

И. И. Фадеева^{1}, Д. Е. Аюнов¹*

Модельный анализ влияния мощности снежного покрова на температурное состояние мерзлоты на территории НИС «Остров «Самойловский» на основе данных температурного мониторинга

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: fadeevaii@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе проводится анализ данных температурного мониторинга в 27-метровой скважине, расположенной на территории научно-исследовательской станции «Остров «Самойловский» (далее станция) в дельте реки Лена. За 12 лет мониторинга температуры в скважине, в период с конца 2006 по начало 2019 года наблюдалось потепление мерзлых грунтов на глубине 26.75 м на 1.3°C. Для выявления факторов, влияющих на увеличение температуры в скважине проведено численное моделирование изменения температуры грунта скважины с учетом изменяющейся глубины снега и процесса замораживания/размораживания воды в порах грунта в течении года. Численно решалось уравнения теплопроводности с заданными граничными условиями: колебания температуры воздуха на поверхности и постоянной температурой на большой глубине. Оценивалось влияние растущего снежного покрова на изменения температуры в скважине.

Ключевые слова: российская Арктика, дельта реки Лена, мерзлота, температура, антропогенное влияние

I. I. Fadeeva^{1}, D. E. Aunov¹*

Model analysis of snow thickness influence on the temperature state of permafrost on Samoilovsky Island based on temperature monitoring data

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: fadeevaii@ipgg.sbras.ru

Abstract. The work analyzes temperature monitoring data in a 27-meter well located on the territory of the Samoilovsky Island research station (hereinafter referred to as the station) in the Lena River delta. Over 12 years of monitoring the temperature in the well, from the end of 2006 to the beginning of 2019, a warming of frozen soils at a depth of 26.75 m by 1.3°C was observed. To identify the factors influencing the increase in temperature in the well, numerical modeling of changes in the temperature of the well soil was carried out, taking into account the changing depth of snow and the process of freezing/thawing of water in the pores of the soil throughout the year. The heat conduction equations with given boundary conditions were solved numerically: fluctuations in air temperature on the surface and constant temperature at great depths. The influence of growing snow cover on temperature changes in the well was assessed.

Keywords: Russian Arctic, Lena River delta, permafrost, temperature, anthropogenic influence

Введение

Многие исследователи отмечают, что изменения климата в более высоких широтах заметнее чем в низких [1], поэтому особенно важно наблюдать за климатическими данными (температура воздуха, радиация, влажность, скорость и направление ветра, глубина снега) и годовыми вариациями температуры верхней толщи многолетнемерзлых пород (ММП). Однако плотность доступных данных, наблюдаемых в Арктических регионах не велика.

Изучение российской Арктики происходит на базе крупнейших российских геокриологических исследовательских центров: Роснедра РФ, Институт криосферы Земли СО РАН, Институт мерзлотоведения им. П.И Мельникова. У исследовательских центров имеются наблюдательные сети от Баренцева моря до Тихого океана [2].

Из временных данных Глобальной наземной сети следует, что для многолетней мерзлоты за отчетное десятилетие с 2007 по 2016 г. температура грунта вблизи глубины нулевой годовой амплитуды в зоне сплошной криолитозоны увеличилась на 0.39 ± 0.15 °С. За тот же период прерывистая мерзлота прогрелась на 0.20 ± 0.10 °С. Мерзлота в горах прогрелась на 0.19 ± 0.05 °С, а в Антарктиде на 0.37 ± 0.10 °С. В глобальном масштабе температура мерзлоты повысилась на 0.29 ± 0.12 °С. Наблюдаемая тенденция следует за арктическим усилением повышения температуры воздуха в Северном полушарии. Однако в прерывистой зоне прогревание грунта происходило за счет увеличения мощности снежного покрова, а температура воздуха оставалась статистически неизменной [3].

С 1993 г. на острове Самойловском, расположенном на верхней равнине дельты р. Лены, проводятся исследования мерзлоты сотрудниками Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (ФРГ) при участии коллег из ИМЗ СО РАН и ИНГГ СО РАН.

