Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345-047.36(571.56)
https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-376-391

CC BY 4.0

Оригинальная статья

Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов к современному потеплению климата (на примере Центральной Якутии)

С. П. Варламов✉, Ю. Б. Скачков, А. Н. Федоров

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉svarlamov@mpi.ysn.ru

Аннотация
Оценка устойчивости ландшафтов к современному потеплению климата – один из основных острых вопросов современности. Наблюдаемая в настоящее время активизация криогенных процессов в Центральной Якутии, особенно на нарушенных и антропогенных ландшафтах, показывает актуальность проблемы. Целью исследований является оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии в условиях усиливающегося потепления климата, начиная с 1970-х годов. Основой для оценки послужили результаты натурных наблюдений за температурой многолетнемерзлых пород в слое годовых теплооборотов за период 1981–2023 гг., данные метеостанций по температуре воздуха на высоте 2 м и почвы на глубине 1,6 м. Мониторинг, включая создание сети, наблюдения на стационарах и мониторинговых участках Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, и анализ полученных данных в контексте изменения климата были основными методами исследований. Были оценены пространственно-временные изменения мощности деятельного слоя и среднегодовой температуры пород в слое годовых теплооборотов и их тренды как показатель отклика на потепление климата. Проведен региональный анализ изменчивости коэффициента термической устойчивости (Kα) многолетнемерзлых пород в девяти типах местностей по температурным данным на подошвах деятельного слоя и в слое годовых теплооборотов (глубина 10 м). Положительные значения Kα, превышающие 1,0, свидетельствуют о деградации многолетнемерзлых пород, встречаются и отрицательные тренды, которые связаны с изменениями режима снегонакопления и биомассы экосистем. Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов затрагивает важные аспекты природы окружающей среды и социально-экономической устойчивости Центральной Якутии. Результаты исследований могут быть использованы государственными органами по планированию развития территорий, природоохранными организациями, хозяйствующими субъектами и образовательными заведениями.

Ключевые слова: термическая устойчивость, потепление климата, мерзлотные ландшафты, многолетнемерзлые породы, деятельный слой, температура, мониторинг
Финансирование. Сбор и систематизация данных натурного исследования проведены в рамках НИОКТР № 122011800062-5 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика», анализ данных и подготовка статьи осуществлены за счет гранта Российского научного фонда «Разработка методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем» (проект № 23-61-10032).
Благодарности. Авторы выражают благодарность к.г.н. П.Н. Скрябину за многолетние совместные исследования.
Для цитирования: Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Федоров А.Н. Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов к современному потеплению климата (на примере Центральной Якутии). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):376–391. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-376-391

Original article

Assessment of the thermal stability of permafrost landscapes in response to contemporary climate warming: A case study of Central Yakutia

Stepan P. Varlamov✉, Yuri B. Skachkov, Alexandr N. Fedorov

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉svarlamov@mpi.ysn.ru

Abstract
Assessing the resilience of landscapes in response to current climate warming represents a critical challenge today. The current intensification of cryogenic processes in Central Yakutia, particularly in disturbed and anthropogenic

 © Варламов С. П., Скачков Ю. Б., Федоров А. Н., 2025

landscapes, highlights the urgency of this issue. This study aims to evaluate the thermal stability of permafrost landscapes in Central Yakutia amid increasing climate warming since the 1970s. The assessment is based on field observations of permafrost rock temperatures within the annual heat turnover layer from 1981 to 2023, alongside meteorological data on air temperature at 2 meters above ground and soil temperature at a depth of 1.6 meters. The primary research method involved monitoring, including establishing a network, observation at sites and monitoring stations of the Melnikov Permafrost Institute of SB RAS, and analyzing the collected data in the context of climate change. Spatiotemporal changes in the thickness of the active layer and the mean annual temperature of ground within the annual heat turnover layer were estimated, with their trends serving as indicators of the landscape's response to climate warming. A regional analysis of the variability of the thermal stability coefficient ($K\alpha$) of permafrost rocks across nine types of localities was conducted, based on temperature data at the base of the active layer and within the annual heat turnover layer (10 meters depth). Positive $K\alpha$ values exceeding 1.0 indicate permafrost degradation, while negative trends are associated with changes in snow accumulation regimes and ecosystem biomass. Assessing the thermal stability of permafrost landscapes has significant implications for the natural environment and the socio-economic stability in Central Yakutia. The research findings can inform government agencies in territorial development planning and support environmental organizations, businesses, and educational institutions.

