

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-471-475



## ПРОМЕРЗАНИЕ СЕЗОННО-ТАЛОГО СЛОЯ ГРУНТА В ГРЕНДАЛЕНЕ (ЗЕМЛЯ НОРДЕНШЕЛЬДА, ОСТРОВ ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН)

✉ Богородский П.В.<sup>1</sup>, Борисик А.Л.<sup>1</sup>, Сидорова О.Р.<sup>1</sup>

ФГБУ «АНИИ», Санкт-Петербург, Россия

✉ bogrodski@aari.ru

Представлены результаты геокриологических наблюдений зимой 2023/24 г. в Грендалене (Земля Норденшельда, о. Западный Шпицберген). Описаны и проанализированы особенности сезонной эволюции термической структуры грунта. Получены количественные оценки динамики промерзания оттаявшего за лето верхнего слоя вечной мерзлоты в зависимости от характеристик атмосферы, снежного покрова и грунта. На основании результатов измерений и моделирования сделан вывод о её термической стабильности в районе наблюдений. Рассчитаны величины значений входных параметров, соответствующих образованию несливающейся мерзлоты.

Ключевые слова: *Шпицберген, многолетняя мерзлота, сезонно-талый слой, наблюдения, моделирование*

За последние 100 лет увеличение приземной температуры воздуха на Западном Шпицбергене составило 3,7 °С, в три раза превысив прогнозируемое глобальное значение [Hanssen-Bauer et al., 2019]. Это привело к росту температуры многолетнемерзлых грунтов (ММГ) и возрастанию глубины сезонно-талого слоя (СТС) в течение последних 20 лет примерно на 25–30 см, т.е. около 1,5 см/год [Etzelmüller et al., 2011]. При дальнейшем сохранении темпов потепления, деградация многолетнемерзлых грунтов (ММГ), вызванная неполным промерзанием СТС и формированием несливающейся мерзлоты, неизбежна [Котляков и др., 2020]. Её негативные последствия, как для экосистем островов, так и объектов их инфраструктуры, ставят прогноз сохранности мерзлоты архипелага в число приоритетных задач.

Цель настоящей работы — анализ влияния климатических параметров на температурный режим и темпы промерзания СТС в прибрежной зоне Земли Норденшельда.

Объектом исследования была выбрана долина реки Грен (Грендален) в 5 км к юго-востоку от поселка Баренцбург. Здесь, в мае 2022 г., у подножья лестницы морских абразионно-аккумулятивных террас, специалистами РАЭ-Ш АНИИ была пробурена геотермическая скважина глубиной 25 м (Научно-технический отчёт о работе сезонной экспедиции «Шпицберген» в 2022 г. (11.04-3.10.2022). Утверждён 7 марта 2023 г. Госфонд ФГБУ «АНИИ». № 0-4258. СПб, 2022. 169 с.), оборудованная термокосой КЦТ-01 (ООО «МГУ-геофизика», Севастополь). Измерения температуры грунтов с дискретностью 6 часов осуществляются по 32-м датчикам, размещённым на расстоянии 0,2–0,4 м друг от друга в верхней части термокосы и 1–2 м в нижней.

Ландшафт района характерен для арктических пустынь с присущими им низкими температурами воздуха, частыми циклами замерзания–оттаивания грунта и скудной растительностью с преобладанием мохообразных (бриофитов) [Демидов и др., 2016]. Верхний двухметровый слой грунта представлен гравелистым суглинком с включениями гальки (40–50%) и низким содержанием органических веществ [Демидов и др., 2016]. Несмотря на осадки, из-за постоянных ветров снежный покров (снег) обычно отсутствует.

К анализу привлекались данные наблюдений зимой 2023/24 г., продолжительностью  $t_w=225$  сут. (16.09.2023–27.04.2024) и средней температурой воздуха  $T_a=-7,7$  °С (рис. 1), типичной для современных метеоусловий Западного Шпицбергена [Котляков и др., 2020]. По-видимому, столь же типичным оказалось соответствующее распределение

температуры грунта (рис. 1), минимальные значения которой достигали  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , косвенно свидетельствуя об отсутствии теплоизоляционных слоёв на поверхности. По этой же причине, полное промерзание СТС, имевшего к началу зимы глубину 1,3 м, заняло всего 11 сут. — с 16.09 по 27.09.2023.

