

## ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ

УДК 551.324.412

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-169-185

### СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ СНЕЖНОЙ ТОЛЩИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СНЕГА В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ВОСТОК, АНТАРКТИДА

Ю.А. ШИБАЕВ<sup>1</sup>, К.Б. ЧИХАЧЕВ<sup>1\*</sup>, В.Я. ЛИПЕНКОВ<sup>1</sup>, А.А. ЕКАЙКИН<sup>1,2</sup>, Э. ЛЕФЕВР<sup>3</sup>,  
Л. АРНО<sup>3</sup>, Ж.-Р. ПЕТИТ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический НИИ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> — Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> — Институт наук об окружающей среде, г. Гренобль, Франция

\**tchikhatchev@aari.ru*

### SEASONAL VARIATIONS OF SNOWPACK TEMPERATURE AND THERMAL CONDUCTIVITY OF SNOW IN THE VICINITY OF VOSTOK STATION, ANTARCTICA

Yu.A. SHIBAYEV<sup>1</sup>, K.B. TCHIKHATCHEV<sup>1\*</sup>, V.Ya. LIPENKOV<sup>1</sup>, A.A. EKAYKIN<sup>1,2</sup>, E. LEFEBVRE<sup>3</sup>,  
L. ARNAUD<sup>3</sup>, J.-R. PETIT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> — Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> — Institut des Géosciences de l'Environnement, Grenoble, France

\**tchikhatchev@aari.ru*

Received March, 27, 2019

Accepted May, 21, 2019

**Keywords:** Antarctica, heat-transfer model, numerical experiments, snow, snow metamorphism, temperature measurements, thermophysical properties.

#### Summary

The data on snow the temperature which was monitored to a depth of 10 m in the vicinity of Vostok Station by the TAUTO autonomous system in 2010–2017 are presented. By analyzing seasonal temperature variations at different depth with the aid of a heat-transfer model we have inferred a relationship between relative thermal conductivity of snow and its porosity at this site. The same approach was also applied to analyze similar data obtained at Dome Fuji station in 1995–1997. It

**Citation:** Shibayev Yu.A., Tchikhatchev K.B., Lipenkov V.Ya., Ekaykin A.A., Lefebvre E., Arnaud L., Petit J.-R. Seasonal variations of snowpack temperature and thermal conductivity of snow in the vicinity of Vostok station, Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 2: 169–185. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-169-185.

was found that the thermal conductivity of snow layers with identical density is noticeably lower at Dome Fuji than at Vostok, which point to a difference in structural characteristics of snow that determine its thermophysical properties. We demonstrate that the conduction is the dominant heat-transport mechanism which controls the temperature distribution in snow pack on the Antarctic plateau. The obtained parameters of the heat-transfer model can be used for reconstructing the past surface temperature variations from the long-term temperature measurements in the upper 100 m thick layer of the ice sheet.

*Поступила 27 марта 2019 г.*

*Принята к печати 21 мая 2019 г.*

*Ключевые слова:* Антарктида, метаморфизм снега, модель теплопереноса, снег, температура, теплофизические свойства, численные эксперименты.

В работе впервые представлены результаты измерения температуры снежной толщи до глубины 10 м, выполненные в районе станции Восток автономной системой TAUTO в период с 2010 по 2017 г. Анализ сезонных вариаций температуры снега на различных глубинах с помощью модели теплопереноса позволил установить зависимость относительной теплопроводности снега от его пористости для этого района Антарктиды. Такой же анализ выполнен по аналогичным данным, полученным на станции Купол Фуджи в 1995–1997 гг. Установлено, что теплопроводность слоев снега, имеющих одинаковую плотность, заметно меньше на Куполе Фуджи, чем на станции Восток, что свидетельствует о различии структурных свойств снега, влияющих на его теплофизические свойства, в указанных пунктах. Показано, что кондуктивная теплопроводность является основным механизмом переноса тепла, определяющим распределение температуры в снежной толще на высокогорном антарктическом плато. Полученные параметры модели теплопереноса могут быть использованы при реконструкции изменений температуры поверхности антарктического ледникового покрова по данным многолетних измерений температуры верхнего 100-метрового слоя ледника.

## ВВЕДЕНИЕ

Температурный профиль ледника является ценным источником информации о прошлых изменениях климата, дополняющим и уточняющим данные изотопного «палеотермометра» [1–3]. Формирование распределения температуры в верхней части ледниковой толщи во многом зависит от теплофизических свойств снега и фирна, которые быстро изменяются с глубиной вслед за эволюцией плотности и структурных характеристик, определяющих молекулярную теплопроводность ледяных отложений.

Исследованию теплофизических свойств снега посвящена обширная литература. Для определения эффективной теплопроводности снега используются различные методы и подходы, которые можно разделить на четыре группы: 1) анализ периодических вариаций температуры в снежной толще [4], 2) метод стационарного теплового потока [5], 3) «игольчато-пробный» метод нестационарного теплового потока [6], 4) получившее развитие в последние годы численное моделирование теплофизических характеристик снега с использованием трехмерных микротомографических изображений структуры изучаемых образцов [5, 7]. Методы 2–4 обычно предполагают проведение лабораторных исследований образцов, хотя «игольчато-пробный» метод применяется и в полевых условиях [8].

Изучение теплофизических свойств в лабораторных условиях требует сохранения структурных характеристик снега, присущих ему в условиях естественного залегания, что является весьма сложной, а порой неразрешимой задачей для образцов из верхних горизонтов снежной толщи в Центральной Антарктиде, где

температура снега редко превышает  $-30$  °С. В настоящей работе для изучения теплопроводности антарктического снега в районе станции Восток использовались данные мониторинга температуры снежной толщи автоматической системой TAUTO (Temperature AUTOMATIC), которая была разработана и создана французскими инженерами из Лаборатории гляциологии и геофизики окружающей среды (ЛГГОС) (г. Гренобль).

В настоящее время системы TAUTO установлены и функционируют в Антарктиде на станциях Конкордия и Восток, а также в пункте S2, расположенном на полпути между этими станциями. Они предназначены для непрерывного (с дискретностью 1 час) автоматического мониторинга температуры верхнего 10-метрового слоя снега с целью получения данных о суточных и сезонных вариациях температуры. Получаемые данные необходимы для 1) изучения процессов тепло- и массопереноса в толще антарктического снега в условиях его естественного залегания, 2) исследования излучательной способности снежной поверхности в микроволновом диапазоне, используемом в дистанционных наблюдениях, 3) изучения роли солнечной радиации и вызываемых ею градиентов температуры в формировании структуры поверхностного снега, которая, в свою очередь, оказывает влияние на последующее уплотнение снега и фирна и захват атмосферного воздуха ледяной породой в ходе рекристаллизационного льдообразования.

Предварительный анализ данных, полученных системой TAUTO на станции Восток за первый год ее функционирования, выполнен в работе [9]. Авторы проанализировали суточные и недельные вариации температуры снега на соседних горизонтах и оценили по ним средние значения и временную изменчивость коэффициентов теплопроводности отдельных слоев снега до глубины 140 см.

В данной работе мы впервые представляем результаты измерений, выполненных автономной системой TAUTO за весь период ее работы на станции Восток с 2010 по 2017 г. Прощедшие предварительную обработку данные использованы для определения зависимости эффективной теплопроводности снега от его пористости путем анализа сезонных вариаций температуры, зарегистрированных TAUTO на различных горизонтах снежной толщи до глубины 10 м.