С 1998 года на острове функционирует метеорологическая станция, которая отслеживает погодные показания: температуру воздуха, относительную влажность, глубину снежного покрова, количество осадков, атмосферное давление, скорость и направление ветра, а также суммарную радиацию [1]. Мощность активного слоя измеряется с 2002 года по сети из 150 пунктов с помощью стального стержня, вставляемого вертикально в грунт до льда. С 2006 года проводится мониторинг состояния мерзлых пород в пробуренной 27-метровой скважине. В неё установлена цепь температурных датчиков (27 штук) с шагом 1 м до глубины 26,75 м. Абсолютная точность измерения температуры ± 0.005 °С в диапазоне от -40 °С до 35 °С. Коса датчиков вставлена в плотно прилегающую трубку из ПВХ, в скважину также помещена другая трубка ПВХ для дополнительных геофизических устройств, оставшееся пространство в стволе скважины засыпано сухим песком [1].

Согласно наблюдениям, рост температуры на максимальной глубине 26.75 м составил за 12 лет 1.3°С или примерно 0.108 °С/год [1]. В статье, однако, четко не определены причины роста температуры в скважине. Отмечается, что к наблюдаемому с 2006 года росту температур в 27-метровой скважине, обуслов-

ленному естественными процессами, с 2012 года добавился антропогенный фактор – влияние строений станции. Важно заметить, что тем не менее, с 1998 г. не наблюдается явного потепления воздуха и температур деятельного слоя, хотя зимние температуры воздуха в последние годы не были такими холодными, как в предыдущие годы. За период наблюдений с 1998 по 2017 год среднегодовая температура воздуха составила $-12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом среднемесячная температура самого теплого месяца (июля) составила $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, самого холодного месяца (февраля) $-32.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков составило 169 мм. Максимальная глубина влияния сезонных температурных колебаний воздуха или глубина нулевой годовой амплитуды составляет 20.8 м, и прогрелась с $-9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 2006 г. до $-7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 2017 г.

Предполагаем, что существенным фактором роста температуры на рассматриваемом участке стало появление инфраструктуры станции, в результате чего вокруг станции от года к году стало накапливаться значительно больше снега, чем фоновые значения.

Методы и материалы

В работе анализировались данные температурного мониторинга в 27-метровой скважине [1], которая с 2012 года оказалась на территории станции. Выбор обусловлен необходимостью изучить максимально возможный период мониторинга, для которого материалы имеются в открытом доступе [<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.891142>] (доступный период измерений в скважине: с 20.08.2006 по 01.04.2019).

В анализе использовались данные о температуре воздуха, взятые с метеостанции на Самойловском [1] находящейся за пределами станции в центре острова. И данные температуры поверхности скважины аппроксимировались функцией синуса, которая использовалась как гармоническое изменение температуры верхней границы породы:

$$T_a(t) = 23 \cdot \sin(2\pi \cdot t + 1.95) - 8.24. \quad (1)$$

Дополнительно использовались данные метеостанции по глубине снежного покрова с 2002 по 2017 года [1]. Средняя глубина снега с 2006 по 2012 года находилась в пределах 0.2-0.25 м, в 2014 она возростала до 0.4 м, в 2015 снова находилась в районе 0.2 м, в 2016 росла до 0.4 м и 2017 год можно считать обильно снежным, поскольку глубина снега достигала 0.6 м. На основе этих данных построена и использовалась в расчетах модель, приведенная на рис. 1.

Коэффициент температуропроводности (k) мерзлого грунта оценивался по реальным данным из скважины по запаздыванию фазы или по скорости распространения температурной волны [4]. Использовались амплитуды годовых температурных колебаний (до 2013 года, не снежных годов) для глубин от 1.75 до 7.75 м. Разброс полученных значений температуропроводности составил $0.88 \cdot 10^{-6} \div 1.18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

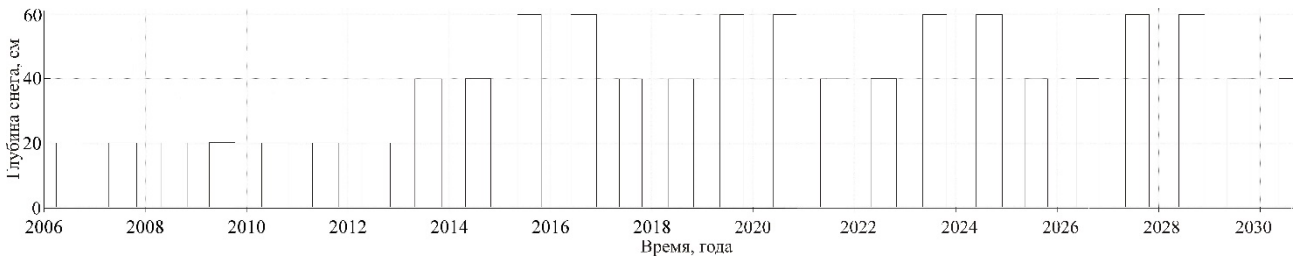


Рис. 1. Модель мощности снега с 2006 по 2019 год. С 2019 по 2031 год – модель мощности снега для задачи прогнозирования.

