

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 552.321.(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414>

Оригинальная статья

Многолетняя изменчивость термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии

С. П. Варламов^{1,✉}, Ю. Б. Скачков¹, П. Н. Скрябин¹, В. И. Балута²

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Российская Федерация

✉ svarlamov@mpi.ysn.ru

Аннотация

Представлены результаты 42-летнего мониторинга на стационаре «Чабыда» термического состояния мерзлотных ландшафтов при современном потеплении климата. Показана эволюция изменчивости параметров теплового состояния грунтов: температуры грунтов на подошве сезонно-талого слоя и в слое годовых теплооборотов, глубины сезонного протаивания. Многолетняя изменчивость среднегодовой температуры грунтов, испытывая значительные межгодовые и короткопериодные колебания, имеет разнонаправленную тенденцию с доминированием потепления. Основным регулирующим фактором термического состояния мерзлотных ландшафтов являются короткопериодные колебания режима снегонакопления. Глубина сезонного протаивания, несмотря на существенные межгодовые колебания, реагирует на потепление климата разнонаправленными тенденциями, ее увеличения или уменьшения статистически незначимы. Проведены статистические исследования временных рядов наблюдений. Выявлены корреляционные связи между элементами климата (температура воздуха, сумма осадков, среднезимняя высота снежного покрова, продолжительность зимнего и летнего сезонов) и связи между параметрами температурного режима грунтов (T_g , T_0 , ξ) с элементами климата. Результаты исследований термического состояния грунтов можно распространить на однотипные ландшафты региона, а также они могут быть использованы при моделировании процессов теплообмена в естественных ландшафтах и разработке методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем.

Ключевые слова: криолитозона, многолетнемерзлые грунты, температура, глубина сезонного протаивания, мониторинг, динамика

Финансирование. Сбор и систематизация данных натурного исследования проведены в рамках НИОКТР (№ 122011800062-5); анализ данных и подготовка статьи осуществлены за счет гранта Российского научного фонда (№ 23-61-10032).

Для цитирования: Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Балута В.И. Многолетняя изменчивость термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):398–414. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414>

Review article

Long-term variability of the thermal state in the upper horizons of the cryolithozone in Central Yakutia

S. P. Varlamov^{1,✉}, Yu. B. Skachkov¹, P. N. Skryabin¹, V. I. Baluta²

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ svarlamov@mpi.ysn.ru

Abstract

The results of the 42-year monitoring of the thermal state of permafrost landscapes in modern climate warming conditions at the “Chabyda” observation station (Central Yakutia) are presented. We studied the evolution of the variability

of soil thermal state parameters: the temperature of soils on the sole of the seasonally shallow layer and in the layer of annual heat rotations, and the depth of seasonal thawing. The long-term variability of the average annual soil temperature, experiencing significant interannual and short-term fluctuations, has a multidirectional trend, with warming dominating. The main factors regulating the thermal state of permafrost landscapes are the short-period fluctuations in the snow accumulation regime. Despite significant interannual fluctuations, the depth of seasonal thawing responded to climate warming with multidirectional trends, and its increase or decrease was statistically insignificant. We performed a statistical analysis of the observation time series revealing correlations between climate elements (air temperature, total precipitation, average winter snow depth, duration of winter and summer seasons) and relationships between soil temperature regime parameters (T_{ξ} , T_0 , ξ) with climate elements. The results of these studies on the thermal state of soils can be applied to homogeneous landscapes in this region. They can also be used to model heat transfer processes in natural landscapes and develop hybrid intelligence methods for diagnosing the state of infrastructure facilities in the Far North based on high-performance computing systems.

Keywords: cryolithozone, permafrost soils, temperature, depth of seasonal thawing, monitoring, dynamics

Funding. Collection and systematization of the field research data were conducted within the framework of the research project (number 122011800062-5); data analysis and preparation of the article were funded by the Russian Science Foundation (grant number 23-61-10032).

For citation: Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. Baluta V.I. Long-term variability of the thermal state in the upper horizons of the cryolithozone in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):398–414. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414>

Введение

В связи с развитием исследований по изучению современного потепления климата возросло внимание к работам, рассматривающим теоретические и прикладные проблемы реакции криолитозоны в разных регионах на эти изменения. Такие исследования охватывают широкий круг задач, включая эволюцию теплового состояния многолетнемерзлых грунтов в естественных условиях и при их нарушении. Это стало одним из приоритетных направлений геокриологических исследований, имеющих важное научное и практическое значение не только в России, но и за рубежом.

В последние десятилетия в Центральной Якутии отмечаются существенные климатические изменения [1], а так как этот регион является наиболее густонаселенным и перспективным для сельскохозяйственного и промышленного развития в Якутии, важно знать закономерности реакции многолетнемерзлых грунтов на современное потепление.

В регионе все шире проводится строительство трубопроводов, железных и автомобильных дорог, линий электропередач, которое неизбежно сопровождается значительными нарушениями природных условий. Антропогенные воздействия различного типа и масштаба (вырубка леса, удаление растительности, отсыпка насыпи и т. д.) на фоне современного потепления климата приводят к изменению геокриологических условий, в том числе теплового состояния литогенной основы ландшафтов, и развитию негативных

криогенных процессов, угрожающих устойчивости сооружений. Именно с изучением динамики мерзлотных условий связаны многолетние экспериментальные исследования, которые Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, начиная с 1981 г., проводит на стационаре «Чабыда».

Основной целью работы является оценка тепловой реакции мерзлотных ландшафтов на современное потепление климата. Для выполнения работ решались следующие задачи: маршрутное обследование ландшафтных условий территории, выбор объектов, организация системы наблюдательной сети, проведение многолетних режимных наблюдений на мониторинговых площадках, анализ данных многолетних наблюдений метеостанций и экспериментальных данных, проведение статистических исследований временных рядов наблюдений, обобщение полученных материалов.

Развитие геотемпературного мониторинга

В 1950-е и 1960-е гг. более детальные и комплексные теплофизические наблюдения за формированием теплового режима грунтов под руководством Н.С. Иванова [2] были организованы по улучшенной методике на экспериментальных площадках Северо-восточного отделения Института мерзлотоведения.

Локальные и региональные закономерности формирования теплового режима грунтов наиболее детально выявлены при широком применении сезонных стационарных методов исследований [3, 4]. В 1969–1979 гг. на теплораспределительном

стационаре «Якутск» выполнено круглогодичное изучение влияния техногенных воздействий (удаление снежного и дернового покровов, укладка асфальтового, бетонного, пенопластового и пленочного покровов) на теплообмен грунтов с атмосферой [5, 6]. В 1978–1980 гг. теплобалансовые исследования проведены в районе Якутска, на подтапливаемой территории р. Лена (стационар «Зеленый Луг»), с целью изучения формирования теплового режима грунтов и намывной насыпи для использования их в качестве оснований сооружений [7].

Инженерно-геокриологические исследования широко развернулись в связи с прокладкой и эксплуатацией газопровода Таас Тумус–Якутск. Влияние вырубки леса на междуречье Кенкеме–Ханчалы в первые 3–4 года на формирование среднегодовой температуры грунтов изучено С.А. Замолотчиковой и В.Н. Смирновой [8]. Количественная оценка воздействия нарушения покровов на температурное поле горных пород выполнена по результатам исследования на стационаре «Суптурган» на Лено-Вилуйском междуречье [9]. В 1968 г. проведены мерзлотные исследования по трассе газопровода Таас Тумус–Якутск на участке междуречья Ханчалы–Кенкеме [10]. Изменения геокриологических условий исследованы на участке газопровода на водоразделах рек Ханчалы–Чакыя–Кенкеме [11]. Оценка изменения геокриологических условий, включая тепловое состояние грунтов трассы газопровода Таас Тумус–Якутск, проведена в 1984–1985 гг. [12].

Методом математического моделирования был составлен прогноз температурного режима грунтов Якутии с учетом различных естественных и техногенных изменений природных условий: потепления климата, удаления напочвенного покрова, изменения мощности снежного покрова и замены грунта [13].

В 1990-е гг. по международным программам «GEMEX-GAME», «CREST», «JST» совместных российско-японских и российско-голландских научных проектов на стационарах «Спасская Падь» и «Нэлэгэр» были начаты режимные экспериментальные исследования. На основе этих работ изучается многолетняя динамика температуры почвогрунтов и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород, влажностного режима почв, глубины сезонного протаивания, водно-теплового баланса и углеродных потоков [14].

Динамика теплового состояния мерзлотных ландшафтов после техногенных воздействий изучается с 1981 г. на полигоне «Умайбыт» в 80 км к югу от г. Якутск [15]. С 1989 г. термометрические наблюдения на вырубках и гарях разных лет проводятся в межлассном типе местности на полигоне «Юкэчи» [14].

Итоги исследований эволюции термического состояния грунтов за период от III Международного геофизического года (1957/59) до IV Международного полярного года (2007/08) на территории России подведены А.В. Павловым [16]. В.Е. Романовский и др. [17] оценили тепловое состояние криолитозоны России за последние три десятилетия. Изменение термического режима грунтов Центральной Якутии в естественных и нарушенных условиях освещено в работах С.П. Варламова и др. [18–21], С.П. Варламова и П.Н. Скрыбина [22, 23], Ю.Б. Скачкова, П.Н. Скрыбина, С.П. Варламова [24].

Отмечая определенные достижения многолетних геокриологических работ в осуществлении мероприятий по рациональному природопользованию, следует отметить необходимость расширения исследований по оценке пространственно-временной реакции верхних горизонтов криолитозоны на техногенные воздействия, а также в связи с усиливающимся потеплением климата.