Keywords: thermal stability, climate warming, permafrost landscapes, permafrost rocks, active layer, temperature, monitoring

Funding. Field data collection and classification were conducted as part of the research project titled "Thermal field and permafrost in North-East Russia: Formation and dynamics" (No. 122011800062-5). Data analysis and manuscript preparation were supported by the Russian Science Foundation under the project titled "Development of hybrid intelligence methods for solving infrastructure assessment problems in the Far North based on high-performance computing systems" (grant No. 23-61-10032).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Cand. Sci. (Geogr.) Pavel N. Scryabin for his long-term and valuable collaboration in their research.

For citation: Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Fedorov A.N. Assessment of the thermal stability of permafrost landscapes in response to contemporary climate warming: A case study of Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):376–391. (In Russ.); https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-376-391

Введение

При активном освоении северных регионов в хозяйственный оборот вовлекаются территории, в пределах которых происходит нарушение компонентов природной обстановки: почвенно-растительного, микрорельефа, режима снегоотложения, что отражается на мерзлотных и гидрологических условиях. Это может вызвать развитие криогенных процессов (термокарста, солифлюкции, оврагообразования и др.), в том числе опасных для устойчивости инфраструктурных сооружений. В семидесятые годы прошлого века зарубежные и отечественные исследователи обратили пристальное внимание на проблемы устойчивости поверхности к техногенным воздействиям [1–5] и моделирование температурного режима грунтов в естественных и нарушенных условиях в области распространения многолетней мерзлоты [6–12]. Начиная с 1970-х годов метеорологическими наблюдениями фиксируется потепление климата в Северном полушарии [13, 14]. Оно продолжается более полувека, прогнозируется его развитие в дальнейшем. В связи с этим в последнее время исследователи холодных регионов обратили пристальное внимание на изменение теплового состояния верхних горизонтов криолитозоны в естественных условиях, не тронутых хозяйственной деятельностью [15–22].

Цель работы – оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии в условиях усиливающегося потепления климата, начиная с 1970-х годов.

Объектом исследований является литогенная основа мерзлотных ландшафтов.

Оценка термической устойчивости мерзлотных ландшафтов основывается на реальных многолетних данных натурного комплексного мониторинга в Центральной Якутии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, организованного на экспериментальных площадках стационаров «Туймаада» и «Чабыда», на мониторинговых полигонах на право- и левобережье р. Лена. Также использовались данные метеостанций по температуре воздуха и почвогрунтов на глубине 1,6 м, характеризующие региональные особенности изменения тепловых характеристик на относительно однородных открытых участках.

Показателями изменения теплового состояния верхней толщи многолетнемерзлых пород (ММП) при колебаниях климата являются среднегодовая температура на подошве деятельного

слоя (T_ξ), температура в слое годовых теплооборотов (глубина 10 м) (T_0) и мощность деятельного слоя (ξ).

Наблюдательная сеть и методика проведения натурных исследований

Наблюдательные пункты в Центральной Якутии организованы в семи физико-географических районах и охватывают элементарные ландшафтные комплексы девяти типов местности с различными вариациями их литогенной основы (табл. 1, 2), что позволило выявить их многолетнюю динамику в широком спектре природных условий в период 1980–2024 гг.

Для измерения температуры пород использовались термокосы с датчиками температуры на глубинах 0,5; 1; 2; 3; 4; 6: 8; 10; 12; 14; 16; 18 и 20 м. В качестве регистраторов температуры пород использовались полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 с точностью измерений 0,1 °С.

Основные наблюдения проводились на мониторинговых полигонах, с количеством замеров 3–4 раза в год. В пунктах температурных наблюдений после бурения и установки термокосы стволы скважин заполнялись ранее извлеченным грунтом. Анализировались данные по температуре пород на глубине 10 м. Высота снега определялась в декабре и в период максимального снегонакопления (конец марта–начало апреля). Более детальные исследования проводились на стационарах «Чабыда» и «Туймаада», где замеры температуры пород и высоты снежного покрова выполнялись ежемесячно. Термокосы устанавливались стационарно в обсаженных скважинах. Анализи-