#### **МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

Система TAUTO была установлена на станции Восток российскими и французскими специалистами в январе 2010 г. Место для ее установки было выбрано в 500 м к юго-западу от станции, в зоне естественного снежного покрова, не нарушенного хозяйственной деятельностью. Система включает:

- 15 платиновых терморезисторов, каждый из которых соединен по четырехжильной схеме с измерителем сопротивления;
- блок памяти, обеспечивающий хранение данных в течение 5–8 лет и возможность их копирования на компьютер в полевых условиях (в случае отказа системы спутниковой передачи данных);
- блок передачи данных на спутниковую систему Argos;
- блок синхронизации времени через спутниковую навигационную систему GPS;
- блок питания, состоящий из шести 12-вольтовых батарей, которые, подзаряжаясь в летнее время от солнечной батареи, способны обеспечить бесперебойную работу станции в течение 10 лет.

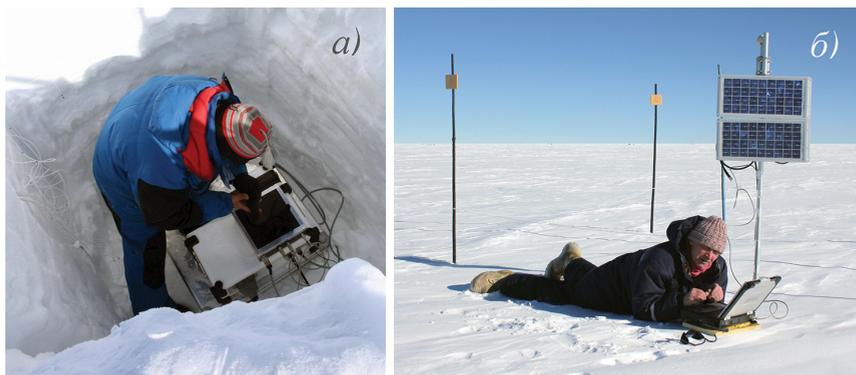


Рис. 1. Автономная система мониторинга температуры снежной толщи TAUTO: *a)* — установка датчиков температуры, электронных блоков и батареи питания в трехметровом шурфе в январе 2010 г.; *б)* — загрузка информации с накопителя данных станции на полевой компьютер в январе 2018 г. (на фотографии видны солнечная батарея станции и снегомерные вехи, по которым определялась аккумуляция снега над датчиками температуры)

Fig. 1. The TAUTO autonomous system for recording snow temperature: setting the sensors, electronic modules and battery in the 3 m deep snow pit in January 2010 (*a*), and downloading information from the TAUTO's data storage to a field computer in January 2018 (*b*) — a solar battery and stakes, used for measuring snow accumulation above temperature sensors, can also be seen in this photograph

Батареи и электронные блоки станции были размещены на дне шурфа глубиной 3 м (рис. 1*a*). 13 платиновых терморезисторов были внедрены на 15–20 см в рабочую стенку шурфа на глубинах 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 140 и 200 см. Два платиновых терморезистора подвешены на веревочном шнуре на глубинах 5 и 10 м в расположенной рядом с шурфом скважине, пробуренной ручным буром. После установки датчиков шурф и скважина были аккуратно засыпаны снегом. Над снежной поверхностью оставлена только мачта с солнечной батареей, антенным блоком систем Argos и GPS и разъемом для подключения компьютера (рис. 1*б*). Вокруг шурфа были установлены четыре снегомерные вехи для мониторинга аккумуляции снега (скорости погружения датчиков) и две вехи, отмечающие положение рабочей стенки шурфа и устья скважины.

Тщательная калибровка терморезисторов TAUTO, выполненная в ЛГГОС, позволила обеспечить воспроизводимость измерения температуры разными датчиками порядка  $\pm 0,05$  °C, при абсолютной погрешности каждого из них не более  $\pm 0,1$  °C.

В течение первых полутора лет работы станции регистрация температуры снежной толщи и передача данных на спутник осуществлялись ежечасно. Полученные со спутниковой системы Argos данные еженедельно поступали через центр приема данных (г. Тулуза, Франция) в ЛГГОС, где они дешифрировались и затем передавались в ААНИИ. После выхода из строя системы передачи данных начиная с 2012 г. данные ежечасных измерений, накопленные станцией, стали сниматься вручную один раз в год, в конце летнего полевого сезона (рис. 1*б*). Последняя загрузка данных на полевой компьютер, выполненная в январе 2018 г., показала, что 28 августа 2017 г. станция вышла из строя и прекратила регистрацию измерений. После обсуждения возникших проблем с французскими коллегами было решено демонтировать станцию и вывезти блок памяти со станции Восток во Францию для ремонта.

За 7,5 лет непрерывной работы TAUTO, с февраля 2010 г. по август 2017 г. было выполнено 66000 сроков наблюдений, в каждый из которых на всех исследуемых горизонтах были произведены измерения температуры. Общее число измерений составило 990000, они позволили получить многолетний ряд наблюдений за суточным и сезонным ходом температуры снежной толщи в районе станции Восток. Вместе с тем предварительный анализ полученных рядов температуры показал, что некоторые результаты измерений явно ошибочны. Ошибочные результаты измерений встречаются на всех горизонтах и различаются как по величине ошибки, так и по времени. При этом времена возникновения ошибочных данных на различных горизонтах не совпадают между собой, что говорит о том, что, скорее всего, сбои происходили либо в момент измерения (обмена данными между измерительным модулем и датчиком), либо в момент записи данных в блок памяти. Указанные сбои в работе системы могли быть связаны с нестабильностью электронных модулей TAUTO при низких температурах либо с электромагнитными помехами от станции Восток. Абсолютные значения ошибок (разница между записанным значением и результатом интерполяции по соседним срокам) также различны и составляют от десятков градусов до 0,02 °С, при этом абсолютное отклонение, при котором срок можно отнести к ошибочным, уменьшается при переходе к более глубоким горизонтам. Для автоматической фильтрации данных и исключения всех сомнительных значений температуры нами был разработан и реализован следующий алгоритм.

Пусть  $T_i$  — измеренное значение температуры в момент времени  $i$  (дискретность 1 час). Для каждого момента времени вычислим величину  $v_i$ :

$$v_i = \max\left(v^*, |T_j - T_{j-10}|\right), \quad j = \max_{m=i-24, \exists T_m}^{\infty} m, \quad (1)$$

где  $v^*$  — константа для каждого горизонта, зависящая от глубины его залегания. Для каждого еще не исключенного значения  $T_i$  вычислим  $n_i$  — количество еще не исключенных значений в интервале  $T_{i-5}, T_{i-4}, \dots, T_{i+5}$  и  $\bar{T}$  — их среднее арифметическое значение. Если  $n_i < 5$ , исключаем значение  $T_i$  и повторяем всю операцию, пересчитывая указанные величины. В противном случае используем величину  $l_i$ :

$$l_i = \left| \frac{T_i - \bar{T}}{v_i} \right|. \quad (2)$$

Для всех еще не исключенных  $T_i$  находим то значение, для которого  $l_i$  имеет максимальное значение, и в случае если  $l_i$  больше  $l^*$  ( $l^*$  — константа для данного горизонта, зависящая от его глубины), исключаем  $T_i$  и повторяем процесс до тех пор, пока не достигнем ситуации, когда максимальное  $l_i$  будет меньше либо равно  $l^*$ .

В результате анализа работы алгоритма для различных значений констант  $v^*$  и  $l^*$  были установлены оптимальные значения, при которых максимальное количество действительно ошибочных точек исключается и минимальное количество точек неверно относится к сомнительным. Установленные значения составили для нижних горизонтов 0,003 и 3 соответственно, для верхних — 0,05 и 10.

