



РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОМЕТРИИ В ПЕРВЫХ СКВАЖИНАХ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ФОНОВОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ НА ШПИЦБЕРГЕНЕ И В НОРИЛЬСКЕ

✉ Гунар А.Ю.^{1,3}, Кошурников А.В.^{1,2}, Балихин Е.И.^{1,2}, Розенберг В.В.²

¹ ООО «МГУ-геофизика», Москва, Россия

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ ФГБУ «ААНИИ», Санкт-Петербург, Россия

✉ gunar@msu-geophysics.ru

В статье приводится анализ полученных данных термометрических наблюдений в скважинах г. Баренцбург и г. Норильск. В обоих районах прослеживается заметное повышение среднегодовой температуры воздуха, но при этом характер термометрических кривых для этих районов совершенно разный, что указывает, что геокриологические условия могут в отдельных случаях достаточно успешно противостоять потеплению климата. Приведен анализ данных участка с трендом на потепление климата (г. Баренцбург) и участка с аградирующими толщами многолетнемерзлых пород. В статье приводится подход к получению дополнительной информации из результатов наблюдений за температурой в мониторинговых скважинах.

Ключевые слова: *термометрия, потепление климата, температурная сдвигска, тепловое моделирование*

Первая (опытная) скважина государственного геокриологического мониторинга была пробурена в мае 2022 года в г. Баренцбург на арх. Шпицберген. Скважина пройдена всухую колонковым способом диаметром 108 мм на всю глубину. В скважину была установлена термометрическая коса сразу по окончанию бурения, соответственно на сегодня имеется архив наблюдений за более чем 2 года. Годовой цикл наблюдений в термометрической скважине открывает возможность получить данные о текущих условиях теплообмена на поверхности – в частности среднегодовая температура на поверхности в сочетании с данными метеостанции позволяет получить температурную поправку за счет наличия покровов (снежного и растительного), разница между среднегодовой температурой на поверхности пород и на подошве слоя сезонного оттаивания позволяет рассчитать температурную сдвигу и отношение теплопроводности в талом и мерзлом состояниях сезонно-талого слоя. Также глубина термометрической скважины в 25 метров позволяет не только оценить текущую геокриологическую обстановку, но и сделать качественный ретроспективный анализ о деградации или аграции мерзлых толщ в последние годы.

Рассмотрим подробно результаты температурных наблюдений в скважине Баренцбург (рис. 1).

По рисунку 1 видим, что глубина сезонного оттаивания составляет ~1,3 метра, глубина нулевых годовых колебаний около 6 метров. Температура на глубине нулевых годовых колебаний минус 3,25°C, при этом среднегодовая температура на подошве слоя сезонного оттаивания составляет минус 2,2°C, то есть имеется отрицательный температурный градиент в интервале глубин до 5-6 метров. Температурная сдвигка в слое сезонного оттаивания составляет 0,38°C. Слабо выраженный отрицательный градиент в пределах 0,1-0,2°C с глубины 15 метров сменяется на такой же слабый градиент, но положительного знака.

Наличие отрицательного градиента в верхней части разреза свидетельствует о текущем потеплении условий на дневной поверхности. Была выполнена в первом приближении оценка времени необходимого для формирования изгиба температурной кривой в верхней части разреза до глубины 5-6 метров. Для теплового моделирования

используем ПО QFrost [Песоцкий, 2013]. Годовой цикл наблюдений позволяет нам оперировать температурой на подошве слоя сезонного оттаивания, то есть исключить сезонное промерзание пород. Верхняя часть разреза сложена пластично-мерзлыми суглинками с интервалами суглинков сильнольдистых (рис. 2).