Наблюдательная сеть и методика

В основу многолетних исследований теплового режима грунтов, параметры которого изменяются в суточном, сезонном, годовом цикле, были положены ландшафтный, стационарный и мониторинговый методы. Они потребовали ландшафтной типизации природно-территориальных комплексов (ПТК), организации экспериментальных площадок и системы наблюдений на них.

В 1980 г. в 20 км к юго-западу от г. Якутск для проведения режимных наблюдений за тепловым состоянием верхних горизонтов многолетнемерзлых пород в условиях со сливающейся и не сливающейся мерзлотой Институтом мерзловедения СО РАН был организован теплобалансовый стационар «Чабыда» (рис. 1).

Разнообразие природных комплексов района стационара требовало проведения ландшафтной съемки с целью выявления и типизации типологических комплексов для организации экспериментальных площадок. В результате ландшафтных исследований была составлена ландшафтно-типологическая карта масштаба 1:10 000 [25].

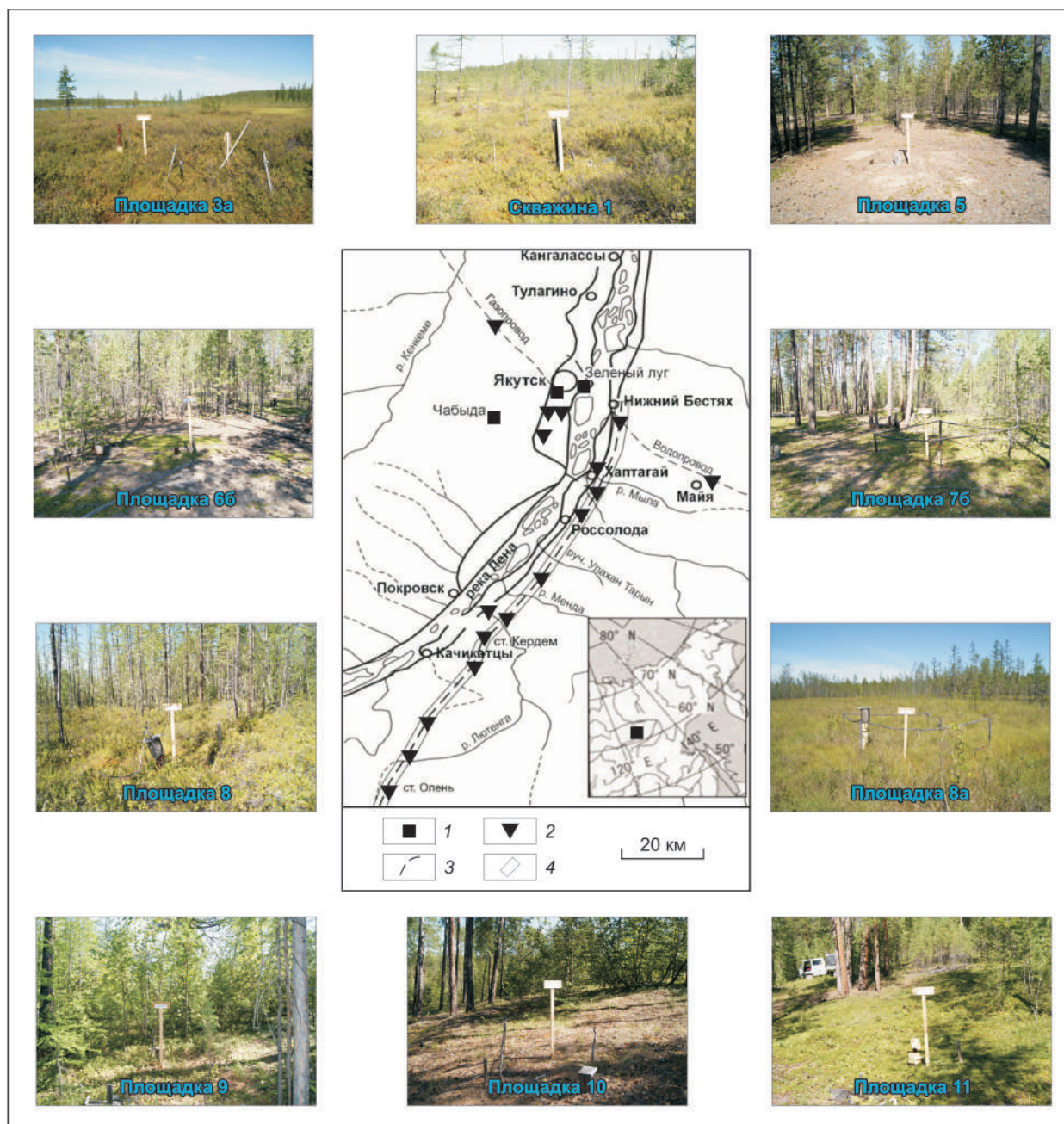


Рис. 1. Обзорная схема района исследований и вид экспериментальных площадок стационара Чабыда.

1 – стационары; 2 – полигоны; 3 – линейные сооружения: железная дорога ст. Олень–ст. Нижний Бестях, газопровод Таас Тумус–Якутск, водовод Лена–Туора-Кюель, 4 – площади ландшафтного картографирования крупного масштаба. Стационар «Чабыда»: площадка 3а, скважина 1; площадка 5, площадка 6б, площадка 7б, площадка 8, площадка 8а, площадка 9, площадка 10, площадка 11

Fig. 1. Overview scheme of the study area and view of the experimental sites at the Chabyda Station.

1 – station; 2 – polygon; 3 – linear structures: railway st. Deer–st. Nizhny Bestyakh, gas pipeline Taas Tumus–Yakutsk, Lena–Tuora-Kyuel water conduit, 4 – large-scale landscape mapping areas. Chabyda Station: site 3a, borehole 1, site 5, site 6b, site 7b, site 8, site 8a, site 9, site 10, site 11

На основе этой карты были организованы экспериментальные исследования на типичных для этого района элементарных природно-терри-

ториальных комплексах (фациях) с различными мерзотно-гидрогеологическими условиями. Всего для режимных микроклиматических и

гидротермических наблюдений было оборудовано 22 экспериментальных площадки и геотермических скважины [26].

Для дальнейшего мониторинга теплового режима грунтов были выбраны 10 площадок в двух типах местности: мелкодолинном (днище долины ручья) и склоновом. В мелкодолинном типе местности – сфагново-багульниково-ерниковой мари (Пл-3а), мохово-осоково-вейниковой низине (Пл-8а), мохово-багульниково-ерниковой листовенничной редине (Скв-1) и в мохово-багульниково-брусничном листовенничнике (Пл-8) на днище ложбины стока. В склоновом типе местности – в мертвопокровно-толокнянковом сосняке на пологом склоне (Пл-5, Пл-6б), в толокнянковом сосняке (Пл-7б) и брусничном листовенничнике (Пл-9) на приводораздельных склонах, на умеренно-крутых склонах в брусничном сосняке северной (Пл-10) и толокнянковом сосняке южной (Пл-11) экспозиций. Замеры температуры грунтов на скважинах проводились терморезисторными гирляндами на глубинах 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30 м.

Наблюдения за термическим режимом грунтов деятельного слоя на стационаре «Чабыда» проводились в теплые сезоны 1981 и 1982 гг. ежедневно, в семь сроков, а в холодный сезон 1982–1983 гг. – в четыре стандартных срока. В годовичные циклы 1983–1986 гг., летом, наблюдения проводились один раз в пять дней, в четыре срока. В 1981–1987 гг. замеры температуры грунтов в слое годовых теплооборотов проводились один раз в десять дней. С 1987 г. термические наблюдения проводятся по более сокращенной программе – 15 числа каждого месяца. Также ежемесячно зимой наблюдается высота снежного покрова, а в конце теплого сезона – глубина сезонного протаивания.

Объектами исследований являются горные породы слоя годовых теплооборотов, или иначе говоря, слоя годовых температурных колебаний (верхние 10–30 и до 100 м).

Основными термическими параметрами, которые могут быть индикаторами тепловой эволюции верхних горизонтов криолитозоны, являются: глубина сезонного протаивания (ξ), среднегодовые температуры на подошвах слоя сезонного протаивания (T_{ξ}) и слоя годовых теплооборотов (T_0).

В качестве регистраторов температуры грунтов используются полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 с точностью измерений 0,1 °С.

В режимных скважинах термогирлянды установлены стационарно, стволы их заполнены ранее извлеченным грунтом. Глубина сезонного протаивания определяется зондированием металлическим щупом и при ручном бурении.

Методика проведения геотермического мониторинга показала свою надежность и может с успехом использоваться в разных природно-климатических условиях.

Результаты и обсуждение

Климат

Метеорологические наблюдения в г. Якутск выявляют два периода с отчетливо выраженным повышением температур воздуха: с конца XIX в. до 30–40-х годов XX в. («потепление Арктики») и с середины 60-х годов XX в. по настоящее время. Между этими периодами отмечалось некоторое похолодание. Все эти периоды наглядно иллюстрируются рис. 2. Из него следует очевидность нынешнего потепления, главная особенность которого состоит в том, что наблюдающаяся в последние три десятилетия температура воздуха является, по всей видимости, наивысшей за всю историю существования г. Якутск.

