

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.345

DOI: 10.15372/KZ20240101

EDN: DPLPVK

**ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД
И ЛЕДНИКОВОГО ЛЬДА В ВЫСОКОГОРНОЙ ЧАСТИ ХРЕБТА СУНТАР-ХАЯТА
ЗА ПЕРИОД 1957–2017 ГГ.****П.Я. Константинов^{1,2,*}, А.Н. Федоров¹, Р.Н. Аргунов¹, П.В. Ефремов¹, Т. Кадота³, Т. Ширикава⁴**¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия² Томский государственный университет, лаборатория комплексных исследований Арктической системы “суша–шельф”, 634050, Томск, просп. Ленина, 36, Россия³ Японское агентство по морским и земным наукам и технологиям, 237-0061, 2-15 Нацусима-чо, Йокосука, Япония⁴ Технологический институт Китамы, инженерный факультет, 090-8507, 165 Кое-чо, Китамы, Япония*Автор для контакта, e-mail: konstantinov@mpi.ysn.ru

В 1957–1959 гг. по программе 3-го международного геофизического года в центральной части хребта Сунтар-Хаята на площадке высокогорной метеостанции проводились измерения температуры горных пород до глубины 20 м и температуры ледникового льда до глубины 45 м на леднике № 31. В 2012–2017 гг. российско-японской экспедицией здесь были выполнены новые измерения температуры горных пород и ледникового льда. Для лучшей сравнимости результатов повторные температурные наблюдения были проведены в местах, где проходили аналогичные работы в 1957–1959 гг. Сравнение данных 1958 и 2012 гг. по средней месячной температуре ледникового льда на глубине 10 м показало ее повышение на 1.0–1.6 °C. Из-за отсутствия в 2012–2017 гг. возможности прямых измерений температуры пород на глубине 20 м был использован косвенный метод оценки ее изменений. За последние 60 лет температура горных пород на глубине нулевой годовой амплитуды по приблизительной оценке могла максимально повыситься на 1.6 °C. На четырех экспериментальных участках осуществлены режимные исследования динамики сезонного протаивания пород, а на одном – динамики промерзания сезонноталого слоя.

Ключевые слова: изменение климата, многолетнемерзлые породы, ледники, температура, сезонное протаивание, сезонное промерзание.

Ссылка для цитирования: Константинов П.Я., Федоров А.Н., Аргунов Р.Н., Ефремов П.В., Кадота Т., Ширикава Т. Изменение температуры многолетнемерзлых пород и ледникового льда в высокогорной части хребта Сунтар-Хаята за период 1957–2017 гг. // Криосфера Земли, 2023, т. XXVIII, № 1, с. 3–14. DOI: 10.15372/KZ20240101. EDN: DPLPVK.

**TEMPERATURE CHANGE IN PERMAFROST AND GLACIER ICE FOR THE PERIOD 1957–2017
IN THE HIGH-MOUNTAIN PART OF THE SUNTAR-KHAYATA RIDGE****P.Ya. Konstantinov^{1,2,*}, A.N. Fedorov¹, R.N. Argunov¹, P.V. Efremov¹, T. Kadota³, T. Shirakawa⁴**¹ Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia² Tomsk State University, Laboratory for Integrated Research of the Arctic Land-Shelf System, Lenin Ave 36, Tomsk, 634050 Russia³ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 237-0061, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Japan⁴ Kitami Institute of Technology, Faculty of Engineering, 090-8507, 165 Koen-cho, Kitami, Japan*Corresponding author; e-mail: konstantinov@mpi.ysn.ru

In 1957–1959 according to the program of the 3rd International Geophysical Year, in the central part of the Suntar-Khayata Ridge at the site of a high-mountain meteorological station the temperature of rocks was measured to a depth of 20 m and the temperature of glacial ice to a depth of 45 m on glacier No. 31. In 2012–2017 the Russian-Japanese expedition carried out new measurements of the temperature of rocks and glacial ice here. For better comparability of the results, repeated temperature observations were carried out in places where similar work was carried out in 1957–1959. Comparison of the data of 1958 and 2012 on the average monthly temperature of glacial ice at a depth of 10 m showed its increase by 1.0–1.6 °C. Absence in 2012–2017 the possibility of direct measurements of rock temperature at a depth of 20 m forced the use of an indirect method for assessing its changes. Over the past 60 years, the temperature of rocks at a depth of annual zero amplitude, according to a approximate estimate, could have increased maximum by 1.6 °C. On four experimental sites regime studies of the dynamics of thawing were carried out, and on one site, the dynamics of freezing of the seasonally thawed layer.

Keywords: climate change, permafrost, glaciers, ground temperature, seasonal thaw, seasonal freezing.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках научной программы 3-го международного геофизического года (МГГ) в 1957–1959 гг. были организованы комплексные исследования высокогорной части горного хребта Сунтар-Хаята (Северо-Восток России). Они проводились Институтом мерзловедения им. В.А. Обручева АН СССР совместно с Колымским отделением Гидрометеорологической службы СССР. Специально для этого проекта была построена и введена в действие метеостанция на высоте 2070 м над уровнем моря. Комплекс исследований включал гляциологические, геоморфологические, метеорологические и геоботанические исследования. Результаты этих работ были обобщены в двух монографиях и двух сборниках [Корейша, 1963а,б; Сапожников, 1963; Граев и др., 1964]. В научную программу входили также работы по изучению термического режима горной мерзлоты и ледникового льда [Граев, 1962]. В период с 1960 по 2010 г. этот регион продолжал изучаться гляциологами на основе дистанционных методов с проведением кратковременных полевых работ рекогносцировочного характера. Они показали процесс многолетней деградации ледников хр. Сунтар-Хаята, значительно усилившийся за последние 30 лет [Виноградов и др., 1972; Ананичева и др., 2003, 2006; Yamada et al., 2002; Takahashi et al., 2011]. С 1945 по 2003 г. площадь оледенения уменьшилась примерно на 20 % [Ананичева и др., 2006].

В 2012–2014 гг. здесь работала российско-японская научная экспедиция. В ее организации и проведении приняли участие Институт мерзловедения им. П.И. Мельникова СО РАН, Институт географии РАН, Японское агентство по морским и земным наукам и технологиям, Институт полярных исследований (Япония), Институт технологий Китами (Япония) и Университет Чиба (Япония). Результаты гляциологических, геоморфологических и биологических исследований этой экспедиции отражены в ряде публикаций [Галанин и др., 2013, 2014; Мельников и др., 2013; Мавлюдов, Ананичева, 2016; Nakazawa et al., 2015; Shirakawa et al., 2016; Zhang et al., 2017]. В настоящей работе представлены результаты наблюдений за термическим состоянием мерзлых пород и ледникового льда в высокогорной части горного хребта Сунтар-Хаята, проведенные участниками российско-японской экспедиции через 55–60 лет после работ по программе 3-го МГГ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Горный хребет Сунтар-Хаята находится на Северо-Востоке России. Он является продолжением Верхоянской горной системы и простирается на 450 км, от верховьев р. Томпо до верхнего

течения р. Ина. Хребет является водоразделом крупных рек Алдан, Индигирка и рек бассейна Охотского моря. Северная часть его до среднего течения р. Сунтар с субмеридиональным направлением имеет высоты до 2200 м. Центральная, наиболее возвышенная часть хребта, простирающаяся с северо-запада на юго-восток, поднимается выше 2900 м. В южной части хребет имеет субширотное направление, понижаясь до 1900 м. Горная система сложена в основном породами пермского и триасового возраста (верхоянский комплекс). Горные породы представлены сложно переслаиваемыми глинистыми сланцами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами. В высокогорных массивах встречаются дайки гранитоидов. Породы верхоянского комплекса несогласно перекрыты меловой вулканической толщей (туфами, липаритами, порфирами).