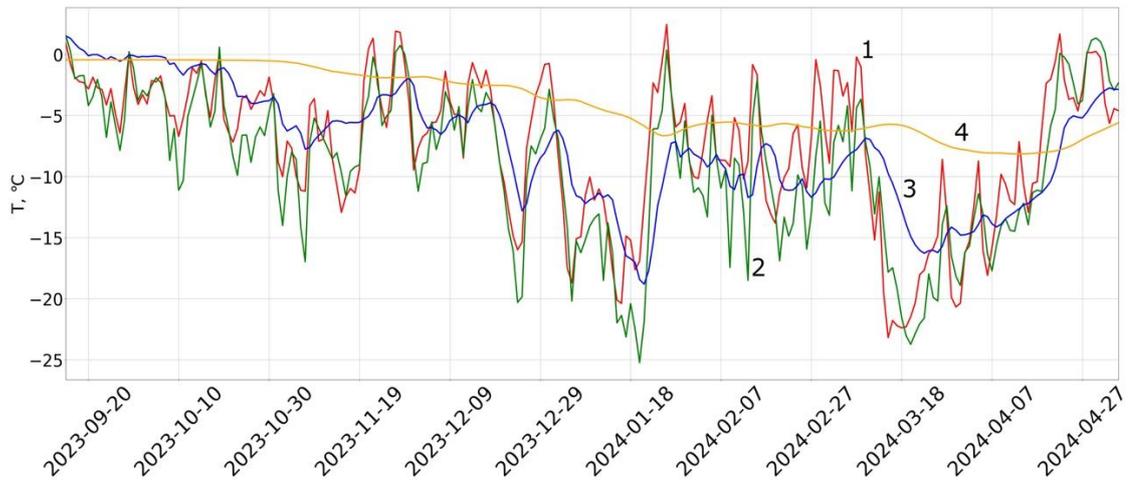


Рис. 1. Временной ход температуры воздуха на высоте 2 м в Баренцбурге (1) и в поверхностном слое грунта зимой 2023/24 г (2 – поверхность, 3 – 0.5 м, 4 – 1.5 м).

Приближённые оценки эволюции СТС рассчитывались по простой термодинамической модели на основе решения системы уравнений теплопроводности в автоматической постановке [Хабибуллин, Солдаткин, 2012]. Растительность, из-за её разреженности и незначительности влияния на процесс промерзания грунта [Котляков и др., 2020] полагалась отсутствующей. Промерзание слоя грубодисперсного грунта глубиной  $h_0$  происходит по корневой зависимости от времени при температуре фазового перехода вода-лёд (такую же температуру имеет талый слой) на двух фронтах,  $h_1$  (верхнем) и  $h_2$  (нижнем), с одновременной аккумуляцией снега толщиной  $h_s$  (рис. 2). Время полного промерзания СТС  $t^*$  и его глубины  $h_1^*$  даётся координатами точек пересечения кривых  $h_1(t)$  и  $h_2(t)$ .

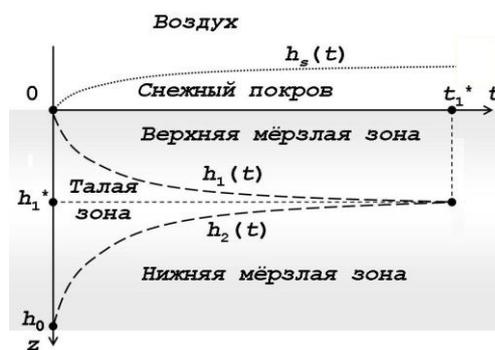


Рис. 2. Схема промерзания СТС.