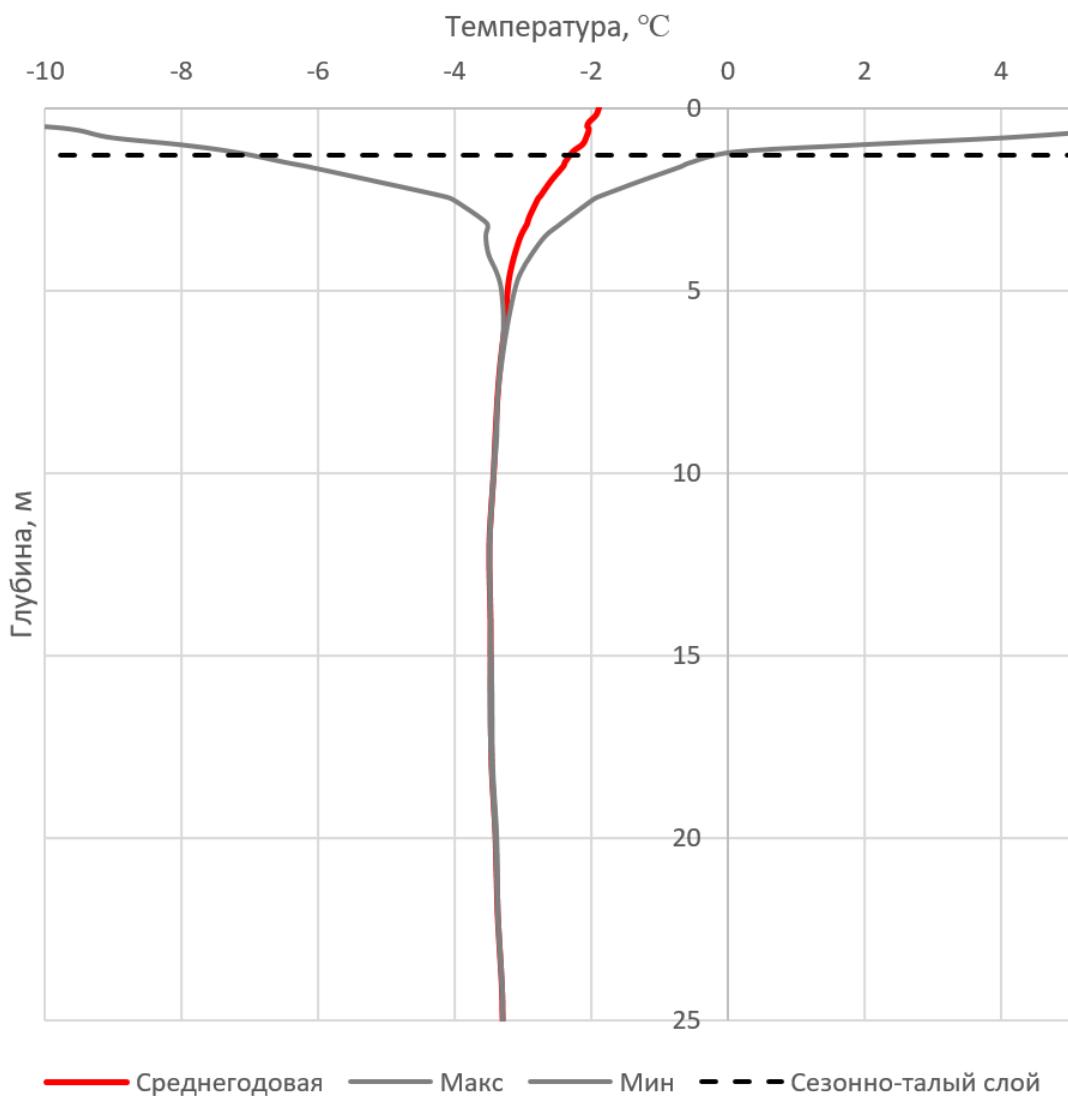


Рис. 1. Среднегодовое значение температуры пород по глубине и температурные огибающие за период с июля 2022 по июль 2023 года.

Таблица 1. Техногенные параметры суглинка, принятые в модели

№	Грунт	$C_f, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$C_{th}, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda_{th}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda_f, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$T_{th}, ^\circ\text{C}$	$W_w (-0,1^\circ\text{C}), \text{ д.е.}$	$W_w (-0,1^\circ\text{C}), \text{ д.е.}$	$W_w (-0,1^\circ\text{C}), \text{ д.е.}$	
1	Суглинок	2646,0	3021,0	1,64	1,45	-0,1	0,306	0,124	0,033	0,018



Рис. 2. Фото керна в интервале глубин 1,2-4,5 метра

К сожалению теплофизические характеристики поэтому в тепловую модель задавались по опыту геолога, весьма приблизительно (таб. 1).

Расчетную область зададим в виде одномерного массива (одномерная задача). Размер расчетной области зададим многое больше чем исследуемая область в которой моделируется возмущение теплового поля – 30 метров. Верхняя граница расчетной области будет соответствовать подошве слоя сезонного промезания, температура на верхней границе закреплена равной минус 2,2°C. Распределение температуры по всей расчетной области зададим равным минус 3,3°C, что соответствует реальному распределению температуры в массиве с точностью 0,2°C. Результаты расчета температурного поля в интервале глубин от кподошвы слоя сезонного оттаивания до глубины нулевых годовых амплитуд через один год после изменения в модели температуры на подошве слоя сезонного оттаивания приведены на рисунке 3.