Таблица 1

Мониторинговые полигоны в различных ландшафтных комплексах

Table 1

Monitoring sites across various landscape complexes

Стационар*, полигон	Начало наблюдений, год	Тип местности	Физико-географический район (подрайон)
Чабыда*	1980	Мелкодолинный, склоновый	Приленский левобережный песчаниковый
Зеленый луг*	1986	Пойменный	Приленский долинно-лесостепной
Хаптагай, Кердем	1988		
Туймаада (Якутск)*	1969–1980, 1995	Надпойменно-низкотеррасовый	
Ус-Хатын, Хатассы	2003		
Шестаковка, Сатагай	1986		
Хаптагай, Кердем	1988		
Нижняя Лютенга, Менда, Улахан Тарын, Джаптада, Эльген, Тамма	1987	Песчано-грядовый, межгрядово-низинный	Бестяхский песчано-грядовый (подрайон Тамма-Мендинский)
Тамма	1987	Песчано-грядовый, межгрядово-низинный	Бестяхский песчано-грядовый (подрайон Нижнебестяхский)
Мыла, Юнкюр	1993		
Тамма	1987	Мелкодолинный	
Мундулах	1993	Межаласный, аласный	Тюнгюлюнский аласно-котловинный (подрайон суглинистый)
Булуус, Кетюрен	1987	Песчано-грядовый, межгрядово-низинный	Тюнгюлюнский аласно-котловинный (подрайон песчано-грядовый)
Былдьана, Тарынг	1987, 1989	Межаласный, аласный, мелкодолинный	Лено-Амгинский аласно-долинный супесчано-суглинистый
Верхняя Лютенга, Кирим	1995, 2006	Плакорный, склоновый	Лено-Амгинский пологоволнистый (подрайон песчаниковый)
		Межаласный	Лено-Амгинский пологоволнистый (подрайон суглинистый переходной полигенетической равнины)
Маган	2002	Межаласный	Кенкеме-Ленский мелкодолинно-аласный

Таблица 2

Экспериментальные площадки (Пл) и скважины (Скв) по типам местности

Table 2

Experimental sites and boreholes categorized by terrain type

Номер скважины или площадки	Растительность	Преобладающие виды грунтов
Надпойменно-низкотеррасовый		
Пл «Луг»	Разнотравный луг	Суглинок, песок
Пл «Лес»	Разнотравный сосняк	Суглинок, песок
Скв-5/86	Разнотравный сосново-лиственничник	Супесь, суглинок, песок
Песчано-грядовый		
Скв-3/87	Мертвопокровный сосняк	Песок
Скв-22/87	Брусничный сосново-лиственничник	Супесь, песок
Скв-24/87	Мертвопокровный сосняк	Песок
Скв-59/87	Мертвопокровный сосняк	Песок, супесь
Скв-167/89	Брусничный сосново-лиственничник с ольховым подлеском	Песок
Скв-2/93	Мертвопокровный лиственничник	Супесь, песок
Межгрядово-низинный		
Скв-1/87	Разнотравно-бруснично-багульниковый березово-лиственничник	Песок
Скв-5/87	Сфагново-багульниковый ерник	Торф, песок
Скв-39/87	Сфагново-багульниково-ерниковое лиственничное редколесье	Торф, песок
Скв-9/93	Мохово-багульниково-брусничный лиственничник	Торф, песок
Скв-30а	Мохово-голубично-багульниковый лиственничник	Песок
Скв-14/93	Осоковая западина	Песок с прослоями глины
Аласный		
Скв-125/87	Разнотравно-злаковый луг	Суглинок, супесь
Скв-127/87	Осоково-разнотравный луг	Торф, супесь
Скв-192/89	Разнотравно-злаковый березняк	Торф, песок
Скв-162/89	Разнотравно-злаковый луг	Супесь, суглинок
Межаласный		
Скв-57/87	Бруснично-голубичный лиственничник	Супесь, песок
Скв-61/87	Брусничный лиственничник	Суглинок
Скв-163/89	Травяно-брусничный лиственничник с ивово-березовым подлеском	Супесь
Скв-185/89	Мохово-брусничный лиственничник	Песок, супесь
Скв-193/89	Травяно-брусничный березово-лиственничник	Супесь, суглинок
Скв-210/90	Толокнянково-брусничный лиственничник	Песок, супесь
Скв-10/93	Брусничный лиственничник	Суглинок
Скв-2/95	Бруснично-голубично-багульниковый лиственничник	Суглинок
Скв-1/03	Вейниково-березово-лиственничник	Суглинок, супесь, песок
Скв-28/08	Брусничный лиственничник	Суглинок
Скв-12/09	Мохово-брусничный лиственничник	Суглинок
Скв-17/09	Мохово-брусничный лиственничник	Суглинок
Скв-39/09	Брусничный лиственничник	Суглинок
Скв-40/09	Брусничный лиственничник	Суглинок
Пойменный		
Скв-168/89	Разнотравно-злаковый луг	Супесь, песок
Мелкодолинный		
Скв-1/82	Сфагново-осоковый ерник	Торф, песок
Пл 8	Мохово-багульниково-брусничный лиственничник	Песок
Пл 3а	Сфагново-багульниковый ерник	Торф, песок