Описанный выше алгоритм был использован для проверки данных, полученных на каждом горизонте измерений. Очищенные с помощью этого алгоритма временные ряды температуры снега показаны на рис. 2, на котором видно, что даже после исключения ошибочных значений в записях температуры, сделанных верхним датчиком

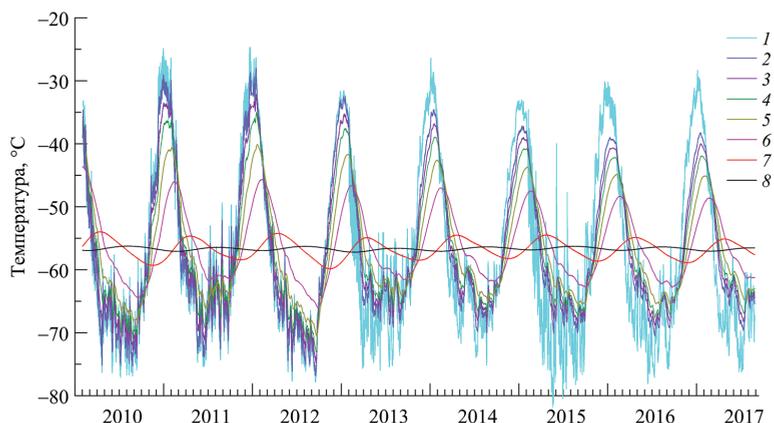


Рис. 2. Результаты измерений температуры снежной толщи станцией TAUTO в 2010–2017 гг. после технической обработки данных и исключения ошибочных значений (см. текст).

На рисунке представлены данные только 8 из 15 установленных датчиков (в порядке возрастания глубины): 1 — датчик СН13 (первоначальная глубина 0 м); 2 — СН2 (0,1 м); 3 — СН4 (0,3 м); 4 — СН6 (0,5 м); 5 — СН9 (1,0 м); 6 — СН14 (2,0 м); 7 — СН15 (5,0 м); 8 — СН16 (10,0 м). Глубина залегания датчиков увеличивалась со временем за счет непрерывной аккумуляции снега на поверхности ледника (см. рис. 4). С этим связано наблюдающееся на графиках уменьшения амплитуды вариаций температуры, особенно заметное для верхних датчиков

Fig. 2. Snow temperature recorded at different depths by the TAUTO system in 2010–2017 (digital data errors have been removed from the records as described in the text).

The data from 8 out of 15 temperature sensors set in the snow pack are displayed in increasing order of depth: 1 — sensor СН13 (initial depth 0 m); 2 — СН2 (0.1 m); 3 — СН4 (0.3 m); 4 — СН6 (0.5 m); 5 — СН9 (1.0 m); 6 — СН14 (2.0 m); 7 — СН15 (5.0 m); 8 — СН16 (10.0 m). The burial depth of each sensor increased with time due to continuing accumulation of snow at the ice-sheet surface (see fig. 4). The latter led to a decrease in amplitude of the snow temperature variation, especially prominent for the shallower sensors

СН13, остались подозрительные «выбросы». Ярким примером таких сомнительных участков записи датчика СН13 являются скачкообразные повышения температуры в июне и июле 2015 г. В июне повышение температуры поверхностного снега более чем на 30 °С произошло менее чем за трое суток, после чего наблюдался такой же быстрый возврат ее к более низкому уровню. Анализ материалов стандартных метеорологических наблюдений на станции Восток показал, что в этом и других подобных случаях зафиксированные датчиком изменения температуры снега хорошо согласуются с изменениями температуры воздуха на высоте 2 м, а также прослеживаются — с соответствующей задержкой по времени и уменьшенной амплитудой — в данных датчика второго по глубине горизонта наблюдений (СН10), который в этот период времени находился уже на глубине порядка 60 см (рис. 3). Таким образом, указанные аномалии не являются артефактами и отразили эффект адвекции теплого воздуха в район станции Восток в период антарктической зимы.

Аккумуляция снега на поверхности ледника приводит к увеличению глубины залегания датчиков. Для расчета текущей глубины датчиков использовались результаты ежегодных наблюдений за аккумуляцией снега по снегомерным рейкам, установленным на площадке TAUTO, а также экспериментальный профиль плотности снежной толщи до глубины 25 м, полученный по керну скважины VK16 (см. ниже). Определение приращения глубины датчиков производилось для каждого срока из-

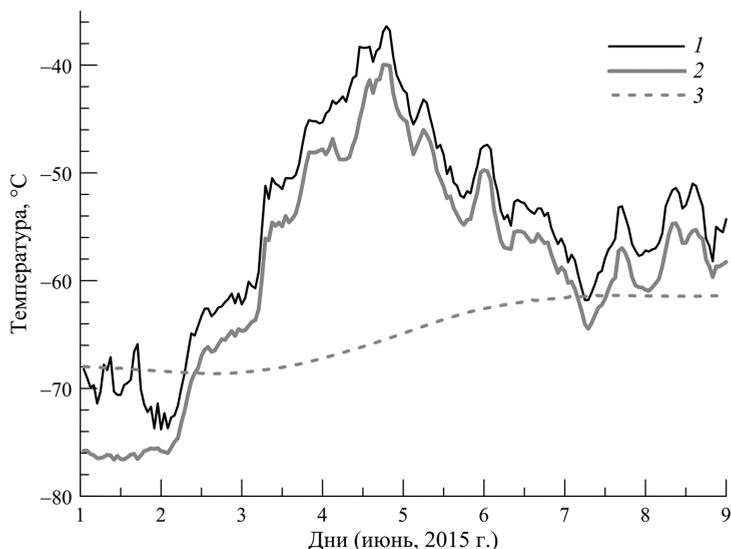


Рис. 3. Почасовые изменения температуры воздуха на высоте 2 м над поверхностью снега (1) и температуры поверхностного снега на глубинах 0,04 м (2) и 0,59 м (3) в районе станции Восток 1–9 июня 2015 г.

1 — данные автоматической метеостанции Milos 500 (фонды ААНИИ Росгидромета); 2, 3 — данные датчиков СН13 и СН10 станции TAUTO (эта работа)

Fig. 3. Hourly variations in 2 m air temperature (1) and in the temperature of near-surface snow at depths of 0.04 m (2) and 0.59 m (3) at Vostok during 1–9 June 2015.

1 — data from AMS Milos 500 (archival fund of AARI Roshydromet); 2, 3 — data from sensors СН13 and СН10 of the TAUTO system (this work)

мерения аккумуляции. Для этого использовалось равенство между суммой годовых аккумуляций снега на поверхности ледника и приростом массы ледяных отложений на единицу площади в интервале между глубиной первоначальной установки датчика и его глубиной в очередной срок наблюдений за аккумуляцией. Равенство решалось численно относительно приращения глубины. Результаты расчетов глубины для верхних 11 датчиков TAUTO представлены на рис. 4.

Все результаты измерений температуры снега станцией TAUTO в 2010–2017 гг., прошедшие техническую обработку, а также данные о глубине датчиков в различные сроки наблюдений вошли в «Базу данных мониторинга температуры снежной толщи на станции Восток» (номер государственной регистрации 2019620344), которая доступна по запросу в ААНИИ.