Начальное условие в расчетах – «фоновая» температура на всех глубинах – $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на основе скважинных данных ниже границы слоя годового теплооборота).

В программном пакете COMSOL Multiphysics численно решалось одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности определяющее изменение во времени (t) температуры грунта (T) с глубиной z :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

В коэффициенте температуропроводности: $k = \lambda_{eff} / \rho C_{eff} \left[\text{m}^2/\text{c} \right]$, учитывается замораживание/размораживание воды в порах грунта при изменении температуры ниже/выше температуры: $T_{ph} = -0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эффективные коэффициенты теплопроводности и объемной теплоемкости соответственно:

$$\lambda_{eff} = \lambda_f \cdot (1 - \sigma(T - T_{ph})) + \lambda_u \cdot \sigma(T - T_{ph}) \text{ и}$$

$$\rho C_{eff} = \rho_f C_f \cdot (1 - \sigma(T - T_{ph})) + \rho_u C_u \cdot \sigma(T - T_{ph}) + \rho_i \phi L \cdot \delta(T - T_{ph}).$$

Индексы f и u – относятся к теплофизическим параметрам (теплопроводность λ [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$], плотность ρ [$\text{кг}/\text{м}^3$] и удельная теплоемкость C [$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$]) замороженной и размороженной породы соответственно, $L=333.5$ [$\text{кДж}/\text{кг}$] – скрытая теплота фазового перехода воды, ρ_i [$\text{кг}/\text{м}^3$] – плотность льда, ϕ – пористость грунта, $\sigma(T - T_{ph})$ – безразмерная сглаженная функция Хевисайда, $\delta(T - T_{ph})$ – дельта-функция Дирака, производная по температуре от Хевисайда, имеет размерность $1/\text{К}$.

В эффективный коэффициент объемной теплоемкости среды (ρC_{eff} [$\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$]) введена сосредоточенная теплоемкость фазового перехода с помощью δ -функции Дирака. Такой подход позволяет решать задачу Стефана, без явного выделения границы фазового перехода [5].

Моделирование температуры грунта в скважине с 2006 по 2018 г с учетом влияния мощности снега

Дифференциальное уравнение теплопроводности (2) решалось в трех слоях: верхний слой снега, средний – активный слой (мерзлый и талый грунт) и нижний – мерзлота, с различными теплофизическими и плотностными характеристиками (табл. 1), которые подбирались из диапазона значений для мерзлых и талых суглинков-супесей на о. Самойловском [6]. Подбор происходил таким образом, чтобы, во-первых, температуропроводность грунта k совпадала с её оценкой, полученной из реальных температурных данных для скважины, и, во-вторых, чтобы модельные температурные изменения совпадали с реальными температурными данными из скважины. В силу изменения в течении зимнего периода теплофизических параметров снега были взяты их средние значения (табл. 1).

Таблица 1

Используемые в моделировании теплофизические параметры снега и грунта

Параметр	Снег	Мерзлый грунт	Талый грунт	Мерзлота
λ , Вт/(м·°С)	0.5	2.1	1.3	2.5
C , Дж/(кг·°С)	560	930	1030	930
ρ , кг/м ³	2100	2350	2400	2350
k , м ² /с	$0.43 \cdot 10^{-6}$	$0.91 \cdot 10^{-6}$	$0.53 \cdot 10^{-6}$	$1.14 \cdot 10^{-6}$

Моделирование температур с учетом влияния снежного покрова (рис. 1) показало хорошее совпадение модельных (непрерывная) и реальных (пунктирная) значений температур в скважине на всех глубинах (рис. 2). Модельный тренд потепления сходится с реальным, при этом отклонения реальных данных от модельных для глубин 15.75, 20.75 и 26.75 м составляет не более 0.2 °С.