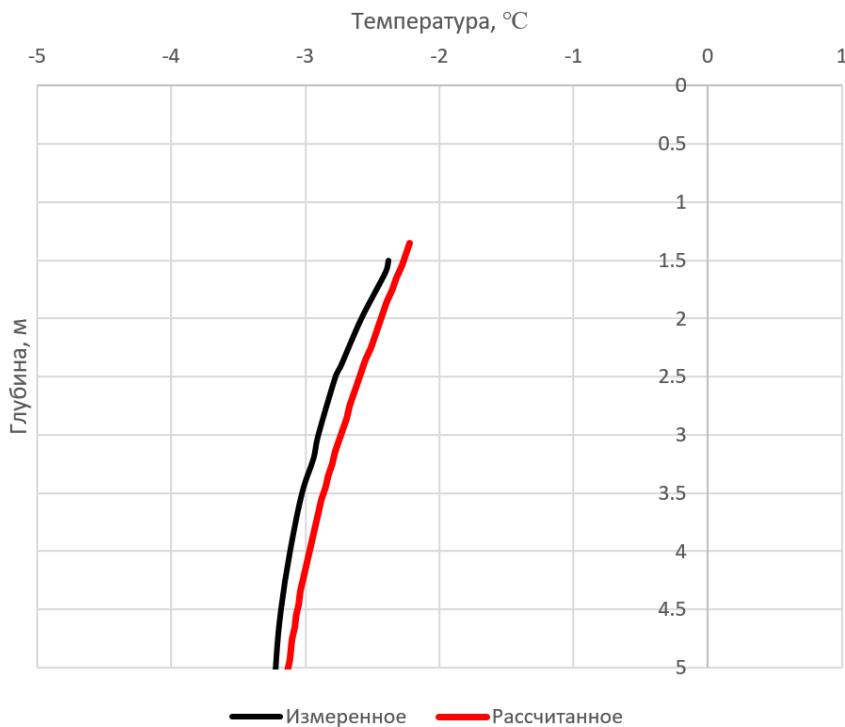


Рис. 3. Результаты теплового моделирования скорости изменения среднегодовой температуры в верхней части разреза (спустя один год, после изменения граничного условия).

Хоть на рисунке 3 нет идеального совпадения между измеренной и рассчитанной кривой, можно с уверенностью утверждать, что форма кривой в верхней части разреза обусловлена изменением температуры за последний год, а тренд потепления, наблюдаемый по данным метеостанции с 70х годов прошлого столетья по всей видимости частично компенсируется изменяющимися условиями теплообмена на поверхности и выражается лишь в отсутствии температурного градиента до глубины как минимум 25 метров. Интересно, что, для того, чтобы получить безградиентное температурное поле до глубины 25 метров при сохранении неизменной температуры на поверхности -2,2 градуса и отсутствии теплового потока из недр, потребуется порядка 250 лет.

Несколько иная ситуация наблюдается в условиях долины реки Норильская в районе г. Норильск (рис. 4), наблюдается аградация многолетнемерзлых пород и это происходит в условиях потепления климата (тренд потепления климата для Норильска составляет 0,05 °C/год по данным Климатического центра Росгидромета).

На среднегодовой температуре грунтов отчетливо прослеживается положительный градиент, причем этот градиент носит нелинейный характер. Учитывая, что термометрическая скважина расположена на холме (холмистый рельеф характерен для данной территории) сложенном сильнольдистыми глинистыми отложениями, можно предположить, что холм имеет криогенное происхождение и, возможно, в настоящий момент растет за счет миграционно-сегрегационного льдовыделения. Достаточная длина термометрической кривой позволяет достаточно уверено проследить линейный тренд повышения температуры и определить методом экстраполяции мощность криолитозоны.