Средняя температура воздуха по месяцам, представленная в табл. 1, позволяет оценить ее изменчивость за различные периоды. Период 1961–1990 гг. в настоящее время рекомендован Всемирной метеорологической организацией в качестве опорного (реперного) при оценке текущих климатических изменений. Последний период: 2001–2021 гг., показателен с позиции современного потепления, поскольку именно эти годы стали наиболее теплыми за последние десятилетия, как в Якутии, так и в г. Якутск.

Из табл. 1 следует, что наибольший вклад в современное повышение средней годовой температуры воздуха вносят зимние (октябрь–апрель) месяцы. Вклад летних (май–сентябрь) месяцев на данном этапе незначителен. Из этого следует важный вывод: глубина сезонного протаивания грунтов, обусловленная преимущественно летними метеорологическими факторами (суммой температур воздуха и осадками за теплый период), в настоящее время не должна увеличиваться, что подтверждается многолетними стационарными наблюдениями в окрестностях города [1].

Оценка внутригодовой изменчивости температуры воздуха, выполненная с помощью регрессионного анализа, дополняет и расширяет

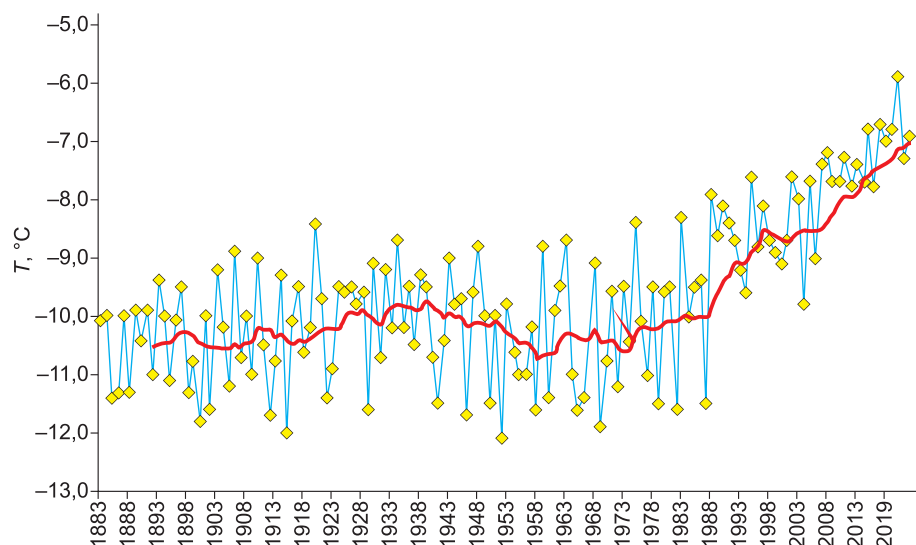


Рис. 2. Многолетняя изменчивость среднегодовой температуры воздуха в г. Якутск за период 1883–2022 гг., °C. (Жирная сплошная линия – скользящая десятилетняя средняя)

Fig. 2. Long-term variability of the average annual air temperature in Yakutsk from 1883 to 2022, °C. (Bold solid line: ten-year moving average)

наши представления о вкладах отдельных месяцев (табл. 2). Видно, что до середины 60-х годов прошлого столетия в г. Якутск не только не проявлялось потепление, но даже в отдельные зимние месяцы шло похолодание. После 1966 г. средняя температура воздуха в наиболее холодные зимние месяцы (ноябрь–март) повысилась на 4–7 °C, среднезимняя температура повысилась на 5,1 °C, а среднегодовая температура воздуха увеличилась на 3,8 °C.

В последние полвека в Якутске отмечается, как уже было сказано выше, беспрецедентно ин-

тенсивное повышение среднегодовой и среднезимней температуры воздуха (рис. 3, 4). В меньшей мере это можно сказать про повышение средней летней температуры воздуха (рис. 5).

Многолетняя изменчивость температуры грунтов

К настоящему времени по скважине 1 и пл. 5 имеется база данных за 42 года наблюдений, по пл. 8 – за 40 лет, по пл. 9 – за 38, а по остальным площадкам – за 37 лет. Такой представительный материал позволяет качественно провести ана-

Таблица 1

Среднемесячная и среднегодовая температура воздуха за различные периоды в г. Якутск, °C

Table 1

Average monthly and annual air temperature in Yakutsk, °C

Месяц/Month												Год/Year
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1882–1960 гг.												
-43,2	-35,9	-22,2	-7,4	5,7	15,4	18,7	14,8	6,2	-7,9	-28,0	-39,8	-10,3
1961–1990 гг.												
-41,1	-35,8	-21,7	-6,2	6,7	15,4	18,7	14,9	5,7	-8,6	-29,2	-38,8	-10,0
1991–2000 гг.												
-37,0	-32,3	-21,8	-5,1	7,2	16,5	19,5	15,2	5,8	-7,2	-27,8	-37,9	-8,7
2001–2021 гг.												
-37,3	-33,1	-17,9	-3,1	8,4	17,4	20,0	15,8	6,6	-6,6	-24,8	-36,6	-7,6

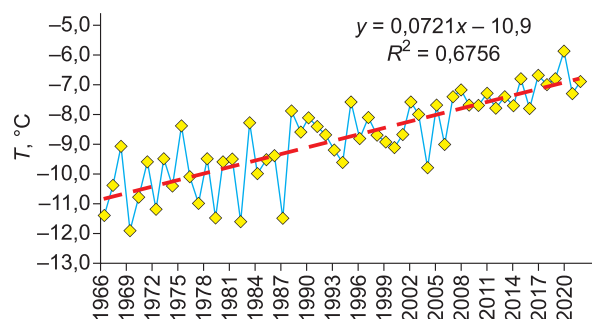


Рис. 3. Многолетняя изменчивость (1966–2022 гг.) среднегодовой температуры воздуха в г. Якутск, °C. (Пунктир – линейный тренд)

Fig. 3. Long-term variability (1966–2022) of the average annual air temperature in Yakutsk, °C. (Dotted line: linear trend)

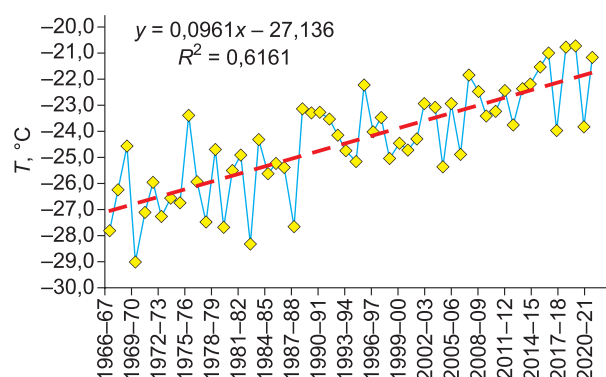


Рис. 4. Многолетняя изменчивость (1966–2022 гг.) средней температуры воздуха за холодный период (октябрь–апрель) в г. Якутск, °C. (Пунктир – линейный тренд)

Fig. 4. Long-term variability (1966–2022) of the average air temperature for the cold period (October–April) in Yakutsk, °C. (Dotted line: linear trend)

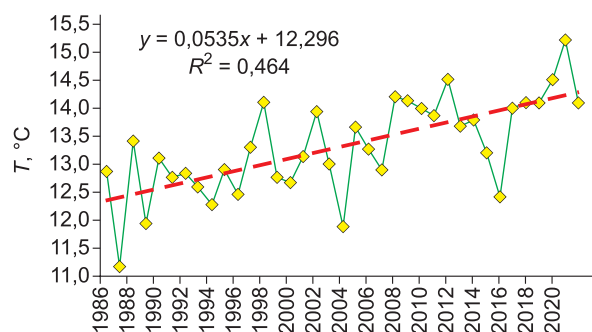


Рис. 5. Многолетняя изменчивость (1966–2022 гг.) средней температуры воздуха за теплый период (май–сентябрь) в г. Якутск, °C. (Пунктир – линейный тренд)

Fig. 5. Long-term variability (1966–2022) of the average air temperature for the warm period (May–September) in Yakutsk, °C. (Dotted line: linear trend)

Таблица 2

Приращения температуры воздуха в г. Якутск, °C

Table 2

Increments of air temperature in Yakutsk, °C

Месяцы, год/ Months, year	1883–1965	1966–2019	1883–2019
Январь/ January	2,6	6,8	7,7
Февраль/ February	–1,2	5,9	2,6
Март/ March	–1,4	5,9	3,2
Апрель/ April	0,6	4,5	4,9
Май/ May	0,9	2,1	3,4
Июнь/ June	0,4	2,8	1,9
Июль/ July	0,3	1,7	1,2
Август/ August	1,4	1,7	1,3
Сентябрь/ September	0,0	1,2	–0,3
Октябрь/ October	0,2	2,9	0,4
Ноябрь/ November	–0,6	6,4	0,2
Декабрь/ December	–0,2	4,1	3,5
Зима/ Winter	–0,1	5,1	3,4
Лето/ Summer	0,6	1,9	1,5
Год/ Year	0,2	3,8	2,6

Примечание. Жирным шрифтом выделены величины, имеющие статистически значимые тренды.

Note. Values with statistically significant trends are highlighted in bold.

лиз изменчивости основных тепловых параметров слоя годовых теплооборотов и сделать объективные выводы. Представление о многолетней изменчивости величины ξ , T_{ξ} и T_0 на экспериментальных площадках стационара «Чабыда» дает табл. 3.

Наибольшие колебания T_{ξ} и T_0 (4,2–6,4 °C 1,4–2,7 °C) происходили в увлажненных оторфованными напочвенными покровами ландшафтах мелкодолинного типа местности, наименьшие (0,9–2,8 °C и 0,3–1,2 °C) – в сухих песчаных и супесчаных отложениях склонового (см. табл. 3, рис. 6 и 7). На фоне потепления климата эти изменения обуславливались в основном влиянием условий снегонакопления и значительно меньшей мере суммой температур воздуха за холодный период [27–29].