Современное оледенение имеет место в центральной, наиболее высокой части хребта. По состоянию на 2006 г. здесь насчитывается 195 ледников общей площадью 163 км² [Ананичева и др., 2006]. Современные ледники хр. Сунтар-Хаята занимают как древние ледниковые, так и созданные в голоцене формы. Выделяются каровые, долинные и висячие ледники. Высокогорные районы отличаются суровым климатом арктической пустыни, но более увлажненным по сравнению с арктическими равнинами. Холодный период года длится девять месяцев. На высотах более 2000 м средняя температура января –27 °С. Здесь дуют сильные ветры, обычны метели. Чаше бывают ветры северо-западных направлений. Высота снежного покрова в горах составляет 50–90 см, увеличиваясь до нескольких метров в местах надувов. Лето в горах прохладное и продолжается с середины июня до конца августа. Средняя температура июля составляет 7 °С. Безморозный период отсутствует. Для летнего периода характерна значительная облачность. Годовое количество осадков на главном водоразделе – до 1000 мм. Сумма летних осадков существенно выше зимних. Повсеместно развиты многолетнемерзлые породы (ММП) сплошного распространения со среднегодовыми температурами пород –5...–13 °С. Их мощность измерена инструментально в западной пониженной части хребта, где она достигает 380–420 м [Балобаев, Левченко, 1978].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метеостанция, действовавшая в 1957–1959 гг. по программе 3-го МГГ (далее именуется как метеостанция МГГ) (рис. 1), находится на перевале горной гряды, расположенном между долинами рек Сунтар и Бургали (62°37'28" с.ш., 140°48'20" в.д.). Абсолютная высота площадки метеостанции составляет 2070 м. Поверхность по-



Рис. 1. Метеостанция МГГ и ледник № 31 (на заднем плане).

крыта глыбово-щебнистым обломочным материалом. Растительный покров отсутствует, за исключением накипных лишайников. По данным бурения, на рассматриваемом участке до глубины 9.6 м развиты глыбово-щебнистые и суглинисто-щебнистые отложения с прослоями льда. В интервале глубин 9.6–15.3 м расположены трещиноватые кремнистые аргиллиты, которые ниже сменяются крепкими кремнистыми аргиллитами. Мощность сезонноталого слоя (СТС) составляет 1.0–1.2 м.

В 1957 г. были пробурены три скважины глубиной 1, 5 и 20 м, в которых на тросах были установлены металлические термометры сопротивления. После их установки скважины не засыпались грунтом. Измерения до глубины 1 м проводились 4 раза в день, в интервале глубин 1.5–5 м – 1 раз в день, а в интервале глубин 7.5–20 м – 1 раз в 5 дней. Наблюдения за температурой пород проводились с 1957 по 1959 г. В этот период также измерялись температуры воздуха с периодичностью несколько раз в день. Наблюдения за температурой воздуха были продолжены в 1961–1963 гг. Для определения температуры ледникового льда в

средней части ледника № 31 летом 1958 г. была пробурена скважина глубиной 45 м, в которой был вморожен проводной измерительный комплект на основе термисторов. Измерения температуры в этой скважине проводились по декабрь 1958 г.

Российско-японской экспедицией в 2012 г. для наблюдений за термическим режимом пород были выбраны четыре площадки на разных формах горного рельефа (табл. 1, рис. 2, 3).

Площадка 1 оборудована на территории метеостанции МГГ около старых температурных скважин. Описание площадки приведено выше. Площадка 2 расположена на поверхности эрозионной террасы р. Бургали на удалении 50 м от русла реки. Поверхность террасы на данном участке относительно ровная. Верхняя 1.5-метровая толща составлена гравийно-галечными отложениями с включениями песка и валунов. Площадка 3 выбрана на микроседловине в нижней части горного склона западной экспозиции. Ее размеры составляют 10 × 5 м. Породы до глубины 1.2 м представлены супесями и песками коричневатого-желтого цвета с включениями дресвы. Площадка 4 нахо-

Таблица 1. Характеристика экспериментальных площадок

Номер	Форма рельефа	Абс. высота, м	Состав пород	Макс. мощность СТС, м	Глубина расположения датчиков, м	Период сбора данных
1	Горный перевал	2070	Щебень, дресва, глыбы	1.10–1.20	0.0, 0.6, 0.8, 1.2	Август 2012 – август 2017 г.
2	Эрозионная терраса р. Бургали	1982	Галька, гравий, песок	1.30–1.40	0.0, 0.4, 0.8, 1.2	Август 2012 – август 2017 г.
3	Микроседловина на горном склоне	2075	Супесь, песок, дресва	1.00–1.05	0.0, 0.4, 0.8, 1.2	Август 2012 – август 2017 г.
4	Моренная гряда	2022	Галька, гравий, валуны	1.30–1.40	0.0, 0.4, 0.8, 1.2	Август 2012 – август 2017 г.
5	Средняя часть ледника № 31	2248	Ледниковый лед	–	1.0, 3.0, 5.0, 10.0	Август 2012 – август 2015 г.
6	Верхняя часть ледника № 31	2443	Ледниковый лед	–	1.0, 3.0, 5.0, 10.0	Август 2012 – август 2015 г.