Входными параметрами задачи являются температура воздуха  $T_a$ , мерзлоты  $T_{inf}$  и высоты снежного покрова  $h_s^{max}$ , а также влажность  $W$ , теплопроводность и температуропроводность грунта ( $k_m$  и  $C_m$ ) и снега ( $k_s$  и  $C_s$ ), максимальная глубина кровли мерзлоты  $h_0$ . Наименее известными из них, несмотря на описания (см., напр., [David et al., 2016] и приведённые там ссылки), являются теплофизические характеристики почвогрунтов Грендалена. Поэтому вместо них, в расчётах использовались параметры гравийно-галечных грунтов полярных пустынь Брёггерхалвея в 10 км к северо-западу от

Нью-Олесуна [Putkonen, 1998], как наиболее близкие по структуре к грунтам долины реки Грен. В качестве внешнего форсинга использовались осреднённые за зиму 2023/24 г значения температуры приземного воздуха на метеостанции Баренцбург [сайт [http://rp5.ru/archive.php?wmo\\_id=20107](http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=20107)] и толщи мерзлоты на станции в Янссонхаугене [сайт <https://mosj.no/en/indikator/climate/land/permafrost/>]. Продолжительность снегонакопления  $\tau_w$  равнялась продолжительности холодного периода  $t_w$ . Характеристики снега вычислялись по известным зависимостям от плотности [Котляков и др., 2020]. Значение  $\rho_s$  задавалась также по [Котляков и др., 2020], значение  $h_0$  – глубиной нулевой изотермы. В итоге в качестве базовых были приняты значения  $\tau_s=225$  сут.,  $\rho_s=300$  кг/м<sup>3</sup>,  $T_a=-7,7$  °C,  $T_{inf}=-4,5$  °C,  $h_0=1,3$  м,  $h_s^{max}=0,01$  м,  $k_m=3$  Вт/(м°C);  $C_m=2,1 \times 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>,  $k_s=0,24$  Вт/(м°C);  $C_s=6,27 \times 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>,  $W=0,125$ ,  $L=336 \times 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>, достаточно близкие к своим климатическим величинам и справочным данным [Котляков и др., 2020].

Численные эксперименты осуществлялись для вариаций каждой из шести входных величин  $T_a$ ,  $T_{inf}$ ,  $h_s^{max}$ ,  $h_0$ ,  $W$  и  $k_m$ , при сохранении остальных пяти базовыми. Последние дают величины  $t^*=13,759$  сут. и  $h^*=0,837005$  м, что достаточно близко к данным измерений. Как видно, рассчитанное время промерзания оказалось несколько выше измеренного, вероятно, из-за пониженного влагосодержания верхних слоёв грунта, которое отмечалось при криолитологическом анализе выбуренных кернов [Научно-технический отчёт, 2022].

Примеры результатов расчётов для вариаций значений  $T_a$  и  $h_0$  приведены на рис. 3. Как видно, уменьшение температур  $T_a$  с  $-5,5$  до  $-9,5$  °C приводит к соответствующему увеличению времени  $t^*$  с 8 до 23 сут. (рис. 3а). В отсутствие снега все возможные вариации температур границ в интервале их величин, наблюдаённых за 20 лет, оставляют мерзлоту устойчивой. В то же время увеличение глубин  $h_0$  с 1 до 2 м влечёт возрастание  $t^*$  с 9 до 33 сут., соответственно (рис. 3б). Расчёты показывают, что несмотря на существенную зависимость величины  $t^*$  от значений  $W$ , рост которого от 0,1 до 0,2 хотя и увеличил  $t^*$  с 5 до 35 сут., за счёт тепловыделения при фазовых переходах на обоих фронтах и, следовательно, одновременного воздействия на обе мёрзлые зоны, оставил мерзлоту стабильной. Зависимость промерзания СТС от роста значения  $k_m$  от 2 до 4 оказалась не столь существенной, хотя и уменьшилась при этом в 2 раза от 20 до 10 сут.