За весь период наблюдений самые низкие и высокие среднегодовые температуры на подошве деятельного слоя на площадках мелкодолинного и склонового типах местностей были отме-

Таблица 3

**Средние многолетние и экстремумы основных тепловых параметров грунтов слоя
годовых теплооборотов на стационаре «Чабыда»**

Table 3

**Average long-term and extrema of the main thermal parameters of the soils
of the layer of annual heat exchanges at the Chabyda Station**

Площадка (Пл.), скважина (С) (годы наблюдений) Site (S), borehole (B) (years of observation)	ξ , м			T_{ξ} , °C			T_0 , °C		
	Мин. Min.	Среднее Average	Макс. Max	Мин. Min.	Среднее Average	Макс. Max.	Мин. Min.	Среднее Average	Макс. Max.
Мелкодолинный тип местности Shallow valley type of terrain									
С (B)-1 (1981–2022)	0,81	1,06	1,30	–5,1	–2,7	–0,6	–3,4	–2,7	–1,8
Пл. (S) 3а (1986–2022)	0,37	0,47	0,53	–7,4	–4,9	–1,3	–4,9	–3,9	–2,8
Пл. (S) 8 (1982–2022 гг.)	0,86	1,17	1,37	–5,5	–3,5	–1,3	–3,3	–2,7	–1,9
Пл. (S) 8а (1986–2020 гг.)	0,65	1,02	1,45	–6,5	–3,3	–0,1	–4,5	–3,3	–1,8
Склоновый тип местности Slope type of terrain									
Пл. (S) 5 (1981–2022 гг.)	3,26	3,50	3,86	–1,0	–0,4	–0,1	–0,6	–0,4	–0,3
Пл. (S) 66 (1986–2022 гг.)	3,54	3,76	4,11	–0,9	–0,5	0,0	–0,6	–0,4	–0,2
Пл. (S) 76 (1986–2022 гг.)	1,70	1,87	2,00	–2,3	–1,2	–0,4	–1,5	–0,8	–0,3
Пл. (S) 9 (1985–2022 гг.)	1,31	1,52	1,72	–3,8	–2,5	–1,0	–2,5	–2,2	–1,8
Пл. (S) 10 (1986–2022 гг.)	1,63	1,93	2,18	–2,8	–1,8	–0,7	–2,4	–2,0	–1,6
Пл. (S) 11 (1986–2022 гг.)	1,73	1,91	2,27	–2,2	–0,9	–0,2	–1,5	–1,2	–0,9

чены соответственно в 2002/03 и 2006/07 гидрологические годы (октябрь–сентябрь), на склоне южной экспозиции с запаздыванием на год. В слое годовых теплооборотов на глубине 10 м пики понижения и повышения, как правило, в обоих типах местности приходится с запаздыванием на год.

Зима в 2002/03 гг. была аномально малоснежной и с аномально поздним сроком образования устойчивого снежного покрова. Это стало основной причиной сильного охлаждения грунтов, несмотря на довольно теплый год. Последующие годы характеризовались многоснежными зимами и выше нормы летними осадками, что привело к резкому повышению температуры грунтов. В период с 2002/03 по 2006/07 (2007/08) гг. температура грунтов на подошве деятельного слоя в этих типах местности повысилась на 0,5–6,0 °C и в слое годовых теплооборотов на 0,3–2,7 °C (см. рис. 6 и 7).

В регионе в эти годы в связи с повышением температуры и увеличением глубины сезонного протаивания активизировались криогенные процессы (термокарст, термоэрозия и др.). Развитие заболачивания и обводнения наблюдалось в низинных ландшафтных участках. Эти факторы

привели к повышению уровня воды в озерах, заполнению водой ранее сухих озерных котловин, повышению уровня и формирования надмерзлотных вод сезонно-талого слоя. На обводненных участках отрицательных форм рельефа в холодные периоды при промерзании не было смыкания промерзающего деятельного слоя с многолетнемерзлыми породами. Здесь отмечались их многолетнее протаивание и заметное повышение температуры грунтов в слое годовых теплооборотов [30]. Таким образом, 2007 и 2008 гг. можно считать критическими для теплового режима многолетнемерзлых пород за 40 лет наблюдений или даже за его вековую историю.

По многолетним наблюдениям был экспериментально установлен тепловой эффект аномальных зим. Так, одна теплая и малоснежная зима может понизить температуру грунтов значительней, чем холодная и многоснежная. Аномально холодная зима может дать более сильный эффект, чем несколько следующих друг за другом аномально теплых [28].

Наиболее важным выводом многолетних наблюдений является то, что температура грунтов, испытывая значительные межгодовые и корот-

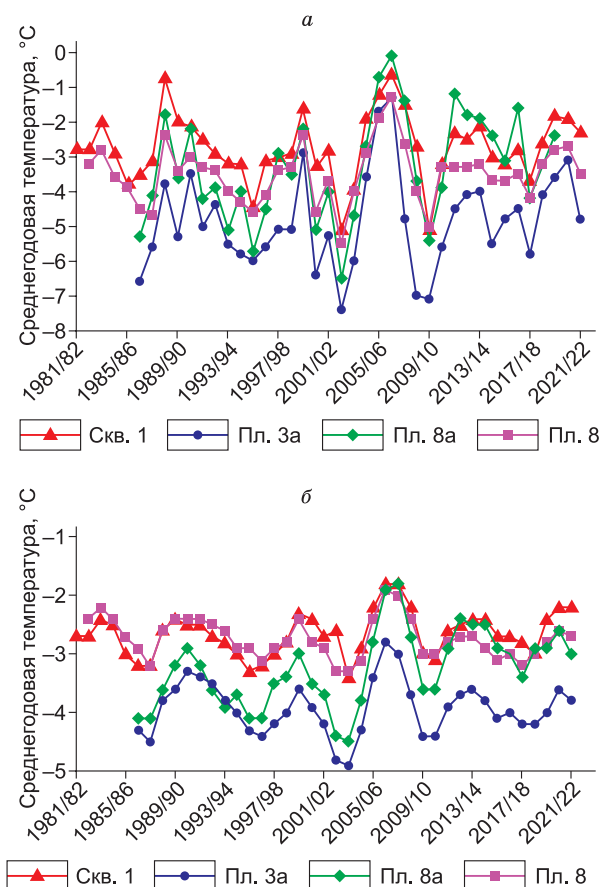


Рис. 6. Многолетняя изменчивость (1981/82–2021/22 гг.) температуры грунтов деятельного слоя (а) и слоя годовых теплооборотов на глубине 10 м (б) в мелкодолинном типе местности на стационаре «Чабыда»

Fig. 6. Long-term variability (1981/82–2021/22) of soil temperature in the active layer (a) and the layer of annual heat exchanges at a depth of 10 m (b) in a shallow-valley type of terrain at the Chabyda Station

копериодные колебания, связанные в основном с большой изменчивостью режима накопления снега, имеет разнонаправленную тенденцию. На фоне значительных изменений среднегодовой температуры воздуха (в г. Якутск за период 1980/81–2021/22 гг. тренд повышения составил 0,74 °C/10 лет) термическое состояние слоя годовых теплооборотов на площадках склонового и мелкодолинного типах местностей стационара «Чабыда» остаются стабильными, за исключением площадок 7б и 8а.

Многолетняя изменчивость глубины сезонного протаивания грунтов

Как известно, глубина сезонного протаивания (ξ) зависит от литологического состава грунтов, их влажности, характера растительного

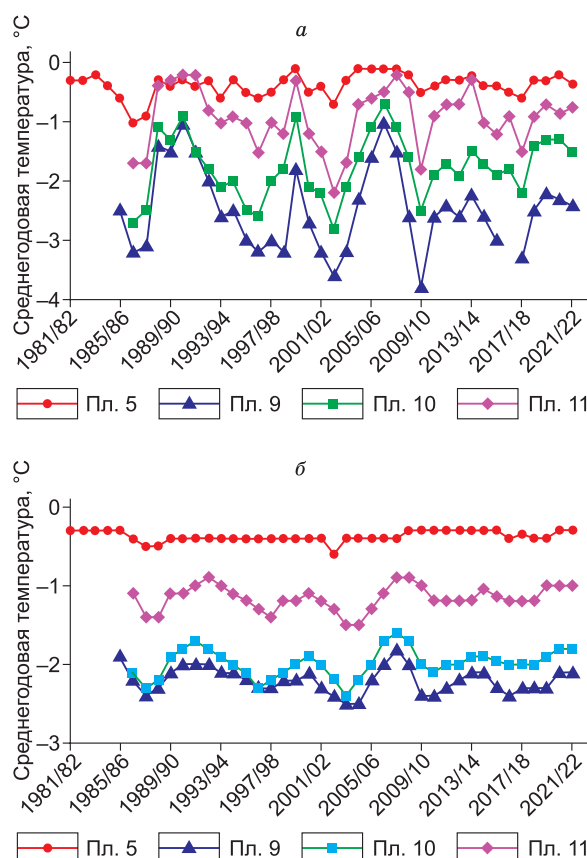


Рис. 7. Многолетняя изменчивость (1981/82–2021/22 гг.) температуры грунтов деятельного слоя (а) и слоя годовых теплооборотов на глубине 10 м (б) в склоновом типе местности на стационаре «Чабыда»

Fig. 7. Long-term variability (1981/82–2021/22) of soil temperature in the active layer (a) and the layer of annual heat exchanges at a depth of 10 m (b) in the slope type of terrain at the Chabyda Station

покрова. Наибольшая многолетняя межгодовая изменчивость $\Delta\zeta$ характерна для грунтов мелкодолинного типа местности и составляет от 3,8 до 37,7 % от их экстремального максимума. В склоновом типе местности $\Delta\zeta$ изменяется в пределах 10,9–23,8 % (рис. 8). Ранее считалось, что основными факторами, определяющими межгодовую изменчивость мощности сезонно-талого слоя, являются сумма положительных температур воздуха и летние осадки. Однако последние разработки по этому вопросу показывают, что многолетние изменения глубины сезонного протаивания и сумм летних температур воздуха недостаточно четко коррелируют между собой [31].