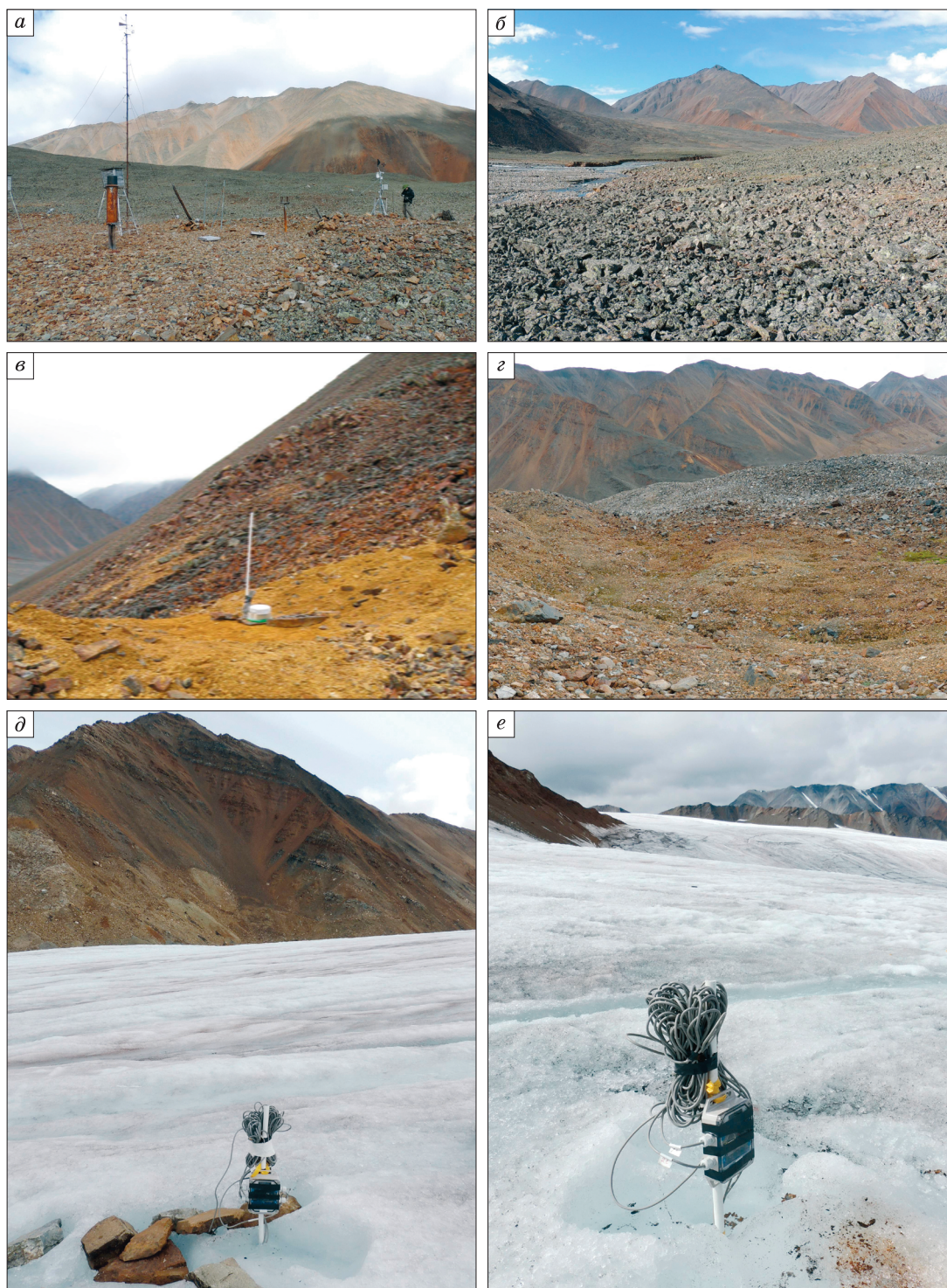


Рис. 2. Общий вид экспериментальных площадок.

a – площадка 1 (метеостанция МГГ); *б* – площадка 2 (эрозионная терраса р. Бургали); *в* – площадка 3 (микроседловина на горном склоне); *г* – площадка 4 (моренная гряда); *д* – площадка 5 (средняя часть ледника № 31); *е* – площадка 6 (верхняя часть ледника № 31).

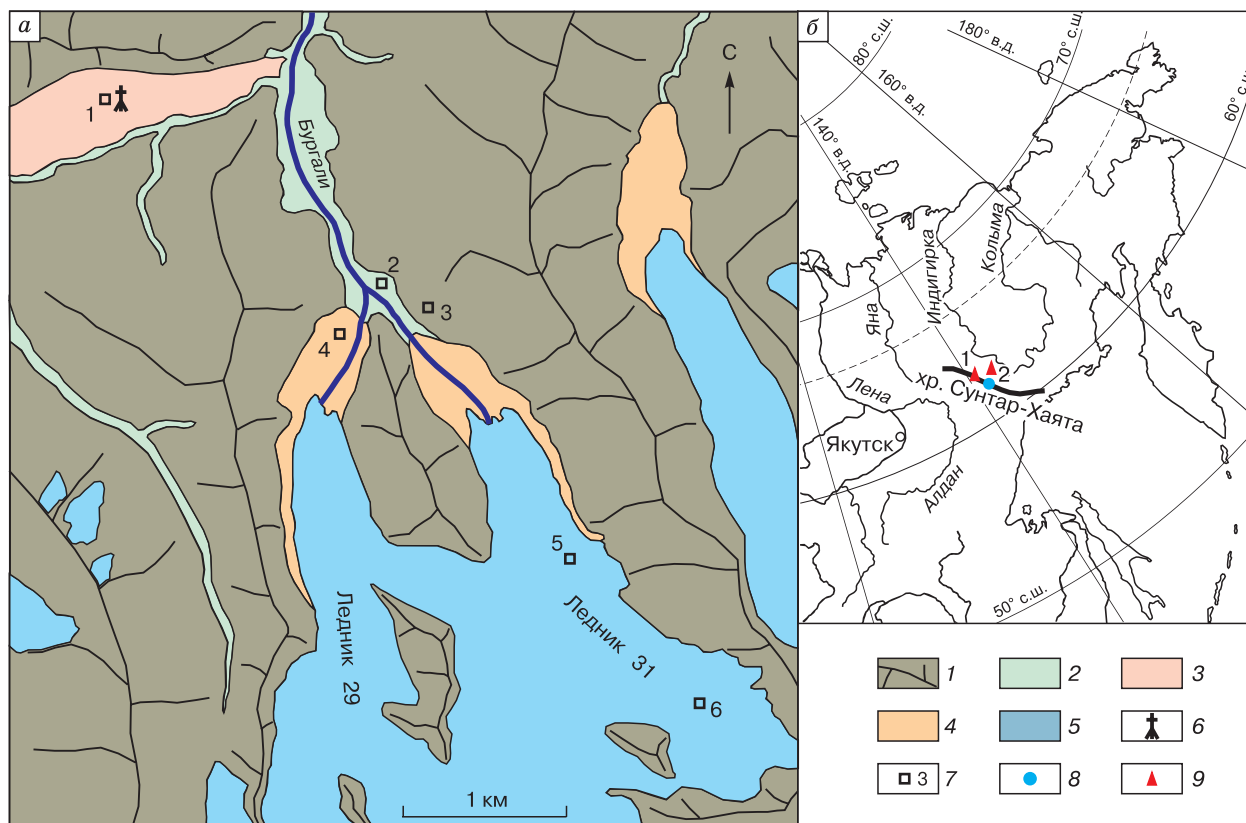


Рис. 3. Картохема участка исследований.

а: 1 – линии хребтов; 2 – днища долин; 3 – горный перевал; 4 – моренные гряды; 5 – ледники; 6 – метеостанция МГГ; 7 – экспериментальная площадка и ее номер; б: 8 – участок исследований на мелкомасштабной схеме; 9 – метеостанции на мелкомасштабной схеме (1 – Восточная, 2 – Агаякан).

дится на привершинной поверхности конечной моренной гряды. Морена составлена валунно-галечной толщей, относительная высота которой составляет 8–10 м. Поверхность морены неровная, представляющая собой чередование валов и понижений. На всех площадках растительный покров отсутствует (кроме накипных лишайников).

В качестве измерительных средств на всех площадках использовались четырехканальные температурные логгеры НОВО U12-008 с температурными датчиками ТМС-НД. Перед началом полевых работ все регистраторы и датчики подверглись контрольной проверке показаний температуры в лабораторных условиях с определением необходимых поправок. Так как экспедиция не располагала буровым станком для бурения горных пород, установка температурных датчиков осуществлялась проходкой шурфов. Информация по глубине установки датчиков дана в табл. 1. После установки проводных комплектов температурных датчиков шурфы полностью засыпались ранее извлеченной породой. Для наилучшего сравнения с данными температуры грунтов, полученными в

1957–1959 гг., площадка 1 была оборудована в непосредственной близости от старых температурных скважин метеостанции МГГ.

При рекогносцировочном обследовании на поверхности ледника № 31 был найден старый проводной термоизмерительный комплект, который за 55 лет оказался на поверхности ледника в результате его таяния. Имея данные о скорости движения ледника, полученные в период работы комплексной экспедиции МГГ, для установки температурных датчиков в ледниковом льду было выбрано место выше на 200 м по осевой линии ледника, примерно соответствующее местоположению скважины в 1957–1959 гг. Здесь с использованием портативной парогенераторной установки была пробурена скважина глубиной 10 м, в которой были установлены температурные датчики ТМС-НД на глубинах 1, 3, 5 и 10 м (см. табл. 1, рис. 2). Вторая температурная скважина глубиной 10 м была оборудована в верхней части ледника № 31.

