки к температуре оттаивания или даже перешли к положительным значениям в верхней части разреза. В этой биоклиматической зоне началась деградация мерзлоты в дренированных ландшафтах и опускание ее кровли, вплоть до глубины 7-10 м (Рис. 2). В зоне северной тайги среднегодовые температуры находятся вблизи  $0$  °C, в верхних частях разреза они стали положительными. Здесь наблюдается активная деградация мерзлоты и опускание кровли до глубины 4 м.

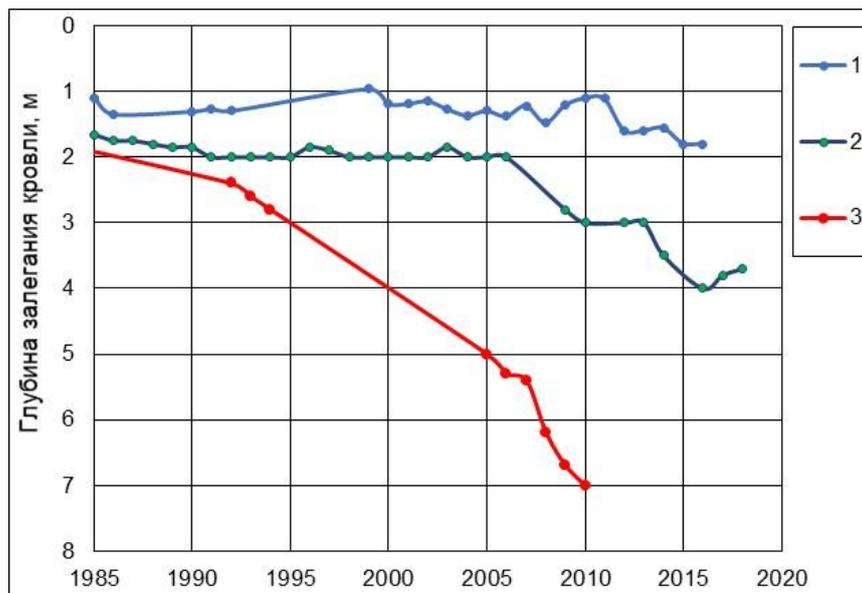


Рис. 2. Опускание кровли многолетнемерзлых пород во времени. 1-южная тундра, 2-северная тайга, 3-лесотундра.

Потепление климата вызвало и другие изменения в термическом режиме криолитозоны. Во всех биоклиматических зонах и во всех ландшафтах наблюдается сокращение амплитуды колебаний температуры на всех глубинах в пределах слоя годовых колебаний температуры. В качестве примера на Рис. 3 приведен ход температуры ММП на глубине 5 м в зоне типичной тундры.