Наибольшие значения ξ (3,54–4,11 м) отмечены на слабоувлажненной площадке 6б (верхняя часть пологого песчаного склона), наименьшие

(0,37–0,53 м) – на переувлажненной площадке 3а (днище долины ручья с торфяным грунтом). На десяти площадках стационара в среднем максимальная мощность ξ (1,81 м) приходится на 1988–1989 и 2006–2008 гг.

Вероятнее всего, внутригрунтовые условия, а именно – колебания влажности являются одной из основных причин, влияющих на глубину протаивания. Анализ данных, полученных в стационаре, показывает, что наибольшие межгодовые изменения ξ свойственны ландшафтам мелкодолинного типа местности (до 80 см). На площадках в склоновом типе местности эти изменения составляли 30–60 см (см. рис. 8).

В мелкодолинном типе местности на площадках 3а и 8 наблюдается статистически значимое увеличение глубины сезонного протаивания, связанное со значительными положительными трендами среднелетней температуры воздуха. На площадках склонового типа местности (5, 6б, 9, 11) отмечаются статистически значимые тенденции ее уменьшения. И если на водораздельном участке (пл. 9) это уменьшение можно связать с ростом мохово-кустарниковой растительности, то на площадках 5 и 6б, скорее всего, важную роль играют колебания уровня надмерзлотных вод сезонно-талого слоя и увеличение биомассы под пологом леса. На остальных площадках (7б, 10) при значительных межгодовых изменениях глубины сезонного протаивания наблюдаются статистически незначимые тенденции ее роста (табл. 4).

Максимальные глубины сезонного протаивания на отдельных площадках наблюдались в разные годы. В мелкодолинном типе местности (площадки 1, 3а, 8, 8а) они отмечены в 2007–2008 годах. В склоновом типе местности максимумы ξ выявлены в следующие годы: пл. 5 – 1984 г., пл. 6б – 1995 г., пл. 7б – 1989 г., пл. 9 – 1991 г., пл. 10 и 11 – 1988 г.

Таким образом, при потеплении климата даже в пределах локальных ненарушенных участков могут обнаруживаться разнонаправленные изменения глубины сезонного протаивания грунтов. Это служит веским доказательством того, что мощность сезонно-талого слоя является слабо-чувствительным индикатором современных изменений климата.

Анализ большого объема экспериментальных данных подтвердил вывод о слабом отклике глубины сезонного протаивания на современные изменения климата [31]. Наблюдения убедитель-

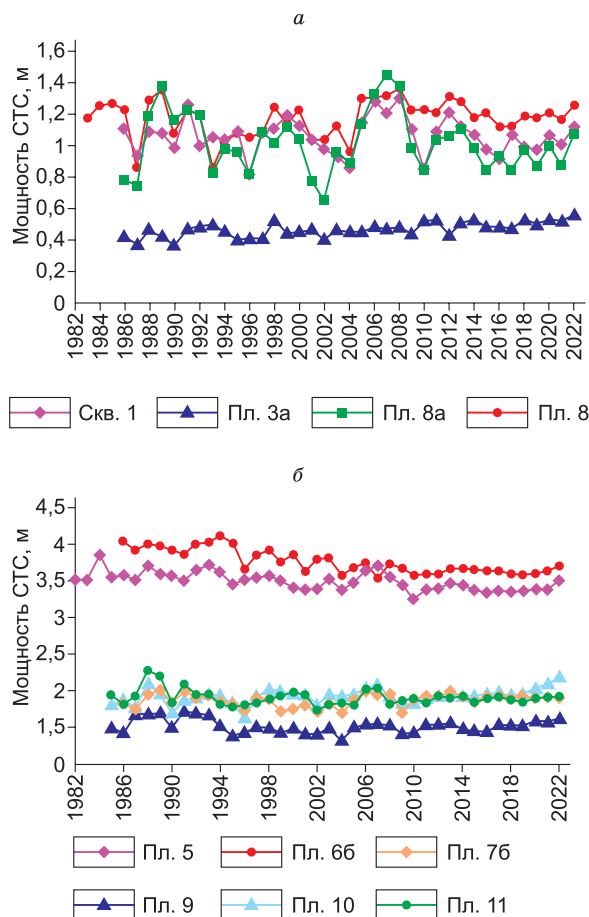


Рис. 8. Многолетняя изменчивость (1982–2022 гг.) мощности сезонно-талого слоя в мелкодолинном (а) и склоновом (б) типах местностей на стационаре «Чабыда»

Fig. 8. Long-term variability (1982–2022) of the thickness of the seasonally thawed layer in the shallow-valley (a) and slope (b) types of terrain at the Chabyda Station

но показывают, что в условиях современного потепления климата не всегда происходит увеличение глубины сезонного протаивания грунтов. Максимумы и минимумы этой величины на различных площадках стационара наблюдаются, чаще всего, в разные годы. Это свидетельствует о том, что глубина сезонного протаивания зависит не только от многолетних изменений температуры воздуха в теплый период, но и от других ландшафтных факторов.

Статистические исследования временных рядов наблюдений

Исследованы корреляционные связи между элементами климата: среднегодовая ($T_{в3}$), суммы отрицательных ($\Sigma - T_{в3}$) и положительных ($\Sigma + T_{в3}$) температур воздуха, суммы годовых (O_r), зимних (O_3) и летних (O_l) осадков, продолжитель-

ности холодного (τ_3) и теплого ($\tau_л$) сезонов, сред-
незимней высоты снега (h_c^{o-a}) по данным ме-
теостанции Якутск в период мониторинговых

исследований за температурным режимом грун-
тов на территории стационара «Чабыда» в 1981–
2022 гг. (табл. 5).

Таблица 4

Тренды глубины сезонного протаивания грунтов стационара «Чабыда»

Table 4

Trends in the depth of seasonal thawing of soils at the Chabyda Station

Тип местности Terrain type	Грунт, площадка (Пл) скважина (С) и их номера Soil, site (S), borehole (B) and their numbers	Период наблюдений Observation period	Тренды, см/10 лет Trends, cm/10 years
Мелкодолинный Shallow valley	Торф (Пл-3а) Peat (S-3a)	1986–2019	2,4
	Песок (С-1, Пл-8) Sand (B-1, S-8)	1981–2019	–0,8...2,4
	Торф, песок (Пл-8а) Peat, sand (S-8a)	1986–2019	–2,2
Склоновый Slope	Песок (Пл-5, Пл-6б) Sand (S-5, S-6b)	1981–2019, 1986–2019	–7,1...–13,9
	Песок, супесь (Пл-7б) Sand, sandy loam (S-7b)	1986–2019	2,2
	Суглинок, супесь (Пл-9) Loam, sandy loam (S-9)	1985–2019	–3,0
	Супесь, песок (Пл-10, Пл-11) Sandy loam, sand (S-10, S-11)	1986–2019	2,2...–3,0

Таблица 5

Корреляционные связи между климатическими элементами
по данным метеостанции Якутск в гидрологические годы 1980/81–2021/22 гг.

Table 5

Correlations between climatic elements according to the data
from the Yakutsk Weather Station in 1980/81–2021/22

Элементы	$T_{вз}$	$\Sigma-T_{вз}$	$\Sigma+T_{вз}$	τ_3	$\tau_л$	$O_г$	O_3	$O_л$	h_c^{o-a}
$T_{вз}$	–	0,96	0,61	–0,56	0,53	–0,05	0,44	–0,23	0,08
$\Sigma-T_{вз}$		–	0,35	–0,51	0,41	0,03	0,38	–0,12	0,01
$\Sigma+T_{вз}$			–	–0,39	0,59	–0,11	0,35	–0,26	0,24
τ_3				–	–0,74	–0,10	–0,04	–0,09	–0,06
$\tau_л$					–	0,02	0,16	–0,09	0,13
$O_г$						–	0,37	0,93	0,45
O_3							–	0,00	0,66
$O_л$								–	0,22
h_c^{o-a}									–

Примечание. Цветом выделены тесноты корреляционных связей: красный – весьма высокая, фиолетовый – высокая, зеленый – заметная, голубой – умеренная и синий – слабая, черный – практически нет связи.

Note. The closeness of correlations is highlighted in color: red – very high, purple – high, green – noticeable, blue – moderate and black – almost no connection.