В наших исследованиях средняя годовая температура пород на разных глубинах (t_{cp}) определя-

ется не для календарного года, а для расчетного года, предложенного А.В. Павловым [1965]. За начало годового периода принимается средняя многолетняя дата начала зимнего промерзания пород, которая совпадает по времени с переходом температуры поверхности почвы к устойчивым отрицательным значениям. При этом весь холодный период оказывается внутри одного года. Такой подход в выборе границ годового периода для расчета $t_{\text{ср}}$ более корректен для области ММП, где термический режим грунта больше определяется условиями холодного периода, чем теплого. В наших исследованиях за начало расчетного годового периода принимается 1 сентября. Для обозначения такого годового периода используются двойное обозначение. Например, запись 2012/13 означает, что рассматривается расчетный год с 1 сентября 2012 г. по 31 августа 2013 г. Значения средней годовой температуры воздуха также определялись для расчетных годовых периодов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные метеостанций свидетельствуют о существенном потеплении в исследуемом регионе за последние 60 лет. На рис. 4 приведены графики изменения среднегодовой температуры воздуха с 1955 по 2020 г. по двум наиболее близким к участ-

ку исследований метеостанциям: Агаякан (абс. высота 777 м; 63°20'07" с.ш., 141°43'56" в.д.) и Восточная (абс. высота 1286 м; 63°14'27" с.ш., 139°37'53" в.д.). Тренды повышения температуры воздуха составили для метеостанции Агаякан 0.38 °C/10 лет и для метеостанции Восточная – 0.25 °C/10 лет. Как видно, потепление за рассматриваемый период было сильнее на более низком по абсолютной высоте участке. В высокогорной части хр. Сунтар-Хаята температурный режим воздуха изучался в период работы метеостанции МГТ (1957–1959 и 1961–1963 гг.) и российско-японской экспедиции (2012–2014 гг.). К сожалению, в последние годы по техническим причинам удалось получить такие данные только за один годовой период. На рис. 5 приведены значения средней годовой температуры воздуха на площадке высокогорной метеостанции за разные годы. Наиболее ее низкое значение здесь было отмечено в 1958 г. (–14.9 °C), а наиболее высокое – в 2012 г. (–12.1 °C). В табл. 2 дано сравнение средней годовой температуры воздуха на метеостанции МГТ с более низко расположенными метеостанциями. Хорошо просматривается близость значений температуры воздуха на метеостанции МГТ с метеостанцией Восточная. Отсюда следует предположе-

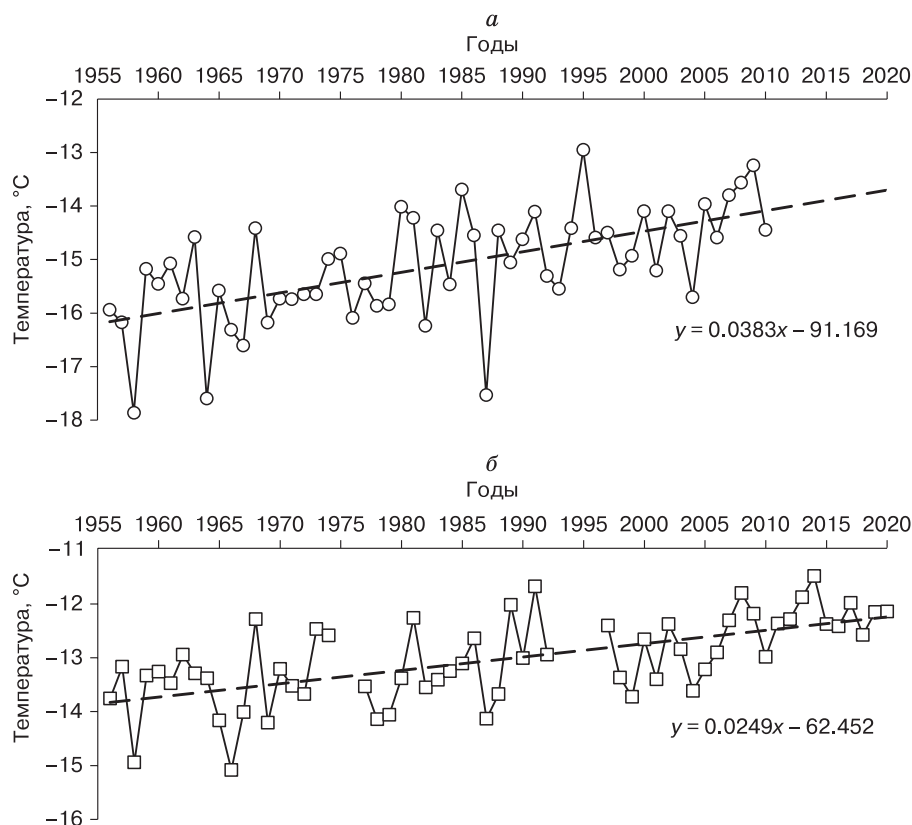


Рис. 4. Изменение средней годовой температуры воздуха в 1955–2020 гг. по данным метеостанций Агаякан (а) и Восточная (б).

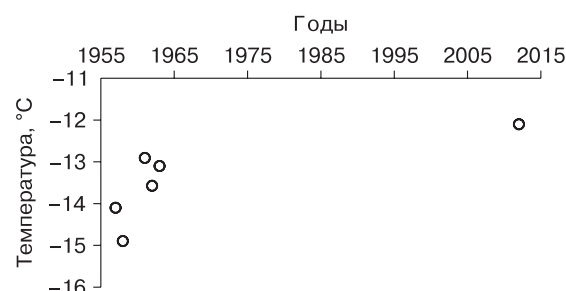


Рис. 5. Средняя годовая температура воздуха на площадке метеостанции МГТ в разные годы.

Таблица 2. Сравнение средней годовой температуры воздуха (°C) на метеостанциях МГТ и метеостанциях Агаякан и Восточная

Расчетный год	Агаякан	Восточная	МГТ
1956/57	-16.2	-13.2	-14.1
1957/58	-17.9	-14.9	-14.9
1960/61	-15.1	-13.5	-12.9
1961/62	-15.7	-12.9	-13.6
1962/63	-14.6	-13.3	-13.1
2011/12	–	-12.3	-12.1
Абс. высота, м	777	1286	2070

ние, что выше абсолютной отметки 1286 м температура воздуха почти не меняется.

Количественные значения средней годовой температуры пород были получены авторами на четырех площадках за пять расчетных годовых периодов с 2012/13 по 2016/17. На рис. 6 показаны флуктуации t_{cp} на глубине 1.2 м за указанный период. Как видно на рис. 6, более низкие температуры ($-7.2...-9.0$ °C) характерны для моренной гряды (площадка 4) и микроседловины на склоне ($-7.1...-8.7$ °C) (площадка 3), а более высокие – для эрозионной террасы р. Бургали ($-5.5...-7.1$ °C) (площадка 2) и горного перевала ($-7.2...-7.8$ °C) (площадка 1). Наименьшие межгодовые вариации t_{cp} на глубине 1.2 м за все время наблюдений отмечены на горном перевале (0.6 °C), что, по-

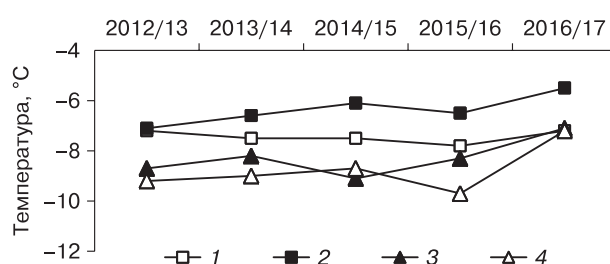


Рис. 6. Средняя годовая температура пород на глубине 1.2 м за весь период наблюдений.