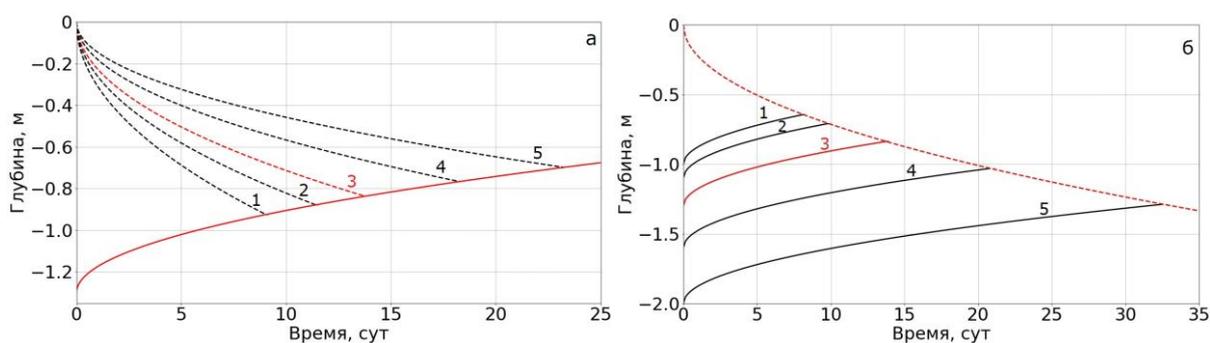


Рис. 3. Динамика фронтов промерзания  $h_1$  (пунктир) и  $h_2$  (сплошная) по данным расчётов при  $T_a=-9,5$  (1),  $-8,5$  (2),  $-7,7$  (3),  $-6,5$  (4),  $-5,5$  °C (5) (а) и  $h_0=1$  (1),  $1,1$  (2),  $1,3$  (3),  $1,6$  (4),  $2$  м (5) (б). Красные кривые соответствуют базовым значениям входных параметров.

Таким образом, зимой 2023/24 г. многолетняя мерзлота оказалась термически устойчива даже при достаточно существенных вариациях входных параметров. Расчёты показывают, что при сохранении температур границ СТС и теплофизических свойств снега и грунта базовыми, неполное промерзание СТС возникает только при  $h_s^{max}>1,2$  м,  $W>0,2$  и  $h_0>1,5$  м. Критическими значениями могут быть величины  $W=0,2$ ,  $h_s^{max}=1,5$  м и  $h_0=1,5$  м, которые достаточно близки к модельным величинам, полученными в [Котляков и др., 2020], или их комбинации, компенсирующие вариации друг друга (например, 0,2 м,

1,25 м, и 1,75 м или 0,25 м, 1,5 м и 1,25 м). Таким образом, в условиях крайне неравномерного распределения снега в ландшафтах Западного Шпицбергена, сохранение мерзлоты возможно на возвышенных участках рельефа и напротив, её деградация, во впадинах. При этом в противоположность моховому покрову, наличие глубокого снега зимой может служить признаком возможного сохранения прослойки талого грунта в подповерхностных слоях ММГ.

Результаты исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

-несмотря на все упрощения, присущие автотомодельному подходу, термодинамическая модель промерзания СТС, позволяет получить количественные и качественные оценки процесса, достаточно близкие к значениям как наблюдаемым, так и полученным ранее в результате моделирования;

-в отсутствие слоёв снега и растительности многолетняя мерзлота Грэндалена термически устойчива в широком диапазоне входных параметров задачи. Образование несливающейся мерзлоты в современных климатических условиях и, близких к средним, параметрах промерзающих слоёв возможно только при наличии глубокого снежного покрова;

-для улучшения качества численных расчётов необходимо получение экспериментально обоснованных величин теплофизических свойств и влажности грунтов и растительности в исследуемом районе.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (Соглашение №169-15-2023-001 от 01.03.2023 года Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды).

## ЛИТЕРАТУРА

*Демидов Н.Э., Караевская Е.С., Веркулич С.Р., Никулина А.Л., Саватюгин Л.М.* Первые результаты мерзлотных наблюдений на криосферном полигоне Российского научного центра на архипелаге Шпицберген (РНЦШ) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. №4 (110). С. 67-79.

*Котляков В.М., Осокин Н.И., Сосновский А.В.* Динамика сезонно-талого слоя на Шпицбергене и Антарктическом полуострове в XXI в. по результатам моделирования // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 201–212. doi: 10.31857/S2076673420020034.

*Хабибуллин И.Л., Солдаткин М.В.* Динамика промерзания сезонного-талого слоя криолитозоны с учетом наличия снежного покрова // Вестник Башкирского университета. 2012. Т. 17. №2. Р. 843-846.