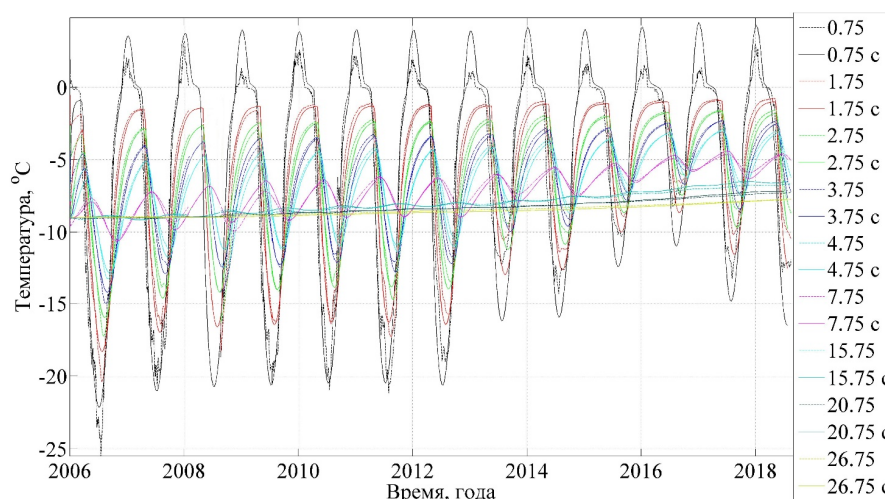


Рис. 2. Сравнение данных температурного мониторинга (пунктирные линии) с модельными (сплошная линия) с учетом влияния снежного покрова. В легенде графика указана глубина реальных датчиков без пометки и модельных с пометкой «с».

Прогнозные оценки температуры мерзлоты в условиях сохранения аномальной мощности снега

Проведено моделирование прогнозирующее изменение температуры в скважине на следующие 12 лет с учетом возросшей в связи с построением станции мощности снега. Изменение глубины снега в модели с прогнозом представлено на рис. 1.

Согласно данным модельного прогнозирования (рис. 3), потепление грунта в течение следующих 12 лет отмечается на всех глубинах. К 2031 году изменение температуры на глубинах 15.75, 20.75 и 26.75 метров относительно 2006 года составит приблизительно + 3.6 °С, + 3.1 °С и + 2.5 °С соответственно. Напомним, что по реальным данным мониторинга к 2019 году относительно 2006 года этот прирост составлял + 2.3 °С, + 1.7°С и + 1.3 °С.

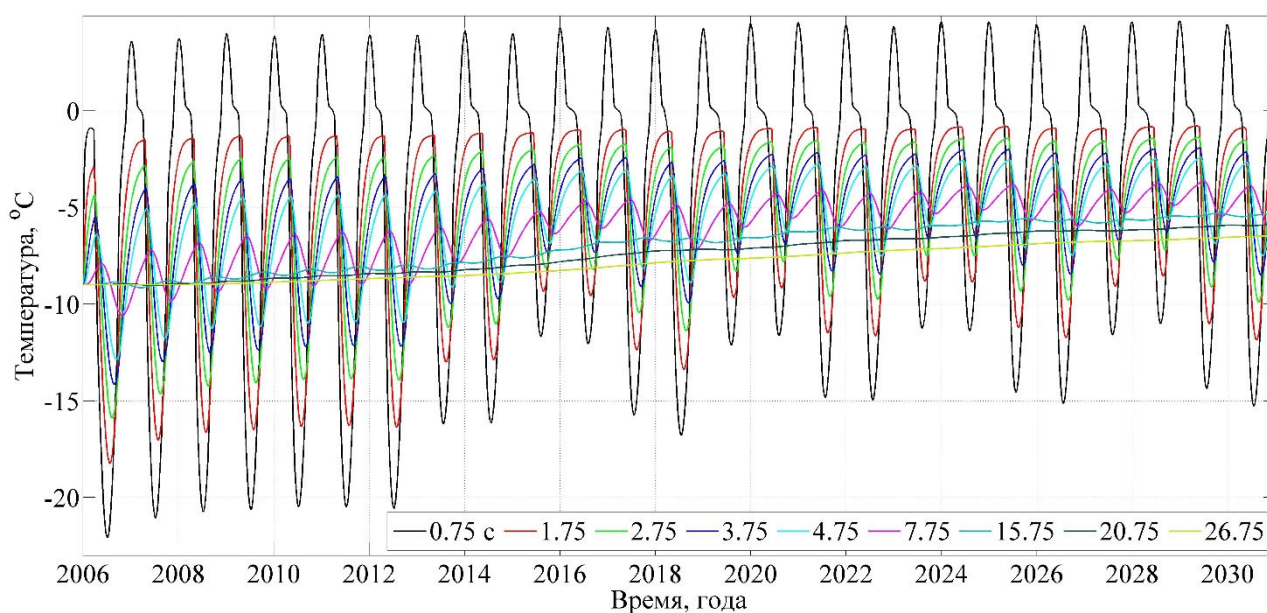


Рис. 3. Модельное прогнозирование роста температуры в скважине.