1 – площадка 1; 2 – площадка 2; 3 – площадка 3; 4 – площадка 4.

видимому, связано с ежегодным наличием здесь снежных надувов.

Максимальная мощность СТС, определенная по температурным данным, на всех площадках за весь период наблюдений находилась в пределах 1.0–1.4 м (см. табл. 1). Наименьшее протаивание отмечено на площадке 3, где СТС составлен мелкодисперсными отложениями. Начало процесса протаивания пород на площадках сильно различается в зависимости от положения в рельефе, от которого зависит время схода снежного покрова. Как следует из данных табл. 3, наиболее ранние даты начала протаивания (30 мая – 13 июня) отмечены на микроседловине горного склона юго-западной экспозиции (площадка 3), где снежный покров сходит раньше, чем на остальных площадках. Наиболее поздние даты начала протаивания (24 июня – 1 июля) зафиксированы на горном перевале (площадка 1), где сход снега наиболее поздний из-за формирования снежных надувов, так как этот участок находится у подножия горного склона. Наибольшие темпы протаивания в начале лета отмечены на горном перевале (6–12 см/сут) и моренной гряде (4–13 см/сут), где мелкодисперсный материал в СТС практически отсутствует. Наименьшие темпы протаивания для начала лета характерны для микроседловины

Таблица 3. Темпы протаивания грунтов СТС на экспериментальных площадках в 2013–2017 гг.

Площадка	Форма рельефа	Состав грунтов	Даты начала протаивания СТС	Глубина, м	Темп протаивания, см/сут
1	Горный перевал	Щебень, дресва, глыбы	24.06–01.07	0.0–0.6	6.0–12.0
				0.8–1.2	0.9–1.5
2	Эрозионная терраса р. Бургали	Галька, гравий, песок крупно-зернистый	09.06–15.06	0.0–0.4	3.6–8.0
				0.4–0.8	1.5–3.6
				0.8–1.2	1.0–1.3
3	Микроседловина на горном склоне	Супесь, песок, дресва	30.05–13.06	0.0–0.4	3.1–6.0
				0.4–0.8	1.1–1.8
4	Моренная гряда	Галька, гравий, валуны	05.06–22.06	0.0–0.4	4.0–13.0
				0.4–0.8	1.9–6.0
				0.8–1.2	1.0–1.6

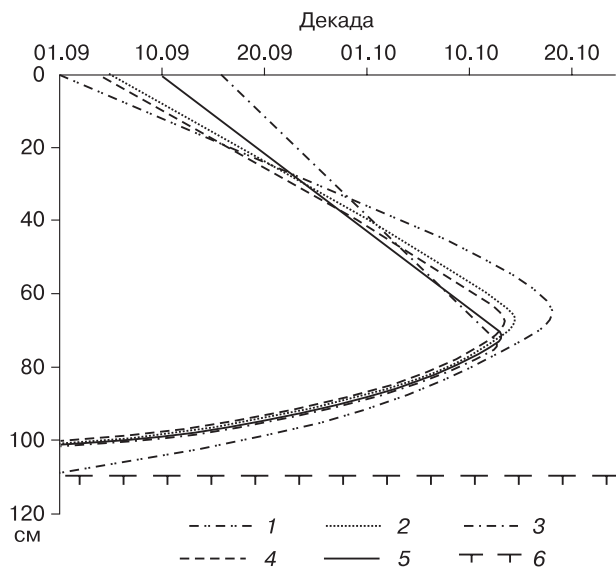


Рис. 7. Динамика промерзания сезонно-талого слоя на площадке 3 в зимние сезоны с 2012 по 2017 г.

1 – 2012/13; 2 – 2013/14; 3 – 2014/15; 4 – 2015/16; 5 – 2016/17; 6 – верхняя поверхность ММП.

горного склона (3.1–6.0 см/сут), где в СТС преобладают мелкодисперсные отложения. В конце летнего сезона темпы протаивания пород нижней части СТС не сильно различаются на всех площадках (см. табл. 3).

Промерзание пород на площадках в основном начиналось в первой декаде сентября и только зимой 2014/15 г. оно было аномально поздним (17–18 сентября). Динамика процесса промерзания в течение пяти зим изучалась по температурным данным на площадке 3, оборудованной на микроседловине горного склона, где приповерхностные отложения представлены дресвянистыми супесями и песками (рис. 7). По причине низкой среднегодовой температуры ММП (-8°C) промерзание СТС здесь идет активно не только вниз от дневной поверхности, но и вверх от поверхности ММП. В разные годы за период наблюдений скорость промерзания на площадке 3 изменялась от 1.3 до 2.8 м/сут при движении фронта промерзания вниз от дневной поверхности и от 0.7 до 1.0 см/сут при движении фронта промерзания вверх от поверхности ММП. В относительном выражении 60–70 % мощности СТС промерзло сверху и 30–40 % снизу.

Данные по температуре ледникового льда для изначально выбранных глубин расположения датчиков можно считать корректными только в первый год измерений, так как из-за стайвания приповерхностного слоя ледника в теплый период положение температурных датчиков относитель-

но поверхности ледника в последующие годы меняется. Толщина оттаявшего слоя льда около скважин определялась авторами в конце августа измерением длины проводного комплекта, вышедшего на поверхность. В средней части ледника летом 2013 г. стоял слой льда мощностью 1.2 м, летом 2014 г. – 0.8 м и летом 2015 г. – 2.2 м. В верхней части ледника оттаивание льда за указанные годы составило 1.2, 0.4 и 1.9 м соответственно. Из приведенных данных следует, что обе температурные площадки на леднике находятся в зоне абляции. Это согласуется с данными гляциологов, согласно которым на леднике № 31 в 2012–2014 гг. практически отсутствовала зона аккумуляции, а баланс массы был устойчиво отрицательным [Мавлюдов, Ананичева, 2016].

По данным геофизической съемки в 2012–2013 гг. мощность ледника по осевой линии в средней части оценивается в 90–120 м, а в верхней части – в 120–150 м. На рис. 8 показаны сезонные колебания температуры ледникового льда на глубинах 3, 5 и 10 м за первый год наблюдений с сентября 2012 по сентябрь 2013 г. для средней и верхней частей ледника. Температура льда в средней части ледника на глубинах 3 и 5 м в течение года изменялась от -3.1 до -11.7°C , а в верхней его части – от -3.7 до -11.9°C . На глубине 10 м эти изменения были соответственно от -8.0 до -9.2°C и от -8.8 до -10.0°C . Как видно, разница температуры ледникового льда между его средней и верхней частями больше на глубине 10 м. На глубине 3 м максимум температуры льда на обоих участках отмечается в середине сентября, а минимум – в конце апреля. На глубине 5 м максимум и минимум температуры приходятся на конец октября и середину мая соответственно. На глубине 10 м максимальное повышение температуры льда происходит в середине января, а наибольшее понижение – в начале августа.

Особый интерес представляет сравнение температуры пород и ледникового льда, полученных в 1957–1959 и 2013–2017 гг. К сожалению, стволы скважин на площадке метеостанции, пробуренные в период исследований по программе МГГ, на момент работы российско-японской экспедиции были завалены грунтом, поэтому измерения в них оказались невозможными.