*Etzelmüller B., Schuler T. V., Isaksen K., Christiansen H. H., Farbrøt H., Benestad R.* Modeling the temperature evolution of Svalbard permafrost during the 20th and 21st century // The Cryosphere. 2011. Vol. 5. Is. 1. P. 67-79. doi: 10.5194/tc-5-67-2011

*Hanssen-Bauer I., Førland E.J., Hisdal H., Mayer S., Sandø A.B., Sorteberg A.* (eds), 2019. Climate in Svalbard 2100 - a knowledge base for climate adaptation. Norway, Norwegian Centre of Climate Services (NCCS) for Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet). 208pp. (NCCS report 1/2019).

*Iavid E.Ia., Kondakova V.N., Polyakov V.I., Abakumov E.V.* Diversity and main properties of soils of the Gronfjord area (Svalbard archipelago) // Czech Polar Reports. 2018. Vol. 8. Is. 1. P.43-59. doi: 10.5817/CPR2018-1-4

*Putkonen J.* Soil thermal properties and heat transfer processes near Ny-Ålesund, northwestern Spitsbergen, Svalbard // Polar Research. 1998. Vol.17. No.2. P. 165-179. doi: 10.3402/polar.v17i2.6617

## **FREEZING OF SEASONALLY THAWED SOIL LAYER IN GRØNDALEN (WESTERN SPITSBERGEN)**

*Bogorodsky P.V., Borisik A.L., Sidorova O.R.*

Arctic and Antarctic Research Institute, St.Petersburg, Russia

The results of permafrost thermal observations during the Winter 2023/24 in Grøndalen (Nordenskiöld Land, Western Spitsbergen) are presented. The features of seasonal changes in the thermal structure of the soil are described and analyzed. Using a thermodynamic model, quantitative estimates of the dynamics of freezing of the upper layer of permafrost thawed over the summer were obtained depending on the characteristics of the atmosphere, snow cover and soil. Based on the results of measurements and modeling, a conclusion was made about its thermal stability in the observation area. The values of the input parameters corresponding to the formation of non-merging permafrost are calculated.

Keywords: *Svalbard, permafrost, freezing, seasonally thawed layer, observations, modeling*

### **REFERENCES**

- Demidov N.E., Verkulich S.R., Karaevskaya E.S., Nikulina A.L., Savatyugin L.M.* First results of permafrost monitoring on the cryospheric site of Russian Scientific Center on Spitsbergen (RSCS) // Arctic and Antarctic Research. 2016. №4 (110). P. 67-79. (In Russian).
- Khabibullin I.L., Soldatkin M.V.* Dynamics of freezing of the seasonal thawed permafrost layer taking into account the presence of snow cover // Bulletin of the Bashkir University. 2012. Vol. 17. No.2. P. 843-846. (In Russian).
- Kotlyakov V.M., Osokin N.I., Sosnovsky A.V.* Dynamics of seasonally thawed layer on Svalbard and the Antarctic Peninsula in the XXI century according to modeling data // Ice and Snow. 2020. Vol. 60. No.2. P. 201–212. (In Russian). doi: 10.31857/S2076673420020034.
- Etzelmüller B., Schuler T. V., Isaksen K., Christiansen H. H., Farbrøt H., Benestad R.* Modeling the temperature evolution of Svalbard permafrost during the 20th and 21st century // The Cryosphere. 2011. Vol. 5. Is. 1. P. 67-79. doi: 10.5194/tc-5-67-2011
- Hanssen-Bauer I., Førland E.J., Hisdal H., Mayer S., Sandø A.B., Sorteberg A.* (eds), 2019. Climate in Svalbard 2100 - a knowledge base for climate adaptation. Norway, Norwegian Centre of Climate Services (NCCS) for Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet). 208pp. (NCCS report 1/2019).
- Iavid E.Ia., Kondakova V.N., Polyakov V.I., Abakumov E.V.* Diversity and main properties of soils of the Gronfjord area (Svalbard archipelago) // Czech Polar Reports. 2018. Vol. 8. Is. 1. P.43-59. doi: 10.5817/CPR2018-1-4
- Putkonen J.* Soil thermal properties and heat transfer processes near Ny-Ålesund, northwestern Spitsbergen, Svalbard // Polar Research. 1998. Vol.17. No.2. P. 165-179. doi: 10.3402/polar.v17i2.6617