Меняющаяся во времени глубина датчиков затрудняет использование всего набора полученных данных (рис. 2) для оценки эффективного коэффициента теплопроводности снега в районе исследований. В связи с этим для последующего анализа были использованы ряды температуры, измеренные в 2014–2016 гг. одним или несколькими соседними датчиками на семи выбранных горизонтах снежной толщи, глубины которых в течение указанного трехлетнего периода менялись незначительно и в среднем составляли: 1)  $0,13 \pm 0,13$  м («поверхность», 1 датчик); 2)  $0,64 \pm 0,08$  м (3 датчика); 3)  $1,03 \pm 0,06$  м (3); 4)  $1,91 \pm 0,13$  м (1); 5)  $2,51 \pm 0,12$  м (1); 6)  $5,48 \pm 0,11$  м (1); 7)  $10,43 \pm 0,10$  м (1).

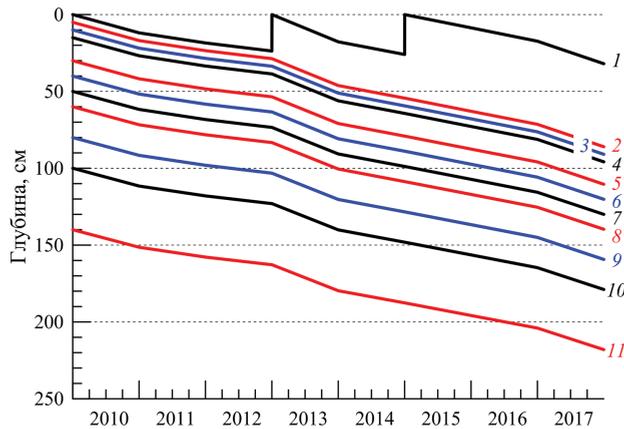


Рис. 4. Изменение глубины залегания верхних 11 датчиков станции TAUTO в период наблюдений с февраля 2010 по январь 2018 г.:

1 — датчик CH13 (первоначальная глубина 0 м); 2 — CH4 (0,05 м); 3 — CH3 (0,1 м); 4 — CH12 (0,15 м); 5 — CH4 (0,3 м); 6 — CH5 (0,4 м); 7 — CH6 (0,5 м); 8 — CH7 (0,6 м); 9 — CH8 (0,8 м); 10 — CH9 (1,0 м); 11 — CH11 (1,4 м). Поверхностный датчик CH13 дважды поднимался на поверхность — 1 февраля 2013 г. и 7 февраля 2015 г.

Fig. 4. Increase of burial depths of the 11 upper temperature sensors of TAUTO during the period of observation, from February 2010 to January 2018:

1 — sensor CH13 (initial depth 0 m); 2 — CH4 (0.05 m); 3 — CH3 (0.1 m); 4 — CH12 (0.15 m); 5 — CH4 (0.3 m); 6 — CH5 (0.4 m); 7 — CH6 (0.5 m); 8 — CH7 (0.6 m); 9 — CH8 (0.8 m); 10 — CH9 (1.0 m); 11 — CH11 (1.4 m). Note that the uppermost sensor (CH13) was moved to the snow surface twice, on 1 February 2013 and on 7 February 2015

### АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для анализа экспериментальных данных использовались математическая модель и компьютерная система, разработанные А.Н. Саламатиным [10]. В основу модели положено уравнение переноса тепла в полупространстве снежно-фирновой толщи:

$$c_{pi}\rho_i(1-c)\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \omega\frac{\partial T}{\partial h}\right) = \frac{\partial}{\partial h}\left[\lambda_i\Lambda\frac{\partial T}{\partial h}\right], \quad (3)$$

в котором  $h$  — глубина от поверхности ледника,  $t$  — время,  $T$  — температура,  $\rho_i(T)$ ,  $c_{pi}(T)$ ,  $\lambda_i(T)$  — плотность, теплоемкость и теплопроводность чистого льда соответственно,  $c(h)$  — пористость ледяной породы,  $\omega$  — вертикальная скорость погружения ледяных частиц в леднике относительно его поверхности за счет прироста снежного покрова,  $\Lambda$  — относительная теплопроводность снега, зависящая от пористости и структуры снега [11]:

$$\Lambda(c) = \lambda / \lambda_i = a(1-c) / (a+c), \quad (4)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность снега,  $a$  — коэффициент, значение которого может варьировать в широких пределах и определяется особенностями структуры снега. Зависимость теплофизических свойств чистого льда от температуры задается, следуя работам [12, 13], линейными уравнениями

$$c_{pi} = c_{p0} [1 + \alpha_c(T + 30)] \quad (5)$$

и

$$\lambda_i = \lambda_0 [1 - \alpha_\lambda (T + 30)] \quad (6)$$

со значениями констант:  $c_{\rho 0} = 1,89 \text{ кДж (кг} \cdot \text{°C)}^{-1}$ ;  $\alpha_c = 0,0037 \pm 0,0003 \text{ °C}^{-1}$ ;  $\lambda_0 = 2,55 \text{ Вт (м} \cdot \text{°C)}^{-1}$ ;  $\alpha_\lambda = 0,0039 - 0,0005 \text{ °C}^{-1}$ .

Изменение пористости ( $c$ ) снежно-фирновой толщи по глубине  $h$  описывается экспоненциальным уравнением [14]:

$$c = c_s \exp(-\gamma h), \quad (7)$$

в котором  $c_s$  — пористость снега на поверхности ледника,  $\gamma$  — параметр, зависящий от скорости уплотнения снежной толщи.

Уравнение (3) с параметризацией, заданной соотношениями (4)–(7), решается компьютерной программой численно.

Значения параметров  $c_s$  и  $\gamma$  в уравнении (7) определялись методом наименьших квадратов по данным о пористости снега ( $c = 1 - \rho/\rho_v$ ), полученным в результате измерения профиля плотности  $\rho(h)$  снежной толщи до глубины 25 м по керну скважины VK16, пробуренной в районе станции Восток (рис. 5). Вместе с данными по Востоку на рис. 5 показаны аналогичные данные, полученные на японской станции Купол Фуджи [15], которые были использованы нами для анализа сезонных вариаций температуры снежной толщи в этом пункте Восточной Антарктиды.

Значение коэффициента  $a$  в уравнении (4), соответствующее структурным особенностям снега в пункте мониторинга температуры снежной толщи, оценивалось путем минимизации стандартного отклонения между модельными и экспериментальными значениями амплитуд сезонных вариаций температуры снега на различных глубинах по методике, описанной в работе [16].

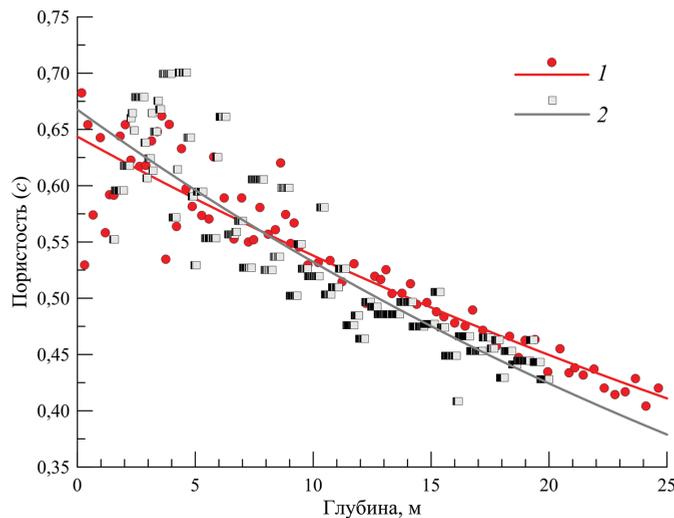


Рис. 5. Результаты измерения пористости снежно-фирновых отложений по глубине в районах станций Восток (эта работа) и Купол Фуджи [15] и аппроксимирующие их экспоненциальные регрессии:

1 — Восток (параметры уравнения (7):  $c_s = 0,64$ ;  $\gamma = 0,018 \text{ м}^{-1}$ ); 2 — Купол Фуджи ( $c_s = 0,67$ ;  $\gamma = 0,023 \text{ м}^{-1}$ )

Fig. 5. Experimental porosity-vs.-depth profile at Vostok Station (this work) and Dome Fuji [15], and their approximations by exponential functions:

1 — Vostok (coefficients in equation (7):  $c_s = 0.64$ ;  $\gamma = 0.018 \text{ m}^{-1}$ ); 2 — Dome Fuji ( $c_s = 0.67$ ;  $\gamma = 0.023 \text{ m}^{-1}$ )

Сезонный ход температуры воздуха на высоте 2 м и температуры снега на поверхности ледника,  $T_s(t)$ , достаточно полно описывается первыми двумя гармониками ряда Фурье:

$$T_s(t) = \langle T_s \rangle + \Delta T(t), \quad \Delta T(t) = \sum_{k=1}^2 \left[ A_k \cos\left(\frac{2\pi}{t_p} kt\right) + B_k \sin\left(\frac{2\pi}{t_p} kt\right) \right], \quad (8)$$

где  $\langle T_s \rangle$  — средняя годовая температура,  $A_k$  и  $B_k$  — коэффициенты соответствующих гармоник ( $k = 1, 2$ ),  $t_p$  — основной период вариаций (один год). Предварительное исследование имеющихся данных показало следующее: 1) несмотря на существенное различие среднегодовых значений температуры воздуха ( $-54,9$  °C) и поверхности снега ( $-57,2$  °C), коэффициенты  $A_k$  и  $B_k$ , полученные по двум экспериментально независимым рядам температуры, имеют весьма близкие значения; 2) сигнал второй гармоники вариаций поверхностной температуры затухает уже на первых метрах снежной толщи (рис. 6, горизонты 0,64 и 1,91 м). В связи с этим в дальнейших расчетах температурные колебания на поверхности ледника и на горизонтах измерений аппроксимировались первой гармоникой сезонного хода температуры воздуха.

В ходе численных экспериментов минимизировалось стандартное отклонение между модельными и экспериментальными значениями отклонений температуры снега на различных глубинах. Настраиваемыми параметрами модели (3) – (7) являлись амплитуда температурных колебаний на поверхности ледника (коэффициенты первой гармоники) и параметр  $a$ , определяющий связь теплофизических свойств снега с его пористостью. Сравнение полученных нами наилучших теоретических приближений с данными о сезонном ходе температуры на 6 горизонтах снежной толщи в районе станции Восток приведено на рис. 6. Максимальное соответствие расчетных данных результатам наблюдений было достигнуто при  $a = 0,36 \pm 0,07$  и амплитуде колебаний поверхностной температуры  $17,4 \pm 0,03$  °C. Расчетная амплитуда достаточно точно совпала с амплитудами первых гармоник сезонного хода температуры воздуха на высоте 2 м ( $17,7$  °C) и температуры поверхности снега по данным верхнего датчика TAUTO на глубине 0,13 см ( $17,3$  °C).

Описанная выше процедура подготовки и анализа данных была использована также для определения параметра  $a$  в районе японской антарктической станции Купол Фуджи. Измерения профиля температуры снежной толщи до глубины 10 м проводились здесь в 1995–1997 гг. с применением платиновых термометров сопротивления и даталоггера [17, 18]. Из имеющихся опубликованных данных для анализа были выбраны ряды температуры, полученные на горизонтах 0,01 м («поверхность»), 1,0, 2,0, 5,0 и 10 м, которые охватывают двухлетний период с февраля 1995 г. по февраль 1997 г. (измерения проводились два раза в сутки). Наилучшее согласование модельных и экспериментальных данных было получено при следующих входных параметрах моделирования:  $a = 0,25 \pm 0,05$  и амплитуда колебаний поверхностной температуры  $14,2 \pm 0,02$  °C (амплитуда первой гармоники, аппроксимирующей ход поверхностной температуры воздуха  $-14,7$  °C).

Установленные нами параметры уплотнения и теплопроводности снега, а также условия льдообразования на станциях Восток и Купол Фуджи приведены в таблице. Подставляя значения коэффициента  $a$  в уравнение (4), можно рассчитать зависимости относительной теплопроводности снега от его пористости в указанных пунктах. Как было отмечено в работе [16], использование описанного выше подхода, учитывающего только два механизма переноса тепла (кондукцию и вертикальное движение ледяных

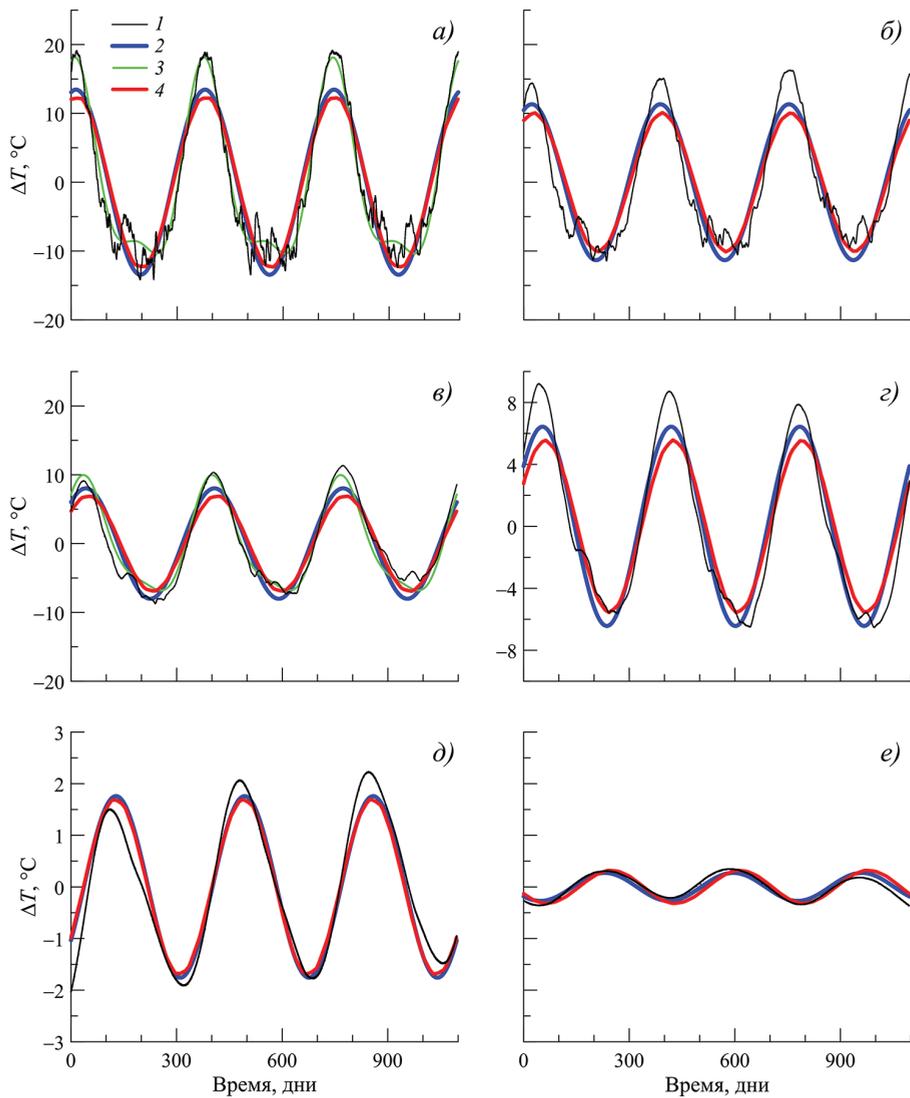


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных данных о сезонных вариациях температуры ( $\Delta T$ ) на 6 горизонтах снежной толщи в районе станции Восток в 2014–2016 гг.: а) — 0,64 м; б) — 1,03 м; в) — 1,91 м; г) — 2,51 м; д) — 5,48 м; е) — 10,43 м.