В табл. 4 приведены средние месячные и средние годовые температуры пород на метеорологической площадке на глубинах 1, 1.2 и 20 м, полученные по результатам измерений в 1957–1959 и 2012–2017 гг. В 2012 г. температурные датчики регистратора температуры были установлены в непосредственной близости от старых температурных скважин. Как следует из данных табл. 4, разница значений $t_{\text{ср}}$ на глубине 1 м в 1957/58 и 1958/59 расчетных годах была значительной (2.12°C). Это объясняется большими различиями

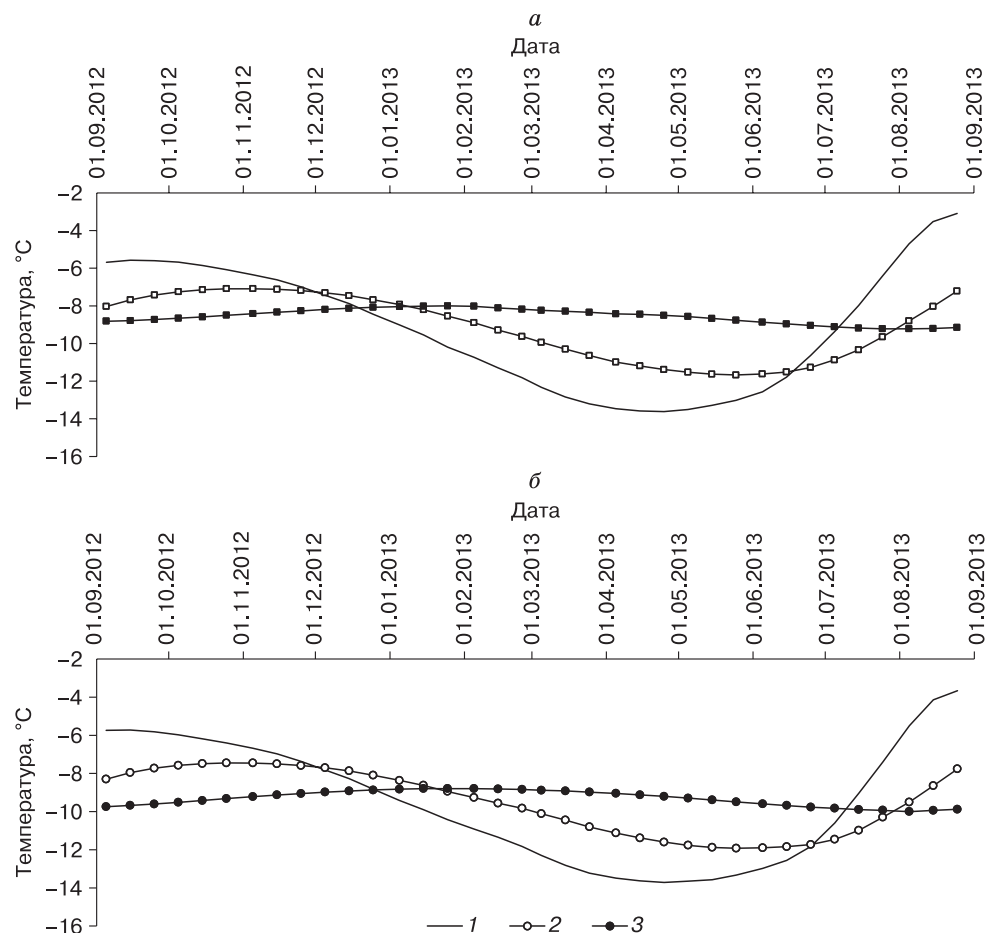


Рис. 8. Сезонные колебания температуры ледникового льда на глубинах 3 м (1), 5 м (2) и 10 м (3) в средней (а) и верхней (б) частях ледника № 31 с сентября 2012 по сентябрь 2013 г.

по условиям снегонакопления в эти годы. По материалам экспедиции МГТ, зимой 1957/58 г. уже к началу декабря мощность снежного покрова составила 71 см и достигла к концу зимы 100 см. Наоборот, зимой 1958/59 г. к началу декабря мощ-

ность снежного покрова составила только 31 см, а к концу зимы не превысила 50 см. Таким образом, температуру $t_{ср}$, полученную в 1957/58 и 1958/59 расчетных годах, нельзя считать близкой к средней многолетней величине $t_{ср}$ на глубине 1 м на

Таблица 4. Средние месячные и годовые температуры пород на участке метеостанции МГТ на глубинах 1, 1.2 и 20 м по результатам измерений в 1957–1959 и 2012–2017 гг.

Расчетный год	Глубина, м	Месяц												Средняя годовая температура, °C
		IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1957/58	1.0	-0.6	-3.4	-6.5	-9.9	-12.2	-14.2	-15.3	-15.2	-13.8	-9.6	-3.0	-1.3	-8.7
	20.0	-8.7	-9.0	-8.8	-8.8	-8.7	-8.6	-8.7	-8.7	-8.7	-8.8	-8.8	-8.9	-8.8
1958/59	1.0	-1.1	-4.5	-10.7	-15.7	-18.4	-20.1	-19.9	-18.2	-14.4	-4.6	-2.0	-0.8	-10.9
	20.0	-8.9	-8.8	-8.9	-8.8	-8.8	-8.8	-8.8	-8.8	-8.8	-8.9	-9.0	-9.1	-8.9
2012/13	1.2	-0.3	-2.6	-5.8	-9.2	-11.6	-12.8	-13.9	-13.6	-11.5	-3.5	-1.1	-0.1	-7.2
2013/14	1.2	-0.3	-3.7	-7.0	-9.2	-11.6	-13.4	-13.5	-13.2	-11.7	-4.2	-1.4	-0.4	-7.5
2014/15	1.2	-0.2	-3.3	-6.6	-9.4	-11.5	-12.8	-13.8	-13.7	-12.4	-4.7	-1.2	-0.2	-7.5
2015/16	1.2	-0.3	-3.0	-6.3	-9.7	-12.4	-14.5	-15.4	-14.4	-12.9	-3.2	-1.3	-0.2	-7.8
2016/17	1.2	-0.7	-3.5	-6.1	-9.0	-11.1	-12.1	-12.4	-12.2	-11.4	-5.7	-1.4	-0.3	-7.2

тот период. К этому следует добавить возможное влияние конвекции воздуха на температуру пород в верхних частях скважин, которые не были засыпаны грунтом. Из представленных соображений расчет градиента температуры в интервале глубин 1–20 м по данным режимных измерений в 1957–1959 гг. не представляется возможным.

В 2012–2017 гг. диапазон межгодовой изменчивости $t_{\text{ср}}$ на глубине 1.2 м составил всего 0.6 °C, что позволяет говорить о схожести основных внешних условий (температуры воздуха, высоты снежного покрова), определяющих термические условия приповерхностного слоя пород в указанные годы. Мощность СТС на площадке метеостанции составляет 1.1–1.2 м, поэтому глубину 1.2 м можно принять за верхнюю поверхность ММП. Следовательно, вполне обоснованно принять среднее значение $t_{\text{ср}}$ на глубине 1.2 м за пять расчетных годовых периодов как среднее многолетнее значение температуры верхней поверхности ММП в период работы российско-японской экспедиции. Если известен градиент температуры в слое годовых теплооборотов на участке исследований, то нетрудно определить температуру ММП на глубине 20 м в 2012–2017 гг. По данным экспедиции МГГ, глубина нулевой годовой амплитуды на площадке метеостанции составляет 23 м [Граве, 1962]. Поэтому глубину 20 м можно приближенно принять за нижнюю границу слоя годовых колебаний температуры. Таким образом, сравнение измеренного значения температуры пород на данной глубине в 1957–1959 гг. с рассчитанным по градиенту для периода 2012–2017 гг. позволит количественно оценить повышение температуры ММП в основании слоя годовых теплооборотов за период 1957–2017 гг.