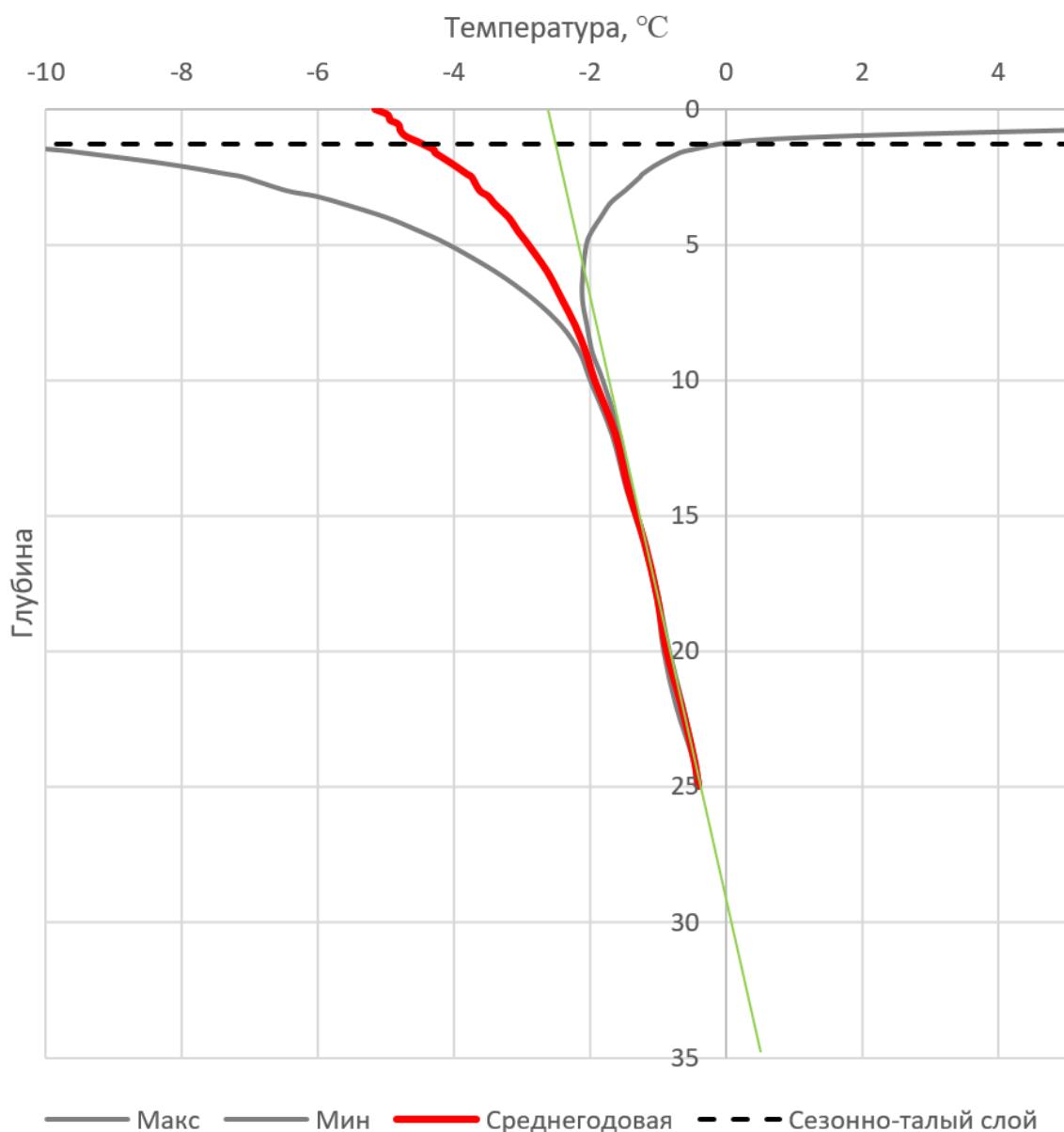


Рис. 4. Результаты термометрических наблюдений в мониторинговой скважине г. Норильск за 2022-2023 годы

Многолетние наблюдения на данных скважинах, как и на других скважинах сети мониторинга позволяют проследить взаимосвязь изменения условий теплообмена на поверхности и колебаний температуры воздуха для разных районов, что в свою очередь поможет нам делать более точные количественные оценки при прогнозе изменения температуры грунтов или глубины их сезонного промерзания/протаивания.

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

Общее мерзлотоведение / под редакцией Кудрявцева В.А. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1978. – 463 с.

Песоцкий Д.Г. Влияние содержания незамёрзшей воды в мёрзлых породах на формирование их температурного режима: Магистерская работа. Фонды кафедры геокриологии. – М. МГУ. – 2013.

Климатический центр Росгидромета. Url: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/cmip6hr> (дата обращения 24.11.2024).

THERMOMETRY RESULTS IN THE FIRST WELLS OF THE STATE GEOCRYOLOGICAL MONITORING SYSTEM.

Gunar A.Yu.^{1,3}, Koshurnikov A.V.^{1,2}, Balikhin E.I.^{1,2}, Rosenberg V.V.²

¹LLC MSU-Geophysics, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,

³Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

The article provides an analysis of the obtained data of thermometric observations in the wells of Barentsburg and Norilsk. In both areas, there is a noticeable increase in the average annual air temperature, but the nature of the thermometric curves for these areas is completely different, which indicates that geocryological conditions can in some cases successfully resist climate warming. The data analysis of the site with a trend for climate warming (Barentsburg) and the site with an aggrading layer of permafrost is presented. The article provides an approach to obtaining additional information from the results of temperature observations in monitoring wells.

Keywords: *thermometry, climate warming, temperature shift, thermal modeling*

REFERENCES

General permafrost studies / edited by Kudryavtsev V.A. M.: Publishing House of Moscow. Unita, 1978. 463 p.

Pesotsky D.G. The influence of the content of unfrozen water in frozen rocks on the formation of their temperature regime: Master's thesis. Funds of the Department of Geocryology. Moscow State University. 2013.

Climate Center of Roshydromet. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/cmip6hr> (accessed 11/24/2024).