1 — результаты измерений; 2 — первая гармоника экспериментального ряда  $\Delta T$ ; 3 — сумма первых двух гармоник экспериментального ряда  $\Delta T$  (показана только для горизонтов 0,64 и 1,91 м); 4 — модельный ряд  $\Delta T$

Fig. 6. Comparison of modeled and experimental data on the seasonal temperature variations ( $\Delta T$ ) at six depths in the snow pack near Vostok in 2014–2016: а) — 0,64 m; б) — 1,03 m; в) — 1,91 m; г) — 2,51 m; д) — 5,48 m; е) — 10,43 m.

1 — recorded snow temperature; 2 — the first harmonic of the experimental  $\Delta T$  time series; 3 — the sum of the first two harmonics of the experimental  $\Delta T$  time series (only shown for depths 0.64 and 1.91 m); 4 — modeled  $\Delta T$  time series

частиц), означает искусственную привязку к поверхности ледника эффектов других теплофизических процессов в снежно-фирновой толще. За рамками модели оставлены внутренний разогрев снега проникающей коротковолновой радиацией, потери и выделения тепла в результате фазовых переходов внутри снежной толщ, передача тепла за счет диффузии водяного пара и конвекции воздуха в снегу. Это обстоятельство необходимо учитывать при обсуждении полученных нами данных о теплопроводности антарктического снега и сравнении их с результатами других авторов.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перенос тепла в снегу, являющемся трехфазной системой (лед–воздух–водяной пар), осуществляется посредством трех основных механизмов: 1) теплопередачи (кондукции) через ледяные зерна и их контакты, 2) теплопередачи через заполняющий поры воздух и 3) переноса скрытого тепла за счет испарения-конденсации мигрирующего в порах снега водяного пара. Дополнительными механизмами теплопереноса являются радиационный нагрев и конвекция воздуха в снегу, однако их вклад в общую теплопроводность снега относительно невелик и ограничен верхними слоями снега [6, 19]. Более того, если речь идет о снежной толще в Центральной Антарктиде, где температура поверхностного снега редко поднимается выше  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то, согласно работе [20], передача тепла за счет диффузии водяного пара должна играть здесь второстепенную роль в общем теплопереносе. Следовательно, можно ожидать, что основным механизмом переноса тепла в снежной толще в холодных районах антарктического плато, где расположены станции Восток и Купол Фуджи, является молекулярная теплопроводность через ледяной скелет и поровое пространство снега. Мощность слоя, в котором могут проявляться другие механизмы и связанные с ними процессы, по разным оценкам не превышает 0,5–1,5 м [21]. Отметим также, что, благодаря низкому парциальному давлению водяного пара в поровом пространстве холодной снежной толщ, зависимость эффективной теплопроводности снега от температуры определяется главным образом температурными зависимостями теплопроводности чистого льда и воздуха, а для достаточно плотного снега — почти целиком зависимостью  $\lambda_i(T)$  по уравнению (6), что подтверждается данными работы [7].

Таким образом, использованный нами подход к определению эффективной теплопроводности снега на высокогорном антарктическом плато вполне соответствует специфике преобладающих здесь условий метаморфизма снега. Рассчитанные по найденным значениям коэффициента  $a$  зависимости относительной (эффективной) теплопроводности снега от его пористости  $\lambda/\lambda_i(c)$  неплохо согласуются с данными других исследователей, которые были получены разными методами на образцах снега различного происхождения (рис. 7). Вместе с тем значение  $a$ , установленное для станции Купол Фуджи, оказалось заметно меньше значения этого коэффициента на станции Восток, и, следовательно, теплопроводность слоев снега, имеющих одинаковую плотность, заметно меньше на Куполе Фуджи, чем на Востоке (см. рис. 7). Последнее может свидетельствовать о различии структурных свойств снега, влияющих на его теплофизические свойства, в указанных пунктах и, в частности, о меньшей относительной площади контактов ледяных зерен (отношение среднего радиуса контакта к среднему радиусу зерна [4]) на Куполе Фуджи. Важно отметить, что данные различия в структурных характеристиках снега обнаружены в пунктах с весьма схожими условиями льдообразования (таблица).

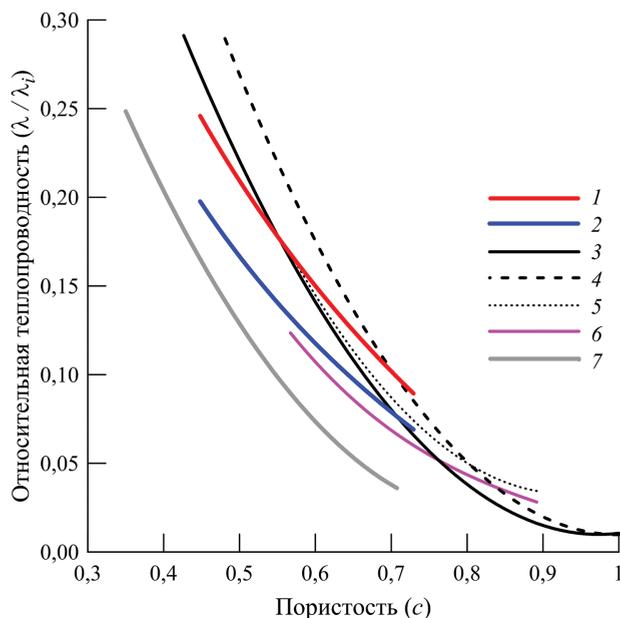


Рис. 7. Зависимости относительной теплопроводности снега от его пористости, установленные по результатам мониторинга сезонных вариаций температуры снежной толщи на станциях Восток (1) и Купол Фуджи (2), а также по данным работ [7] (3), [5] (4), [23] (5), [22] (6), [6] (7)

Fig. 7. Relative thermal conductivities vs. snow porosity. The data obtained from the analysis of the seasonal variations of snow temperature recorded at Vostok (1) and Dome Fuji (2) are compared with published data: [7] (3), [5] (4), [23] (5), [22] (6), [6] (7)

Как следует из рис. 7, полученные нами зависимости лежат между аналогичными сводными зависимостями А.В. Павлова (для чисто кондуктивной теплопроводности снега — см. рис. 7, кривая 6) [22] и Н.И. Осокина с соавторами (кривая 5) [23], которые были получены по большому числу эмпирических регрессий. Особый интерес представляет сравнение наших данных с результатами численного моделирования эффективного коэффициента теплопроводности на основе трехмерных микротомографических изображений структуры снега в образцах, отличающихся по

Таблица

**Условия льдообразования и параметры уплотнения и теплопроводности снега на станциях Восток и Купол Фуджи**

Параметр	Восток	Купол Фуджи
Средняя температура на глубине 10 м, °С	-56,6	-57,3
Аккумуляция снега, г·см <sup>-2</sup> ·год <sup>-1</sup>	2,1	3,1
Пористость поверхностного снега, $c_s$	0,64	0,67
Показатель уплотнения, $\gamma$ , м <sup>-1</sup>	0,018	0,023
Амплитуда первой гармоники сезонных изменений эффективной температуры поверхности ледника, $(A_k^2 + B_k^2)^{0,5}$ , °С	17,4	14,2
Безразмерный (структурный) коэффициент $a$ в уравнении (4) относительной теплопроводности снега	0,36	0,25

своим структурным характеристикам [5, 7]. Этот метод в настоящее время признан наиболее точным для оценки чисто кондуктивной (через ледяной скелет и поры) теплопроводности снега, которая, по-видимому, и является основным механизмом переноса тепла глубже 1 м в снежной толще в Центральной Антарктиде. Он дает возможность количественно описывать (и параметризовать) структуру исследуемого образца снега, учитывать анизотропию его теплофизических свойств и рассчитывать эффективные коэффициенты теплопроводности в разных направлениях.