Геотермический градиент в пределах горного хребта Сунтар-Хаята был измерен в его западной части, где находится месторождение полиметаллических руд Неждановское. Для высокогорной зоны этой части хребта он равен 1.2–1.4 °C/100 м [Балобаев, Левченко, 1978]. Отсюда можно получить, что на каждый метр глубины температура горных пород повышается в среднем на 0.013 °C. На глубине 1.2 м средняя температура за пять рас-

четных лет с 2012/13 по 2016/17 была равна –7.4 °C. Если воспользоваться приведенным выше значением геотермического градиента, то на площадке метеостанции на глубине 20 м в период между 2012 и 2017 гг. $t_{\text{ср}}$ можно считать равной –7.2 °C. В 1957–1959 гг. измеренная средняя $t_{\text{ср}}$ на глубине 20 м составила –8.8 °C. В результате получается, что на глубине 20 м величина $t_{\text{ср}}$ изменилась от –8.8 °C в 1957–1959 гг. до –7.2 °C в 2012–2017 гг. Таким образом, на площадке метеостанции МГГ температура ММП на нижней границе слоя годовых теплооборотов за период 1957–2017 гг. повысилась на 1.6 °C. Полученный результат следует считать приближенным, так как, во-первых, при расчете использовалось значение геотермического градиента, полученное непосредственно на участке исследований; во-вторых, в интервале глубин 1–20 м значение геотермического градиента в период 2012–2017 гг. могло быть меньше этого значения для всего слоя ММП. Принимая во внимание второе допущение, полученное значение 1.6 °C можно считать максимально возможным повышением температуры пород на глубине нулевой годовой амплитуды.

В период работы экспедиции МГГ температура ледникового льда на глубинах 3–10 м измерялась только несколько месяцев, поэтому сравнение с данными российско-японской экспедиции возможно только по месячным значениям температуры льда. В табл. 5 приведены средние месячные температуры ледникового льда на разных глубинах с сентября по декабрь, измеренные на одном и том же участке в средней части ледника № 31 в 1958 и 2012 гг. В 2012 г. на глубинах 3, 5 и 10 м средняя месячная температура льда была выше, чем в 1958 г., на 0.9–2.5, 1.5–2.4 и 1.0–1.6 °C соответственно. Так как измерения проводились в очень короткий период, для сравнения температурных условий ледникового льда за указанные годы лучше ограничиться глубиной 10 м, где минимальное влияние межгодовой изменчивости внешних условий на поверхности. На этой глубине температура ледникового льда в 2012 г. за четыре месяца с сентября по декабрь оказалась выше на 1.0–1.6 °C, чем в 1958 г.

Таблица 5.

Средние месячные температуры ледникового льда в средней части ледника № 31 в 1958 и 2012 гг.

Глубина, м	Сентябрь		Октябрь		Ноябрь		Декабрь	
	1958 г.	2012 г.	1958 г.	2012 г.	1958 г.	2012 г.	1958 г.	2012 г.
3	–7.0	–5.6	–7.0	–5.9	–7.6	–6.7	–10.4	–7.9
5	–10.1	–7.7	–8.7	–7.2	–8.7	–7.1	–9.0	–7.5
10	–9.8	–8.8	–9.8	–8.6	–9.8	–8.3	–9.7	–8.1
20	–9.2							
45	–7.8							

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температурные измерения, проведенные российско-японской экспедицией в 2012–2017 гг. на тех же участках, где в 1957–1959 гг. работала экспедиция МГГ, позволили количественно оценить влияние потепления климата на термические условия многолетнемерзлых пород и ледникового льда в высокогорной части горного хребта Сунтар-Хаята. Сравнение средних месячных температур ледникового льда на глубине 10 м за 1958 и 2012 гг. показало их повышение на 1.0–1.6 °С. За последние 60 лет на участке проведения исследований температура горных пород на глубине нулевой годовой амплитуды по приблизительной оценке могла максимально повыситься на 1.6 °С. По причине низкотемпературных ММП промерзание сезонноталого слоя здесь идет активно не только вниз от дневной поверхности, но и вверх от поверхности ММП. В относительном выражении 60–70 % мощности СТС промерзает сверху и 30–40 % снизу.

Благодарности. Российско-японские исследования в высокогорной части хребта Сунтар-Хаята в 2012–2014 гг. проводились при финансовой поддержке японского научного проекта “Исследовательский проект GRENE по изменению климата в Арктике” и японской научной программы “Исследование изменений земной среды для выяснения изменений криосферы в Северной Евразии”. Авторы благодарят коллег из Института географии РАН, Японского агентства по морским и земным наукам и технологиям, Института полярных исследований (Япония) и Университета Чибэ (Япония) за содействие при организации и проведении экспедиционных исследований.

Подготовка статьи выполнена в рамках бюджетного проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 122011400152-7 “Криогенные процессы и формирование природных рисков освоения мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири”.

Литература

- Ананичева М.Д., Давидович Н.В., Кононов Ю.М. и др. Ледники современного массива гор Сунтар-Хаята: изменения со времени МГГ // *Материалы гляциол. исслед.*, 2003, вып. 95, с. 86–92.
- Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Корейша М.М. Изменения ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001–2003 гг. // *Материалы гляциол. исслед.*, 2006, вып. 101, с. 163–168.
- Балобаев В.Т., Левченко А.И. Геотермические особенности и мерзлая зона хребта Сунтар-Хаята // *Геотеплофизические исследования в Сибири*. Новосибирск, Наука, 1978, с. 129–142.
- Виноградов О.Н., Голодковская Н.А., Корейша М.М., Серебрянный Л.Р. Новые данные о современном и древнем оледенении гор Сунтар-Хаята (по материалам исследований 1970 г.) // *Материалы гляциол. исслед.*, 1972, вып. 19, с. 80–91.
- Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадота Т. Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки // *Лед и снег*, 2013, № 4 (124), с. 30–42.
- Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадота Т. Возраст и размеры последнего ледникового максимума хребта Сунтар-Хаята на основе лихенометрии и теста остаточной прочности // *Криосфера Земли*, 2014, т. XVIII, № 2, с. 72–82.
- Граве Н.А. Тепловой баланс поверхностного слоя горных пород в районе современного оледенения и на низменности Восточной Якутии // *Исследования ледников и ледниковых районов*. М., Изд-во АН СССР, 1962, вып. 2, с. 161–175.
- Граве Н.А. Промерзание земной поверхности и оледенения хребта Сунтар-Хаята (Восточная Якутия) / Н.А. Граве, М.К. Гаврилова, Г.Ф. Гравис и др. М., Наука, 1964, 140 с.
- Корейша М.М. Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята (Результаты исследований по программе ММГ. Гляциология № 11). М., Изд-во АН СССР, 1963а, 170 с.
- Корейша М.М. Первичные материалы исследования ледников, тарынов (наледей) и снежного покрова в хребте Сунтар-Хаята // *Материалы гляциологических исследований*. Якутия. Сунтар-Хаята / Междудомств. геофиз. комиссия при Президиуме АН СССР. Междунар. геофиз. год 1957–1958–1959. Ин-т мерзлотоведения АН СССР; отв. ред. П.А. Шумский. М., 1963б, вып. 1, 105 с.
- Мавлюдов Б.Р., Ананичева М.Д. Ледники северного массива гор Сунтар-Хаята: современное состояние и динамика с конца 1950-х годов // *Лед и снег*, 2016, т. 56, № 3, с. 345–357.
- Мельников В.П., Спектор В.Б., Шейнкман В.С. и др. Экспериментальное исследование изотопного состава ледников хребта Сунтар-Хаята // *Криосфера Земли*, 2013, т. XVII, № 4, с. 63–73.
- Павлов А.В. Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М., Наука, 1965, 254 с.
- Сапожников Р.М. Геотермические наблюдения и измерения тепловых потоков // *Материалы гляциологических исследований*. Якутия. Сунтар-Хаята / Междудомств. геофиз. комиссия при Президиуме АН СССР. Междунар. геофиз. год 1957–1958–1959. Ин-т мерзлотоведения АН СССР; отв. ред. П.А. Шумский. М., 1963, вып. 2, 179 с.
- Nakazawa F., Uchida M., Kondo M. et al. Radiocarbon ages of insects and plants frozen in the No. 31 Glacier, Suntar-Khayata Range, eastern Siberia // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, 2015, vol. 361, p. 574–579.
- Shirakawa T., Kadota T., Fedorov A. et al. Meteorological and glaciological observations at Suntar-Khayata Glacier No. 31, East Siberia, from 2012–2014 // *Bull. Glaciol. Res., Jpn. Soc. Snow and Ice*, 2016, vol. 34, p. 33–40.
- Takahashi S., Sugiura K., Kameda T. et al. Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, Eastern Siberia, to climate change // *Ann. Glaciol.*, 2011, vol. 52 (58), p. 185–192.
- Yamada T., Takahashi S., Shiraiwa T. et al. Reconnaissance on the No. 31 Glacier in the Suntar-Khayata Range, Sakha Republic, Russia // *Bull. Glaciol. Res., Jpn. Soc. Snow and Ice*, 2002, vol. 19, p. 101–106.
- Zhang Y., Enomoto H., Ohata T. et al. Surface mass balance on Glacier No. 31 in the Suntar-Khayata Range, Eastern Siberia, from 1951 to 2014 // *J. Mountain Sci.*, 2017, vol. 14 (3), p. 501–512.