Качественная оценка тесноты связи между парными элементами климата дана по шкале Чеддока [32]. Как видно из табл. 5, весьма высокие корреляционные связи выявлены между средней годовой температурой воздуха $T_{вз}$ и суммами отрицательных среднемесячных температур воздуха $\Sigma-T_{вз}$ (0,96), между суммами годовых $O_{г}$ и летних осадков $O_{л}$ (0,93), заметные связи прослеживаются: между $T_{вз}$ и $\Sigma+T_{вз}$ (0,61); $T_{вз}$ и $\tau_{л}$ (0,53); $\Sigma+T_{вз}$ и $\tau_{л}$ (0,59); $O_{з}$ и $h_{с}$ (0,66), подтверждающие общеизвестные истины. Высокая обратная корреляционная связь отмечается между продолжительностями холодного ($\tau_{з}$) и теплого ($\tau_{л}$) сезонов (–0,74), заметные обратные связи между среднегодовой температурой ($T_{вз}$) и суммами отрицательных среднемесячных ($\Sigma-T_{вз}$) температур воздуха выявлены с продолжительностью холодного периода ($\tau_{з}$), где значения корреляции составляет соответственно –0,56 и –0,51. Полученные результаты подтверждают тезис о том, что на формирование температуры воздуха существенное влияние оказывают циркуляционные процессы атмосферы в летний и зимний сезоны.

Исследованы также корреляционные связи между параметрами температурного режима грунтов: температура грунтов на подошвах слоя сезонного протаивания (T_{ξ}) и слоя годовых теплооборотов, глубина 10 м (T_0), мощности сезонно-талого слоя (ξ) с элементами климата ($T_{вз}$, $\Sigma-T_{вз}$, $\Sigma+T_{вз}$, $O_{г}$, $O_{з}$, $O_{л}$, $h_{с}^{o-a}$, $\tau_{з}$, $\tau_{л}$) по экспериментальным данным.

Высокие корреляционные связи температуры грунтов T_{ξ} и среднезимней высоты снежного покрова ($h_{с}^{o-a}$) отмечаются в склоновом типе местности на площадке 6б (0,75) с иссушенными песчаными отложениями в сезонно-талом слое, в мелкодолинном типе местности – площадке 3а (0,83) с мощными мохово-сфагновыми напочвенными покровами на органогенных (торф) отложениях и на площадке 8 (0,76) мохово-багульниково-брусничном листовничнике, на других площадках выявлены заметные связи. В мелкодолинном типе местности между T_{ξ} и $O_{з}$ отмечены высокие корреляционные связи, в склоновом типе местности встречаются преимущественно заметные связи (0,52–0,62). Здесь исключение составляют площадки 5 и 11 с поздними сроками смыкания фазовых границ, где выявлены умеренные связи, соответственно равные 0,46 и 0,48. T_{ξ} на экспериментальных площадках с другими элементами климата имеет умеренные и слабые связи с преобладанием последних (табл. 6).

Корреляционная связь T_{ξ} с мощностью ξ и T_0 имеет выборочный характер. Более заметные связи между T_{ξ} и ξ выявлены на площадках мелкодолинного типа местности (С-1 – 0,69, пл. 8а – 0,59). Умеренные связи в склоновом типе местности наблюдаются на приводораздельном склоне (пл. 9 – 0,47) и на склоне северной экспозиции (пл. 10 – 0,30), в мелкодолинном типе местности на мохово-брусничном листовничнике (пл. 8 – 0,49). На остальных площадках корреляционные связи слабые (см. табл. 6).

Высокая корреляционная связь между T_{ξ} и T_0 наблюдается на площадке 8а – переувлажненной мохово-осоковой низине (0,80), заметные связи установлены в природных комплексах с плотными мохово-сфагновым покровом (пл. 3а – 0,63) и хорошо развитым мохово-брусничным напочвенным покровом (пл. 8 – 0,67) мелкодолинного типа местности и на приводораздельном склоне брусничном листовничнике (пл. 9 – 0,57), на склоне северной экспозиции брусничном сосняке (пл. 10 – 0,56) склонового типа местности. Умеренные связи отмечены в склоновом типе местности на площадке 6б толокнянковом сосняке (0,40) с иссушенными песчаными отложениями и на площадке 11 – мертвопокровнотолокнянковом сосняке (0,31) – умеренно-крутом склоне южной экспозиции с поздними сроками смыкания фазовых границ. Слабые связи выявлены на площадках формирования надмерзлотных вод СТС (пл. 5 – 0,30, пл. 7б – 0,27) в склоновом типе местности и на участке разгрузки намерзлотных вод СТС (С-1 – 0,20) (см. табл. 6).

Другие результаты выявлены при анализе корреляционных связей между T_0 с элементами климата. Как видно из табл. 7, связи преимущественно слабые или очень слабые. Значимая корреляционная связь температуры грунтов слоя годовых теплооборотов с среднегодовой температурой воздуха отмечена в приводораздельном склоне на площадке 7б (0,53), в низине на пл. 8а (0,55), и умеренная связь установлена на склоне северной экспозиции на пл. 10 (0,33). Умеренные связи выявлены между T_0 и $\Sigma-T_{вз}$, $\Sigma+T_{вз}$ на площадках 7б (0,44 и 0,49) и 8а (0,47 и 0,48), между T_0 и $\Sigma+T_{вз}$ на площадке 10 (0,31), между T_0 и $O_{з}$ на площадках 3а (0,46), 8а (0,47), 8 (0,32), между T_0 и $O_{г}$, $O_{л}$ имеется обратная связь на площадке 11 (–0,31 и –0,33), между T_0 и $h_{с}^{o-a}$ – на площадках 3а (0,37) и 8а (0,33), между T_0 и $\tau_{л}$ – на площадках 7б (0,46), 10 (0,32) и 8а (0,48), обратная уме-

Таблица 6

Корреляционные связи между температурами грунтов на подошве слоя сезонного протаивания (T_{ξ}) и элементами климата ($T_{вз}$, $\Sigma-T_{вз}$, $\Sigma+T_{вз}$, O_{Γ} , O_3 , $O_{\text{л}}$, h_c^{0-a} , τ_3 , $\tau_{\text{л}}$), мощности сезонно-талого слоя (ξ), температурами грунтов слоя годовых теплооборотов (T_0) в период 1981–2022 гг.

Table 6

Correlations between soil temperatures at the bottom of the seasonal thawing layer (T_{ξ}) and climate elements (T_{vz} , $\Sigma-T_{vz}$, $\Sigma+T_{vz}$, O_{Γ} , O_z , O_l , h_c^{0-a} , τ_z , τ_l), thicknesses of the seasonally thawed layer (ξ), temperatures soils of the layer of annual heat exchanges (T_0) in 1981–2022

Номер Пл.	$T_{вз}$	$\Sigma-T_{вз}$	$\Sigma+T_{вз}$	O_{Γ}	O_3	$O_{\text{л}}$	h_c^{0-a}	τ_3	$\tau_{\text{л}}$	ξ	T_0
Склоновый тип местности											
5	0,36	0,34	0,25	0,26	0,46	0,10	0,55	-0,40	0,37	-0,00	0,30
76	0,38	0,39	0,19	0,15	0,60	-0,08	0,66	-0,07	0,19	0,22	0,27
66	0,11	0,13	-0,01	0,35	0,56	0,15	0,75	0,11	-0,21	0,10	0,40
9	0,18	0,23	-0,02	0,27	0,52	0,08	0,54	-0,00	0,06	0,47	0,57
10	0,40	0,40	0,20	0,22	0,62	-0,01	0,64	-0,18	0,23	0,30	0,56
11	0,34	0,35	0,17	0,15	0,48	-0,03	0,52	-0,15	0,20	0,21	0,31
Мелкодолинный тип местности											
C-1	0,27	0,27	0,15	0,40	0,73	0,15	0,69	-0,08	0,17	0,69	0,20
3a	0,28	0,27	0,16	0,53	0,75	0,26	0,83	-0,14	0,14	0,23	0,63
8a	0,48	0,45	0,34	0,40	0,73	0,15	0,68	-0,18	0,31	0,59	0,80
8	0,30	0,29	0,15	0,44	0,71	0,20	0,76	-0,15	0,16	0,49	0,67

Примечание. Выделение цветом см. в примечании табл. 5.

Note. For highlighting, see the Note in Table 5.

Таблица 7

Корреляционные связи между температурами грунтов слоя годовых теплооборотов (T_0) и элементами климата ($T_{вз}$, $\Sigma-T_{вз}$, $\Sigma+T_{вз}$, O_{Γ} , O_3 , $O_{\text{л}}$, h_c^{0-a} , τ_3 , $\tau_{\text{л}}$), мощности сезонно-талого слоя (ξ) в период 1981–2022 гг.

Table 7

Correlations between the soil temperatures of the layer of annual heat exchanges (T_0) and climate elements (T_{vz} , $\Sigma-T_{vz}$, $\Sigma+T_{vz}$, O_{Γ} , O_z , O_l , h_c^{0-a} , τ_z , τ_l), the thickness of the seasonally thawed layer (ξ) in 1981–2022

Номер Пл.	$T_{вз}$	$\Sigma-T_{вз}$	$\Sigma+T_{вз}$	O_{Γ}	O_3	$O_{\text{л}}$	h_c^{0-a}	τ_3	$\tau_{\text{л}}$	ξ
Склоновый тип местности										
5	0,07	-0,00	0,23	-0,24	-0,06	-0,24	0,03	-0,28	0,20	-0,27
76	0,53	0,44	0,49	-0,19	0,17	-0,27	0,04	-0,37	0,46	-0,14
66	-0,02	-0,03	0,02	0,02	0,27	-0,09	0,29	0,02	-0,06	0,19
9	-0,02	-0,02	-0,02	-0,14	0,08	-0,19	-0,08	0,12	-0,06	0,15
10	0,33	0,28	0,31	-0,15	0,21	-0,25	0,02	-0,22	0,32	0,02
11	0,21	0,17	0,21	-0,31	0,00	-0,33	-0,27	-0,18	0,21	-0,16
Мелкодолинный тип местности										
C-1	-0,10	-0,10	-0,04	0,15	0,03	0,17	0,08	-0,01	0,16	0,18
3a	0,19	0,18	0,13	0,22	0,46	0,04	0,37	-0,09	0,16	0,12
8a	0,55	0,47	0,48	0,11	0,47	-0,07	0,33	-0,39	0,48	0,39
8	-0,04	-0,04	-0,01	0,18	0,32	0,07	0,29	0,00	0,04	0,33

Примечание. Выделение цветом см. в примечании табл. 5.