Зависимость  $\lambda/\lambda_0(c)$ , установленная для станции Восток (см. рис. 7, кривая 1), наиболее близка к регрессионной кривой, аппроксимирующей результаты определения теплопроводности 30 образцов снега, с разной структурой и разной степенью анизотропности, методом численного моделирования (см. рис. 7, кривая 3) [7]. В области более рыхлого снега «восточная» кривая пересекается с кривой  $\lambda/\lambda_0(c)$ , построенной по данным численного моделирования вертикальной теплопроводности резко анизотропных образцов глубинной изморози и снега, сложенного ограненными кристаллами (см. рис. 7, кривая 4) [5]. Последнее может свидетельствовать о частой встречаемости указанных типов снега в верхней части снежной толщи на станции Восток, что подтверждается данными стратиграфических исследований многочисленных шурфов в районе станции.

Отметим, что кривая регрессии, аппроксимирующая результаты измерений теплопроводности снега «игольчато-пробным» методом (см. рис. 7, кривая 7) [6], который был популярен среди исследователей до недавнего времени, показывает более низкие значения относительной теплопроводности снега по сравнению с остальными кривыми, приведенными на рис. 7. Н. Калонн с соавторами [7] объясняют расхождение между данными классических экспериментальных методов и результатами численного моделирования теплопроводности снега возможным влиянием структуры образца и условий эксперимента на степень проявления и сложного взаимодействия других, помимо кондукции, механизмов переноса тепла в ходе измерения.

Близость установленных нами зависимостей  $\lambda/\lambda_0(c)$  к результатам численного моделирования кондуктивной теплопроводности снега является дополнительным подтверждением того, что такие процессы, как диффузионный перенос тепла водяным паром, радиационный нагрев и конвекция воздуха в снегу, не оказывают существенного влияния на формирование температурного профиля снежной толщи в верхнем 10-метровом слое ледника Центральной Антарктиды.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ сезонных вариаций температуры снежной толщи на станциях Восток и Купол Фуджи позволил установить зависимости относительной (эффективной) теплопроводности снега от его пористости в этих районах Центральной Антарктиды. Достаточно хорошее согласование наших данных с результатами численного моделирования кондуктивной теплопроводности снега указывает на то, что она является основным механизмом переноса тепла, определяющим распределение температуры в снежной толще на высокогорном антарктическом плато.

Установлено, что теплопроводность слоев снега, имеющих одинаковую плотность, заметно меньше на Куполе Фуджи, чем на станции Востоке. Это может свидетельствовать о различии структурных свойств снега, влияющих на его теплофизические свойства, в указанных пунктах, характеризующихся в целом близкими климатическими условиями льдообразования. Данное предположение еще раз подчеркивает то, что именно структурные характеристики снега (в частности,

относительная площадь контактов ледяных зерен) определяют его кондуктивную теплопроводность, а связь последней с плотностью (пористостью) снега обусловлена сложной зависимостью плотности от структуры слагающих снег ледяных агрегатов.

В работе впервые представлены результаты измерений температуры снежной толщи до глубины 10 м, выполненные в районе станции Восток автономной системой TAUTO в период с 2010 по 2017 г. Проведенное исследование — лишь первый шаг в использовании полученного уникального набора данных. Уточненные с его помощью параметры модели теплопереноса будут использованы при реконструкции межгодового хода эффективной температуры поверхности ледникового покрова по данным мониторинга температуры верхнего 100-метрового слоя ледника. В дальнейшем мы планируем также провести более детальные исследования временной (связанной с метаморфизмом снега) и пространственной (по глубине) изменчивости теплофизических характеристик снега на основе анализа суточных вариаций температуры в летние сезоны на верхних горизонтах снежной толщи, в слое, где возможны проявления других, помимо кондуктивного, механизмов теплопереноса.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 18–55–16002 НЦНИЛ\_а. Исследование проводилось в рамках деятельности российско-французской Международной ассоциированной лаборатории (МАЛ) «Ледниковые архивы данных о климате и окружающей среде». Авторы благодарны Российской антарктической экспедиции и Французскому полярному институту за логистическую поддержку работ на станции Восток.

**Acknowledgement.** This work was financially supported by the Russian Fund for Basic Research, grant 18–55–16002 НЦНИЛ\_а. The research was carried out in the network of the Russian-French International Associated Laboratory (LIA) “Climates and Environments from Ice Archives”. We are grateful to the Russian Antarctic Expedition and French Polar Institute which provided logistic support for this work at Vostok Station.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cuffey K.M., Alley R.B., Grootes P.M., Bolzan J.M., Anandakrishnan S. Calibration of the  $\delta^{18}\text{O}$  isotopic paleothermometer for central Greenland, using borehole temperatures // *Journal of Glaciology*. 1994. V. 40. № 135. P. 341–349.
2. Johnsen S., Dahl-Jensen D., Dansgaard W., Gundestrup N. Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 1995. V. 47. № 5. P. 624–629. doi: 10.3402/tellusb.v47i5.16077.
3. Salamatin A.N., Lipenkov V.Ya., Barkov N.I., Jouzel J., Petit J.R., Raynaud D. Ice-core age dating and palaeothermometer calibration based on isotope and temperature profiles from deep boreholes at Vostok Station (East Antarctica) // *Journal of Geophysical Research*. 1998. V. 103. № D8. P. 8963–8977.
4. Brandt R.E., Warren S.G. Temperature measurements and heat transfer in near-surface snow at the South Pole // *Journal of Glaciology*. 1997. V. 43. № 144. P. 339–351.
5. Riche F., Schneebeli M. Thermal conductivity of snow measured by three independent methods and anisotropy considerations // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 217–227. doi:10.5194/tc-7-217-2013.
6. Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // *Journal of Glaciology*. 1997. V. 43. № 143. P. 26–41.
7. Calonne N., Flin F., Morin S., Lesaffre B., Rolland du Roscoat S., Geindreau C. Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 38. P. L23501. doi:10.1029/2011GL049234.