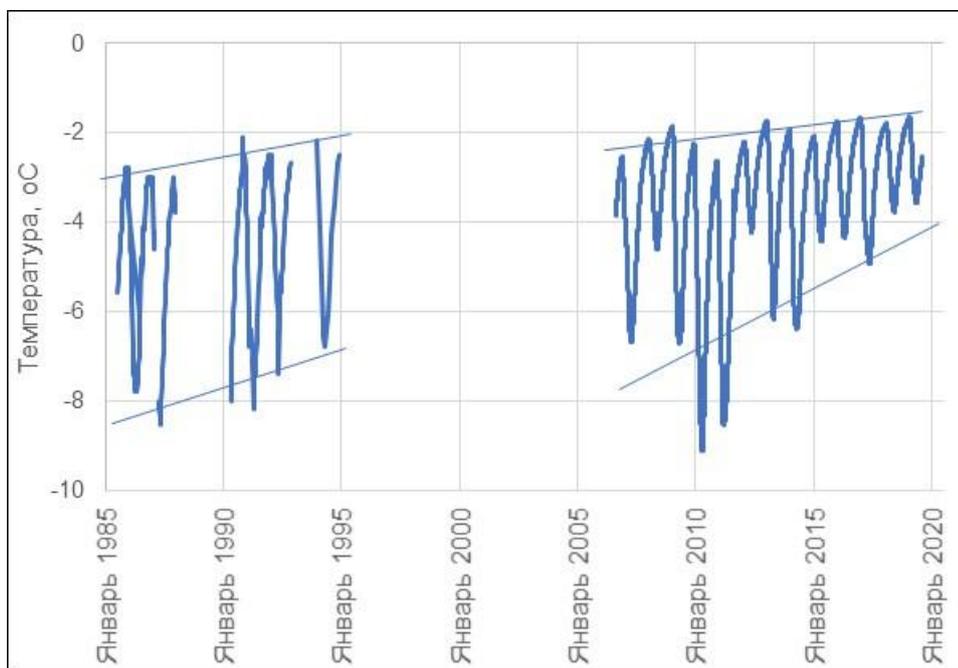


Рис. 3. Ход температуры ММП на глубине 5 м. Типичная тундра. Тонкими линиями показаны тренды максимумов и минимумов температуры.

Как видно из рисунка, наблюдается сокращение амплитуды температуры ММП после 2006 г. за счет сокращения минимальных значений. Известно, что амплитуда на любой глубине в пределах слоя годовых колебаний температуры пропорциональна амплитуде на

поверхности и обратно пропорциональна величине снежного и растительного покровов и влажности грунтов сезонно-талого слоя.

Анализ суточных температур воздуха показал, что амплитуда температур воздуха, начиная с 1970-х годов, остается практически неизменной и составляет около 56 °С. Снежный покров в этот же период увеличился с 20 см до 55-70 см. Растительный покров откликается на потепление климата увеличением высоты растительности и возрастанием проективного покрытия. Наблюдения показали, что высота важнейшей компоненты растительного покрова (сфагнома) возросла с 2 см (1978 г.) до 6 см (2018 г.), проективное покрытие увеличивалось с 16 % до 24 %. Суммарное содержание влаги в сезонно-талом слое изменялось мало и разнонаправленно.

Итак, главными причинами сокращения амплитуды температуры ММП являются возрастание величины снежного покрова и приращение моховой растительности. Снижение амплитуд температуры ММП неизбежно должно привести к сокращению глубины слоя нулевых годовых амплитуд, однако пока количественные данные этого показателя не получены.

Таким образом, анализ полученных данных и оценка современных трендов эволюции криолитозоны Западной Арктики за последние почти 50 лет показали, что здесь происходят критические изменения в мерзлоте вплоть до оттаивания мерзлоты сверху до глубины 4-10 м. В разных биоклиматических зонах деградация мерзлоты происходит по-разному: в северной и типичной тундре деградация мерзлоты практически не происходит, в южной тундре процесс деградации только начался и будет развиваться в ближайшие десятилетия, в лесотундре и северной тайге происходит активная деградация мерзлоты, опускание ее кровли и переход ранее мерзлых пород в талое (не мерзлое) состояние. При этом резко снижается несущая способность и устойчивость фундаментов зданий и сооружений, возникают риски недопустимых деформаций и даже разрушения конструкций. На основе наблюдений создана оценочная карта-схема состояния мерзлоты западного сектора Российской Арктики (Рис. 4).