References

- Ananicheva M.D., Davidovich N.V., Kononov Y.M. et al. Glaciers of the Northern Massif of Suntar-Khayata: changing from time of IGY. Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Materials of glaciological investigations], 2003, vol. 95, p. 85–101 (in Russian).
- Ananicheva M.D., Kapustin G.A., Koreysya M.M. Glaciers changing of Suntar-Khayata Mountains and Cherskiy Ridge on the base of data of USSR Glaciers Inventory and space images of 2001–2003. Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Materials of glaciological investigations], 2006, vol. 101, p. 163–169 (in Russian).
- Balobaev V.T., Levchenko A.I. Geothermal features and the frozen zone of the Suntar-Khayata mountain range. In: Geoteplofizicheskie issledovaniya v Sibiri [Geothermophysical research in Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1978, p. 129–141 (in Russian).
- Vinogradov O.N., Golodkovskaya N.A., Koreysya M.M., Serebryanyj L.R. New data on modern and ancient glaciation of the Suntar-Khayat mountains (based on research materials of 1970). Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Materials of glaciological investigations], 1972, vol. 19, p. 80–91 (in Russian).
- Galanin A.A., Lytkin V.M., Fedorov A.N., Kadota T. Glaciers decreasing of Suntar-Khayata Mountains and methodological aspects of their estimation. *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2013, No. 4 (124), p. 30–42 (in Russian).
- Galanin A.A., Lytkin V.M., Fedorov A.N., Kadota T. Age and extent of the last glacial maximum on the Suntar-Khayata Ridge based on lichenometry and Schmidt Hammer Test. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2014, vol. XVIII, No. 2, p. 64–75 (in Russian).
- Grave N.A. Thermal balance of the surface layer of rocks in the area of modern glaciation and lowlands in Eastern Yakutia. In: *Issledovaniya lednikov i lednikovyykh raionov [Research on glaciers and glacial regions]*. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1962, vol. 2, p. 161–175 (in Russian).
- Grave N.A., Gavrilova M.K., Gravis G.F. et al. *Promerzaniye zemnoy poverkhnosti i oledeneniya khrebta Suntar-Khayata (Vostochnaya Yakutiya) [Freezing of the Earth's surface and glaciation of the mountain range Suntar-Khayata (East Yakutia)]*. Moscow, Nauka, 1964, 140 p. (in Russian).
- Koreysya M.M. *Sovremennoye oledeneniye khrebta Suntar-Khayata (Rezulyaty issledovaniy po programme MGG. Glyatsiologiya No. 11 [Modern glaciation of Suntar-Khayata Ridge (Results on investigations by program of IGY)]*. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1963a, 170 p. (in Russian).
- Koreysya M.M. Primary materials for the study of glaciers, taryns and snow cover in the Suntar-Khayata ridge. In: *Materialy glaciologicheskikh issledovaniy. Yakutia. Suntar Khayata*. Moscow, AN SSSR, 1963b, 105 p. (in Russian).
- Mavlyudov M.D., Ananicheva M.D. Glaciers of the northern massif of the Suntar-Khayata Mountains: current state and dynamics since the end of 1950s. *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2016, No. 3 (56), p. 345–357 (in Russian).
- Melnikov V.P., Spektor V.B., Sheinkman V.S. et al. Experimental study of the isotopic composition of the glaciers of the Suntar-Khayata ange. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2013, vol. XVII, No. 4, p. 63–73 (in Russian).
- Pavlov A.V. *Teploobmen promerzayushchikh i protaivayushchikh gruntov s atmosferoy [Heat exchange of freezing and thawing soils with the atmosphere]*. Moscow, Nauka, 1965, 254 p. (in Russian).
- Sapozhnikov R.M. Geotermic observations and measurements of heat flow. In: *Materialy glaciologicheskikh issledovaniy. Yakutia. Suntar Khayata*. Moscow, AN SSSR, 1963, 179 p. (in Russian).
- Nakazawa F., Uchida M., Kondo M. et al. Radiocarbon ages of insects and plants frozen in the No. 31 Glacier, Suntar-Khayata Range, eastern Siberia. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, 2015, vol. 361, p. 574–579.
- Shirakawa T., Kadota T., Fedorov A. et al. Meteorological and glaciological observations at Suntar-Khayata Glacier No. 31, East Siberia, from 2012–2014. *Bull. Glaciol. Res., Jpn. Soc. Snow and Ice*, 2016, vol. 34, p. 33–40.
- Takahashi S., Sugiura K., Kameda T. et al. Response of glaciers in the Suntar-Khayata range, eastern Siberia, to climate change. *Ann. Glaciol.*, 2011, vol. 52 (58), p. 185–192.
- Yamada T., Takahashi S., Shiraiwa T. et al. Reconnaissance on the No. 31 Glacier in the Suntar-Khayata Range, Sakha Republic, Russia. *Bull. Glaciol. Res., Jpn. Soc. Snow and Ice*, 2002, vol. 19, p. 101–106.
- Zhang Y., Enomoto H., Ohata T. et al. Surface mass balance on Glacier No. 31 in the Suntar-Khayata Range, Eastern Siberia, from 1951 to 2014. *J. Mountain Sci.*, 2017, vol. 14 (3), p. 501–512.

*Поступила в редакцию 18 января 2023 г.,
после доработки – 18 ноября 2023 г.,
принята к публикации 13 декабря 2023 г.*