Заключение

После возведения на острове новых объектов основная наблюдательная скважина оказалась вблизи строений научно-исследовательской станции «НИС «Остров Самойловский» (расстояние до ближайших строений – около 30 метров), которые способствовали аккумулярованию вокруг неё дополнительного объема снега. Данные температурного мониторинга демонстрируют увеличение температуры мерзлоты в том числе ниже слоя годового теплооборота. Моделирование показало, что при сохранении мощности накапливаемого вокруг станции снега к 2031 году изменение температуры на глубинах 15.75, 20.75 и 26.75 метров относительно 2006 года составит приблизительно + 3.6 °С, + 3.1 °С и + 2.5 °С соответственно. Повышение температуры может стимулировать местами уже наблюдаемые процессы деградации мерзлоты и заболачивания на территории станции.

Благодарности

Исследование поддержано проектами FWZZ-2022-0031 и FWZZ-2022-0019 Госзадания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boike, Julia; Nitzbon, Jan; Anders, Katharina; Grigoriev, Mikhail N; Bolshiyarov, Dmitry Yu; Langer, Moritz; Lange, Stephan; Bornemann, Niko; Morgenstern, Anne; Schreiber, Peter; Wille, Christian; Chadburn, Sarah; Gouttevin, Isabelle; Burke, Eleanor J; Kutzbach, Lars: A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active-layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote-sensing data and land surface, snow, and permafrost models. *Earth System Science Data*, 2019, 11(1), 261-299. <https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019>
2. Дубровин В.А., Брушков А.В., Дроздов Д.С., Железняк М.Н. Изученность, современное состояние, перспективы и проблемы освоения криолитозоны Арктики // *Минеральные ресурсы России*. 2019. - № 3. - с. 55-64.
3. Biskaborn BK, SL Smith, J Noetzli, H Matthes, G Vieira, Dmitry A Streletskiy, Philippe Schoeneich, Vladimir E Romanovsky, Antoni G Lewkowicz, Andrey Abramov, Michel Allard, Julia Boike, William L Cable, Hanne H Christiansen, Reynald Delaloye, Bernhard Diekmann, Dmitry Drozdov, Bernd Etzelmüller, Guido Grosse, Mauro Guglielmin, Thomas Ingeman-Nielsen, Ketil Isaksen, Mamoru Ishikawa, Margareta Johansson, Halldor Johansson, Anseok Joo, Dmitry Kaverin, Alexander Kholodov, Pavel Konstantinov, Tim Kröger, Christophe Lambiel, Jean-Pierre Lanckman, Dongliang Luo, Galina Malkova, Ian Meiklejohn, Natalia Moskalenko, Marc Oliva, Marcia Phillips, Miguel Ramos, A Britta K Sannel, Dmitrii Sergeev, Cathy Seybold, Pavel Skryabin, Alexander Vasiliev, Qingbai Wu, Kenji Yoshikawa, Mikhail Zheleznyak, Hugues Lantuit Permafrost is warming at a global scale // *Nature Publishing Group UK Nature communications* 2019 10 (1), 264.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
5. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана. *ЖВМиМФ*. Т. 5. № 5. 1965. С. 816-827.
6. Boike, J., Kattenstroth, B., Abramova, K., Bornemann, N., Chetverova, A., Fedorova, I., Fröb, K., Grigoriev, M., Grüber, M., Kutzbach, L., Langer, M., Minke, M., Muster, S., Piel, K., Pfeiffer, E.-M., Stoof, G., Westermann, S., Wischnewski, K., Wille, C., and Hubberten, H.-W.: Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011) // *Biogeosciences*, 10, 2105–2128, 2013.

© И. И. Фадеева, Д. Е. Аюнов, 2024