8. *Morin S., Domine F., Arnaud L., Picard G.* In-situ monitoring of the time evolution of the effective thermal conductivity of snow // *Cold Regions Science and Technology*. 2010. V. 64. P. 73–80.
9. *Lefebvre E., Arnaud L., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Picard G., Petit J.-R.* Snow temperature measurements at Vostok station from an autonomous recording system (TAUTO): preliminary results from the first year operation // *Лед и Снег*. 2012. № 4 (120). С. 138–145.
10. *Саламатин А.Н., Ширавва Е., Муравьев Я.Д., Зиганишин М.Ф.* Теплоперенос в сезонном деятельном слое ледникового купола Горшкова на вершине вулкана Ушковского, Камчатка // *Материалы гляциологических исследований*. 2001. Вып. 90. С. 100–106.
11. *Salamatın A.N., Muravyev Y.D., Shiraiwa T., Matsuoka K.* Modeling Dynamics of Glaciers in Volcanic Craters // *Journal of Glaciology*. 2000. V. 46. № 153. P. 177–187.
12. *Hobbs P.V.* *Ice Physics*. Oxford: Clarendon Press, 1974. 804 p.
13. *Slack G.A.* Thermal conductivity of ice // *Physical Review B*. 1980. V. 22. № 6. P. 3065–3071.
14. *Salamatın A.N.* Paleoclimatic reconstructions based on borehole temperature measurements in ice sheets. Possibilities and limitations // *Physics of Ice Core Records*. Sapporo: Hokkaido University Press, 2000. P. 243–282.
15. *Hondoh T., Narita H., Hori A., Fujii M., Shoji H., Kameda T., Mae S., Fujita S., Ikeda T., Fukazawa H., Fukumura T., Azuma N., Wang Y., Kawada K., Watanabe O., Motoyama H.* Basic analyses of Dome Fuji deep ice core Part 2: Physical properties // *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.* 1999. V. 13. P. 90–98.
16. *Липенков В.Я., Шибавва Ю.А., Саламатин А.Н., Екайкин А.А., Вострецов Р.Н., Преображенская А.В.* Современные климатические изменения, зарегистрированные в вариациях температуры верхнего 80-метрового слоя ледниковой толщи на станции Восток // *Материалы гляциологических исследований*. 2004. Вып. 97. С. 44–56.
17. JARE Data Reports № 223, *Glaciology*, 26. National Institute of Polar Research, 1997. P. 49–66.
18. JARE Data Reports № 234, *Glaciology*, 27. National Institute of Polar Research, 1998. P. 15–33.
19. *Красс М.С., Мерзликін В.Г.* Радиационная теплофизика снега и льда. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 264 с.
20. *Войтковский К.Ф., Голубев В.Н., Лантева Н.И., Троикина Е.С., Ушакова Л.А., Павлов А.В.* Массоперенос и метаморфизм в снежном покрове // *Материалы гляциологических исследований*. 1976. Вып. 25. С. 146–152.
21. *Van Ommen T.D., Morgan V.I., Jacka T.H., Woon S., Elcheikh A.* Near-surface temperatures in the Dome Summit South (Law Dom, East Antarctica) borehole // *Annals of Glaciology*. 1999. V. 29. P. 141–144.
22. *Павлов А.В.* Теплофизика ландшафтов / Отв. ред. П.И. Мельников. Новосибирск: Наука, 1979. 285 с.
23. *Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А.* Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // *Криосфера Земли*. 2017. Т. XXI. № 3. С. 60–68.

## REFERENCES

1. *Cuffey K.M., Alley R.B., Grootes P.M., Bolzan J.M., Anandakrishnan S.* Calibration of the  $\delta^{18}\text{O}$  isotopic paleothermometer for central Greenland, using borehole temperatures. *Journal of Glaciology*. 1994, 40, 135: 341–349.
2. *Johnsen S., Dahl-Jensen D., Dansgaard W., Gundestrup N.* Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 1995, 47, 5: 624–629. doi: 10.3402/tellusb.v47i5.16077.
3. *Salamatın A.N., Lipenkov V.Ya., Barkov N.I., Jouzel J., Petit J.R., Raynaud D.* Ice-core age dating and palaeothermometer calibration based on isotope and temperature profiles from deep boreholes at Vostok Station (East Antarctica). *Journal of Geophysical Research*. 1998, 103, D8: 8963–8977.

4. Brandt R.E., Warren S.G. Temperature measurements and heat transfer in near-surface snow at the South Pole. *Journal of Glaciology*. 1997, 43, 144: 339–351.
5. Riche F., Schneebeli M. Thermal conductivity of snow measured by three independent methods and anisotropy considerations. *The Cryosphere*. 2013, 7: 217–227. doi:10.5194/tc-7-217-2013.
6. Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow. *Journal of Glaciology*. 1997, 43, 143: 26–41.
7. Calonne N., Flin F., Morin S., Lesaffre B., Rolland du Roscoat S., Geindreau C. Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow. *Geophysical Research Letters*. 2011, 38: L23501. doi:10.1029/2011GL049234.
8. Morin S., Domine F., Arnaud L., Picard G. In-situ monitoring of the time evolution of the effective thermal conductivity of snow. *Cold Regions Science and Technology*. 2010, 64: 73–80.
9. Lefebvre E., Arnaud L., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Picard G., Petit J.-R. Snow temperature measurements at Vostok station from an autonomous recording system (TAUTO): preliminary results from the first year operation. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2012, 4 (120): 138–145.
10. Salamatin A.N., Shiraiwa E., Murav'ev Ya.D., Ziganshin M.F. Heat transfer in seasonal active layer of Gorshkov Ice Cap, Ushkovskiy Volcano summit, Kamchatka. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2001, 90: 100–106. [In Russian].
11. Salamatin A.N., Muravyev Y.D., Shiraiwa T., Matsuoka K. Modeling Dynamics of Glaciers in Volcanic Craters. *Journal of Glaciology*. 2000, 46, 153: 177–187.
12. Hobbs P.V. *Ice Physics*. Oxford: Clarendon Press, 1974: 804 p.
13. Slack G.A. Thermal conductivity of ice. *Physical Review B*. 1980, 22, 6: 3065–3071.
14. Salamatin A.N. Paleoclimatic reconstructions based on borehole temperature measurements in ice sheets. Possibilities and limitations. *Physics of Ice Core Records*. Sapporo: Hokkaido University Press, 2000: 243–282.
15. Hondoh T., Narita H., Hori A., Fujii M., Shoji H., Kameda T., Mae S., Fujita S., Ikeda T., Fukazawa H., Fukumura T., Azuma N., Wang Y., Kawada K., Watanabe O., Motoyama H. Basic analyses of Dome Fuji deep ice core Part 2: Physical properties. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.* 1999, 13: 90–98.
16. Lipenkov V.Ya., Shibaev Yu.A., Salamatin A.N., Ekaykin A.A., Vostretsov R.N., Preobrazhenskaya A.V. Current climate changes recorded in ice temperature variations in upper 80-m layer, Vostok station area. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2004, 97: 44–56. [In Russian].
17. JARE Data Reports № 223, *Glaciology*, 26. National Institute of Polar Research, 1997: 49–66.
18. JARE Data Reports № 234, *Glaciology*, 27. National Institute of Polar Research, 1998: 15–33.
19. Krass M.S., Merzlikin V.G. Radiacionnaja teplofizika snega i l'da. Radiation thermophysics of snow and ice. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990: 264 p. [In Russian].
20. Voytkovskiy K.F., Golubev V.N., Lapteva N.I., Troshkina E.S., Ushakova L.A., Pavlov A.V. Mass transport and metamorphism in snow cover. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1976, 25: 146–152. [In Russian].
21. Van Ommen T.D., Morgan V.I., Jacka T.H., Woon S., Elcheikh A. Near-surface temperatures in the Dome Summit South (Law Dom, East Antarctica) borehole. *Annals of Glaciology*. 1999, 29: 141–144.
22. Pavlov A.V. *Teplofizika landshaftov*. Thermal physics of landscapes. Novosibirsk: Nauka, 1979: 285 p. [In Russian].
23. Osokin N.I., Sosnovskiy A.V., Chernov R.A. Effective thermal conductivity of snow and its variations. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2017. XXI, 3: 60–68. [In Russian].