Note. For highlighting, see the Note in Table 5.

Таблица 8

Корреляционные связи мощности сезонно-талого слоя (ξ)
и климатическими элементами ($T_{вз}$, $\Sigma-T_{вз}$, $\Sigma+T_{вз}$, $O_{г}$, $O_{з}$, $O_{л}$, h_c^{0-a} , τ_3 , $\tau_{л}$),
температурами грунтов на подошве сезонно-талого слоя (T_{ξ})
и слоя годовых теплооборотов (T_0) в период 1981–2022 гг.

Table 8

Correlations between the thickness of the seasonally thawed layer (ξ)
and climatic elements ($T_{вз}$, $\Sigma-T_{вз}$, $\Sigma+T_{вз}$, $O_{г}$, $O_{з}$, $O_{л}$, h_c^{0-a} , τ_3 , $\tau_{л}$), soil temperatures
at the sole of the seasonally thawed layer (T_{ξ}) and the layer of annual heat exchanges (T_0) in 1981–2022

Номер Пл.	$T_{вз}$	$\Sigma-T_{вз}$	$\Sigma+T_{вз}$	$O_{г}$	$O_{з}$	$O_{л}$	h_c^{0-a}	τ_3	$\tau_{л}$	T_{ξ}	T_0
Склоновый тип местности											
5	–0,38	–0,30	–0,40	0,47	0,11	0,47	0,12	0,34	–0,32	–0,00	–0,27
7б	0,34	0,29	0,30	0,56	0,44	0,44	0,34	–0,26	0,21	0,22	–0,14
6б	–0,51	–0,43	–0,47	0,07	–0,07	0,10	–0,02	0,55	–0,49	0,01	0,19
9	0,01	0,02	–0,04	0,40	0,40	0,27	0,29	0,16	–0,20	0,47	0,15
10	0,22	0,14	0,33	0,41	0,43	0,28	0,46	–0,06	0,14	0,30	0,02
11	–0,18	–0,15	–0,18	0,31	0,32	0,21	0,30	0,16	–0,19	0,21	–0,15
Мелкодолинный тип местности											
С-1	0,10	0,02	0,27	0,36	0,47	0,21	0,56	0,09	0,11	0,69	0,18
3а	0,48	0,36	0,54	0,18	0,21	0,11	0,17	–0,44	0,31	0,23	0,12
8а	0,08	0,08	0,03	0,61	0,47	0,47	0,50	–0,08	0,21	0,59	0,39
8	0,32	0,21	0,42	0,28	0,43	0,14	0,38	–0,30	0,39	0,49	0,33

Примечание. Выделение цветом см. в примечании табл. 5.

Note. For highlighting, see the Note in Table 5.

ренная связь между T_0 и τ_3 установлена на площадках 7б (–0,37) и 8а (–0,39). Умеренная корреляционная связь между T_0 и мощностью ξ выявлена на площадках 8а (0,39) и 8 (0,33) мелкодолинного типа местности.

Анализ корреляции мощности сезонно-талого слоя (ξ) с элементами климата показал, что встречаются часто умеренные и слабые связи, выборочно – заметные связи (табл. 8). Между ξ и $T_{вз}$ умеренные связи имеются на площадках 7б (0,34), 3а (0,48) и 8 (0,32), отмечена обратная заметная связь на площадке 6б (–0,51), на остальных площадках установлены слабые связи. Между ξ и $\Sigma-T_{вз}$ умеренная связь отмечена на площадке 3а (0,36), и умеренные обратные связи установлены на площадках 5 (–0,30) и 6б (–0,43) с глубоким сезонным протаиванием. Между ξ и $\Sigma+T_{вз}$ заметная связь выявлена на площадке 3а (0,54), между ξ и $O_{г}$ – на площадках 7б (0,56) и 8а (0,61), между ξ и h_c^{0-a} – на участке С-1 (0,56), между ξ и τ_3 – на площадке 6б (0,55).

Еще в конце прошлого века нами был сделан вывод об устойчивости термического режима многолетнемерзлых грунтов и их слабой реакции

на изменчивость климатических факторов [26]. Последующие годы подтвердили этот тезис.

Выводы

1. Многолетняя динамика теплового состояния слоя годовых теплооборотов при потеплении климата свидетельствует об их неоднозначной термической реакции. Статистически значимые тренды повышения температуры вызваны аномально многоснежными зимами и формированием надмерзлотных вод сезонно-талого слоя. Основным регулирующим фактором динамики теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов является режим снегонакопления. Тренды понижения температуры грунтов связаны с увеличением затенения поверхности под пологами кронов древостоя и подрастанием кустарникового покрова, т. е. увеличением биомассы.

2. Глубина сезонного протаивания, несмотря на значительные межгодовые колебания, реагирует на потепление климата разнонаправленными тенденциями.

3. Проведены статистические исследования временных рядов наблюдений. Выявлены корре-

ляционные связи между элементами климата (температура воздуха, сумма осадков, средне-зимняя высота снежного покрова, продолжительность зимнего и летнего сезонов) и связи между параметрами температурного режима грунтов (T_{ξ} , T_0 , ξ) и элементами климата по экспериментальным площадкам в склоновом и мелкодолинном типах местности.

4. Результаты исследований теплового режима грунтов можно распространить на однотипные ландшафты Центральной Якутии, а также они могут быть использованы в математическом моделировании эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов и разработке методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем.

Список литературы / References

1. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. *Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 2021. 156 с.
Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. *Monitoring of the thermal regime of soils in Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 2021. 156 p. (In Russ.)
2. Иванов Н.С. О тепловом режиме верхнего слоя земной коры в районе Якутска. *Тепло- и массообмен в мерзлых толщах земной коры*. Салтыков Н.И. (ред.). М.: Изд-во АН СССР; 1963:9–55.
Ivanov N.S. On the thermal regime of the upper earth crust around Yakutsk area. *Heat and mass exchange in frozen layers of the Earth Crust*. Saltykov N.I. (ed.). Moscow: USSR Academy of Science Press; 1963:9–55. (In Russ.)
3. Арз Ф.Э. Температурный режим горных пород под усыхающим термокарстовым озером в Центральной Якутии. *Вопросы географии Якутии*. Л.: Гидрометеоиздат; 1973:70–75.
Arz F.E. Ground temperature regime beneath a draining thaw lake in Central Yakutia. *Issues of the Geography of Yakutia*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973:70–75. (In Russ.)
4. Гаврилова М.К. Тепловой баланс лиственничного леса на Лено-Амгинском междуречье. *Гидроклиматические исследования в лесах Сибири. Взаимоотношение леса и среды*. М.: Наука; 1967:28–52.
Gavrilova M.K. Thermal balance of larch forest in the Leno-Amginsky interfluvium. *Hydro-Climatic studies in the forests of Siberia. Relationship between the forest and the environment*. Moscow: Nauka; 1967:28–52. (In Russ.)
5. Павлов А.В. *Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР*. Якутск: Книжное изд-во; 1975. 302 с.
Pavlov A.V. *Heat exchange between soil and atmosphere in high and mid-latitudes of the USSR*. Yakutsk: Publishing House; 1975. 302 p. (In Russ.)
6. Павлов А.В. *Теплофизика ландшафтов*. Новосибирск: Наука; 1979. 285 с.
Pavlov A.V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 285 p. (In Russ.)
7. Павлов А.В., Прокопьев А.Н., Скачков Ю.Б., Вотякова Н.И. Тепловой режим и промерзание грунтов намывной насыпи в пойме р. Лены. *Теплофизические исследования криолитозоны Сибири*. Новосибирск: Наука; 1983:135–147.
Pavlov A.V., Prokopyev A.N., Skachkov Y.B., Votyakova N.I. Thermal regime and freezing of soils of the alluvial embankment in the floodplain of the river Lena. *Thermophysical studies of the permafrost zone of Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1983:135–147. (In Russ.)
8. Замолотчикова С.А., Смирнова В.Н. Температура и сезонное оттаивание пород на Лено-Вилуйском водоразделе. *Мерзлотные исследования*. Вып. 4. М.: Изд-во МГУ; 1974:141–147.
Zamolotchikova S.A., Smirnova V.N. Temperature and seasonal thawing of rocks in the Leno-Vilyui watershed. Iss. 14 *Permafrost research*. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1974:141–147. (In Russ.)
9. Заболотник С.И. Динамика температурного поля сезонно – и многолетнемерзлых пород при нарушении покровов в Центральной Якутии. *Общее мерзловедение: Материалы к III Междунар. конф. по мерзловедению*. Новосибирск: Наука; 1978:210–214.
Zabolotnik S.I. Dynamics of the temperature field of seasonally - and permafrost rocks in violation of the covers in Central Yakutia. *General permafrost: Materials for the 3rd International conference on permafrost*. Novosibirsk: Nauka; 1978:210–214. (In Russ.)
10. Полтев Н.Ф., Ершов Э.Д., Свердлов М.Ф. Мерзлотные условия на участке междуречья Ханчалы–Кенкеме. *Мерзлотные исследования*. Вып. 10. М.: Изд-во МГУ; 1970:198–202.
Poltev N.F., Ershov E.D., Sverdlov M.F. Permafrost conditions in the interfluvium section of Khanchaly-Kenkeme. *Permafrost research*. Iss. 10. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1970:198–202. (In Russ.)
11. Турбина М.И. Изменение природных условий на одном из участков действующего газопровода (Центральная Якутия). *Мерзлотные исследования в осваиваемых районах СССР*. Новосибирск: Наука; 1980:31–36.
Turbina M.I. Changes in natural conditions on one of the sections of the existing gas pipeline (Central Yakutia). *Permafrost research in the developing regions of the USSR*. Novosibirsk: Nauka; 1980:31–36. (In Russ.)
12. Константинов И.П., Матковский В.Н. Изменение геокриологических условий трасс газопроводов Якутии. *Природные условия осваиваемых регионов Сибири*. Якутск: Ин-т мерзловедения СО АН СССР; 1987:126–134.
Konstantinov I.P., Matkovsky V.N. Changes in geocryological conditions of gas pipeline routes in Yakutia.