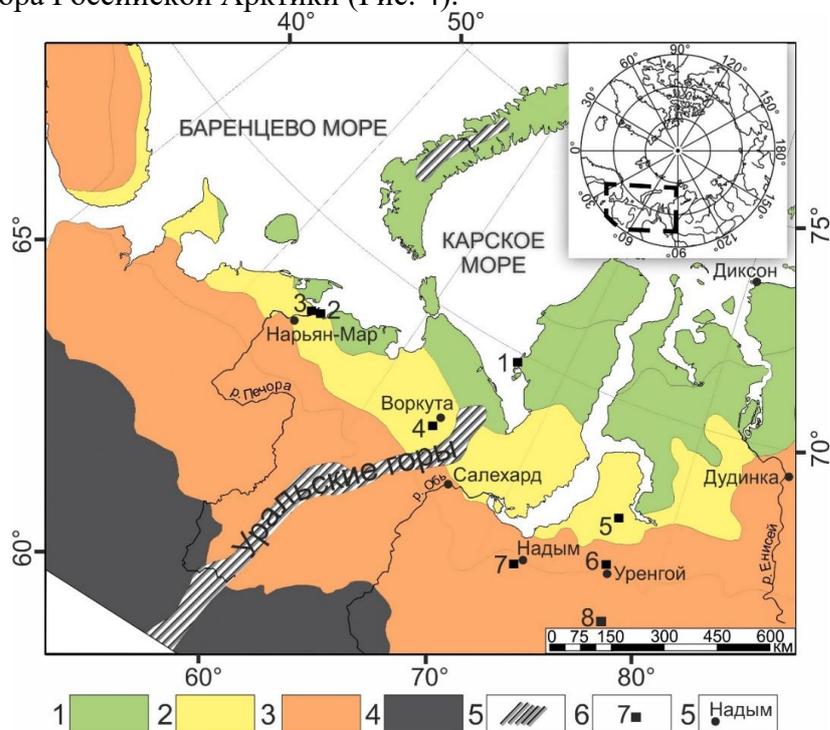


Рис. 4. Схематическая карта состояния криолитозоны Западной Арктики. Условные обозначения: 1- устойчивая криолитозона, 2-неустойчивая криолитозона, 3-активно деградирующая криолитозона, 4- область вне криолитозоны, 5-горные области, 6-участки наблюдений, 7- города.

На схеме зеленым цветом выделены регионы, в которых изменения в мерзлоте находятся в приемлемых рамках. Желтым отмечены регионы с начинающейся деградацией мерзлоты и снижающейся несущей способностью оснований и фундаментов. Оранжевым выделены регионы, в которых происходит активная деградация мерзлоты и опускание ее кровли на 4-10 м. Как видно из рисунка, все крупные города Западной Арктики находятся в зоне риска, здесь возможны недопустимые деформации и даже разрушения зданий и сооружений.

Мониторинг температурного режима мерзлых пород на стационарных участках проводится в рамках госзадания, согласно Плану НИР ТюмНЦ СО РАН на 2018-2020 годы, протокол № 2 от 08.12.2017 г. Анализ и интерпретация трендов, условий и темпов деградации мерзлоты выполнены при поддержке гранта РФФИ 18-05-60004, изучение влияния климатических изменений на растительный покров поддержано грантом РФФИ 18-55-11005, изучение закономерностей развития криогенных процессов выполнено при поддержке гранта РФФИ 18-05-60080.

#### ЛИТЕРАТУРА

*Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г.* [Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменением климата](#) // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 2. С.10-18.

*Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б.* [Динамика глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв \(на примере площадки циркумполярного мониторинга деятельного слоя в Европейской России\)](#) // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 6. С. 35-44.

*Павлов А.В., Малкова Г.В.* Современные изменения климата на севере России. Новосибирск, Академ. Изд-во ГЕО, 2005, 80 с.

*Hinzman, L.D., Bettez, N.D., Bolton, W.R., Chapin, F.S., Dyurgerov, M.B., Fastie, C.L., Griffith, B., Hollister, R.D., Hope, A., Huntington, H.P.* [Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other arctic regions](#) // Climatic Change. 2005. Vol. 72. Is. 3. P. 251-298.

*Romanovsky, V., Drozdov, D., Oberman, N., Malkova, G., Kholodov, A., Marchenko, S., Moskalenko, N., Sergeev, D., Ukraintseva, N., Abramov, A., Vasiliev, A.* [Thermal state of permafrost in Russia](#) // Permafrost Periglacial Process. 2010. Vol. 21. Is. 2. P. 136-155.

#### CONTEMPORARY TRENDS OF THE PERMAFROST EVOLUTION IN WESTERN RUSSIAN ARCTIC UNDER CLIMATE CHANGES

<sup>1,2</sup> Vasiliev A.A., <sup>3</sup> Nikitin K.A., <sup>3</sup> Streletskaya I.D., <sup>1,2</sup> Oblogov G.E., <sup>1</sup> Zadorozhnaya N.A.

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Cryosphere of Tyumen Scientific Center of SB RAS

<sup>2</sup> Tyumen State University

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University

The results of long-term monitoring at eight geocryological stations in the western sector of the Russian Arctic are presented. The increase in the mean annual air temperature is about 2.8 °C (1970-2018). Recent data of the mean annual temperature in the active layer and Permafrost in all dominant landscapes of typical tundra, southern tundra forest-tundra and northern taiga zones is obtained. Proposed to distinguish three stages of permafrost stability in connection with climate warming – stable, unstable and active degrading Permafrost

Keywords: *permafrost, ground temperature, permafrost degradation, permafrost table*