Natural conditions of the developing regions in Siberia. Yakutsk: Permafrost Institute; 1987:126–134. (In Russ.)

13. Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Шендер Н.И., Гаврильев Р.И. *Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии.* Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1988. 240 с.

Feldman G.M., Tetelbaum A.S., Shender N.I., Gavriliev R.I. *Handbook on the forecast of the temperature regime of the soils of Yakutia.* Yakutsk: Permafrost Institute; 1988. 240 p. (In Russ.)

14. Федоров А.Н., Максимов Т.Х., Гаврильев П.П. и др. «Спаская падь»: Комплексные исследования мерзлотных ландшафтов. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН; 2006. 210 с.

Fedorov A.N., Maximov T.Kh., Gavriliev P.P. et al. *Spasskaya Pad: Integrated Investigations of the Permafrost Landscapes;* Yakutsk: Permafrost Institute Press; 2006. 210 p. (In Russ.)

15. Федоров А.Н. Роль вырубок в развитии мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. *Региональные инженерные геокриологические исследования.* Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1985:111–117.

Fedorov A.N. The role of logging in the development of permafrost landscapes in Central Yakutia. *Regional and Engineering Permafrost Investigations in Yakutia.* Yakutsk: Permafrost Institute; 1985:111–117. (In Russ.)

16. Павлов А.В. *Мониторинг криолитозоны.* Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2008. 229 с.

Pavlov A.V. *Permafrost Monitoring.* Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”; 2008. 229 p. (In Russ.)

17. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V. et al. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes.* 2010;21(2): 136–155. <https://doi.org/10.1002/ppp.683>

18. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Шендер Н.И. Тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии при современном изменении климата. *Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX Международного симпозиума, г. Якутск, 03–07 сентября 2011 г.* Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН; 2011:398–403.

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N., Shender N.I. Thermal state of upper permafrost in Central Yakutia under contemporary climate change. *Permafrost Engineering. Proceedings of the 9th International Symposium, September 03–07, 2011.* Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS Press; 2011:398–403. (In Russ.)

19. Varlamov S., Skachkov Y., Skryabin P. Current climate change effects on the ground thermal regime in Central Yakutia. *Sciences in Cold and Arid Regions.* 2014;6(4):282–292.

20. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Evolution of the thermal state of permafrost under climate warming in Central Yakutia. *The Holocene.* 2019;29(9): 1401–1410. <https://doi.org/10.1177/0959683619855959>

21. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Influence of climate change on the thermal condition of Yakutia’s permafrost landscapes (Chabyda Station). *Land.* 2020;9(5):132. <https://doi.org/10.3390/land9050132>

22. Варламов С.П., Скрыбин П.Н. Трансформация мерзлотных компонентов экосистем под влиянием природно-технических систем. *Успехи современного естествознания.* 2012;(11):74–76.

Varlamov S.P., Skryabin P.N. Transformation of frozen parts ecosystems under the influence of natural and technical systems. *Advances in current natural sciences.* 2012;(11):74–76. (In Russ.)

23. Варламов С.П., Скрыбин П.Н. *Антропогенные воздействия на тепловой режим грунтов Центральной Якутии.* Saarbrücken, Deutschland, Германия: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing; 2013. 80 с.

Varlamov S.P., Skryabin, P.N. *Anthropogenic impact on the thermal regime of soils in Central Yakutia.* Saarbrücken, Germany; LAP LAMBERT Academic Publishing; 2013. (In Russ.)

24. Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Варламов С.П. Изменения температуры грунтов слоя годовых теплооборотов на якутском теплосбалансовом стационаре за последние сорок лет. *Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международного симпозиума, г. Якутск, 03–07 сентября 2011 г.* Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН; 2011:444–449.

Skachkov Y.B., Skryabin P.N., Varlamov S.P. Near-surface ground temperature variations at the Yakutsk permafrost thermal monitoring site during the last 40 years. *Permafrost Engineering: Proceedings of the 9th International Symposium.* Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2011:444–449. (In Russ.)

25. Варламов С.П. Ландшафтно-типологическое картирование как основа экстраполяции стационарных исследований. *Региональные и инженерные геокриологические исследования.* Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1985:132–137.

Varlamov S.P. Landscape-typological mapping as a basis for extrapolation of stationary studies. *Regional and Engineering Permafrost Investigations in Yakutia.* Yakutsk: Permafrost Institute; 1985:132–137. (In Russ.)

26. Скрыбин П.Н., Варламов С.П., Скачков Ю.Б. *Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска.* Новосибирск: Изд-во СО РАН; 1998. 144 с.

Skryabin P.N., Varlamov S.P., Skachkov Yu.B. *Inter-annual variability of the ground thermal regime in the Yakutsk area.* Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 1998. 144 p. (In Russ.)

27. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. *Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии.* Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 2002. 218 с.

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. *Ground temperature regime in permafrost landscapes of Cen-*

tral Yakutia. Yakutsk: Permafrost Institute; 2002. 218 p. (In Russ.)

28. Скачков Ю.Б. Аномальные зимы и их роль в формировании термического режима грунтов. *Материалы Третьей конференции геокриологов России*. М.: Изд-во МГУ; 2005;3:239–244.

Skachkov Yu.B. Anomalous winters and their role in the formation of the thermal regime of soils. *Proceedings of the 3rd conference of Geocryologists of Russia*. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 2005;4: 239–244. (In Russ.)

29. Скачков Ю.Б. Современное потепление климата в Якутии. *VIII научное совещание географов Сибири и Дальнего Востока: Материалы Российской конференции*. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН; 2007;1:92–93.

Skachkov Yu.B. Modern climate warming in Yakutia. *8th Scientific Meeting of Geographers of Siberia and the Far East: Materials of Russian Conference*. Irkutsk: Publishing House of the Sochava Institute of Geography SB RAS; 2007;1:92–93. (In Russ.)

30. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Современная изменчивость термического режима грун-

тов Тунгюльонской террасы долины р. Лены. *Вопросы географии Якутии: Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны*. Якутск: СММК-МАСТЕР; 2013;11:38–43.

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. Modern variability of the thermal regime of soils of the Tyungyulyunskaya terrace of the valley of the river Lena. *Questions of the geography of Yakutia: the impact of climate change on the natural processes of the permafrost*. Yakutsk: SMIK-MASTER; 2013;11:38–43. (In Russ.)

31. Павлов А.В., Скачков Ю.Б., Какунов Н.Б. Взаимосвязь между многолетними изменениями глубины сезонного протаивания грунтов и метеорологическими факторами. *Криосфера Земли*. 2004;8(4):3–11.

Pavlov A.V., Skachkov Yu.B., Kakunov N.B. The correlation between perennial changes of soil seasonal thawing depth and meteorological factors. *Kriosfera Zemli*. 2004;8(4):3–11. (In Russ.)

32. Орлов А.И. Вероятностно-статистические модели корреляции и регрессии. *Научный журнал КубГАУ*. 2020;160(06). <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-160-011>

Об авторах

ВАРЛАМОВ Степан Прокопьевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2021-9686>, ResearcherID: V-9370-2018, Scopus AuthorID: 22958732100, РИНЦ AuthorID: 63432, e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

СКАЧКОВ Юрий Борисович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5602-8956>, Scopus Author ID: 15120142400, РИНЦ AuthorID: 63431, e-mail: ubskachkov@mpi.ysn.ru

СКРЯБИН Павел Николаевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8155-378X>, ResearcherID: V-9373-2018, Scopus AuthorID: 6508006475, РИНЦ AuthorID: 63433, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

БАЛУТА Виктор Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4399-0943>, РИНЦ AuthorID: 879007, e-mail: vbaluta@yandex.ru

About the authors

VARLAMOV, Stepan Prokopievich, Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2021-9686>, ResearcherID: V-9370-2018, Scopus Author ID: 22958732100, RISC AuthorID: 63432, e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

SKACHKOV, Yuri Borisovich, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5602-8956>, Scopus AuthorID: 15120142400, RISC AuthorID: 63431, e-mail: ubskachkov@mpi.ysn.ru

SKRYABIN, Pavel Nikolayevich, Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8155-378X>, ResearcherID: V-9373-2018, Scopus Author ID: 6508006475, RISC AuthorID: 63433, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

BALUTA, Victor Ivanovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4399-0943>, RISC AuthorID: 879007, e-mail: vbaluta@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 26.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.07.2023

Принята к публикации / Accepted 02.09.2023