Окончание таблицы 2

Номер скважины или площадки	Растительность	Преобладающие виды грунтов
Пл 8а	Осоково-вейниковая низина	Торф, песок
Скв-11/87	Сфагново-багульниковый ерник	Торф, суглинок, песок
Скв-12/87	Голубично-брусничный лиственничник с примесью березы	Песок
Скв-25/87	Багульниково-брусничный лиственничник	Песок
Скв-174/89	Зеленомошный елово-лиственничник	Песок
Плакорный		
Скв-8/95	Брусничный лиственничник	Супесь, песок
Скв-11/95	Бруснично-голубичный лиственничник	Супесь, суглинок
Склоновый		
Пл 5	Мертвопокровно-толокнянковый сосняк	Песок
Пл 6б	Мертвопокровно-толокнянковый сосняк	Песок
Пл 7б	Бруснично-толокнянковый сосняк с примесью лиственницы	Супесь, песок
Пл 9	Брусничный лиственничник	Супесь, суглинок, песок
Пл 10	Брусничный сосняк	Супесь, песок, суглинок
Пл 11	Толокнянковый сосняк	Супесь, песок, суглинок

ровались данные о температуре пород на подошве деятельного слоя (от 0,5 до 4 м) и на глубинах 3 и 10 м.

Мощность деятельного слоя определялась непосредственно в пунктах наблюдений ручным бурением или металлическим щупом в конце теплого сезона.

Для оценки термических изменений в криолитозоне исследователями часто используются данные метеорологических станций по температуре почвы (до глубины 1,6 и 3,2 м). Массовые наблюдения в бывшем СССР начались еще в 1930–1950-е гг. На севере России к началу 1990-х гг. наблюдения за температурой почвы проводились на 100–110 метеостанциях. Из них 45–50 метеостанций функционировало на территории сплошного распространения криолитозоны и 55–60 метеостанций – на территории ее прерывистого распространения. Наибольший объем наблюдений за температурой почвы в условиях сплошной криолитозоны выполнен в Якутии (45 пунктов) и на Северо-Востоке, а прерывистой криолитозоны – в средней части Западной Сибири, Забайкалье и Приамурье [17]. Регулярные измерения температуры верхнего слоя многолетнемерзлых грунтов на метеостанциях проводились ежесуточно с помощью вытяжных термометров (0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 2,4; 3,2 м). Анализ этих данных в ряде случаев показал существенные погрешности. Поэтому данные о температуре грунтов, получаемые на метеостанциях, требуют весьма осторожной интерпретации.

В данной работе привлечены данные наблюдений по 15 метеостанциям (табл. 3). Наблюдательные пункты на метеорологических станциях были организованы на открытых участках. Следует отметить, что с 60-х годов прошлого века по настоящее время из рассматриваемых метеостанций в семи был перенос местоположений. Имеющиеся доступные материалы по температуре почвы имели разный (по длительности) период наблюдений. В период с 1989 по 2023 г. имеются данные только на четырех станциях. Это затрудняло интерпретацию и сравнение результатов наблюдений за температурой почвы.

При оценке эволюции криолитозоны в условиях меняющегося климата представляет интерес сравнение трендов среднегодовой температуры: воздуха ($\alpha T_{в2}$); многолетнемерзлых пород на подошве деятельного слоя (αT_{ξ}) и в слое годовых теплооборотов на глубине 10 м (αT_0). По пунктам наблюдений рассчитан относительный коэффициент термической устойчивости мерзлых толщ ($K\alpha = \alpha T_0/\alpha T_{в2}$), предложенный А. В. Павловым [18]. При значениях $K\alpha < 0{,}50$ отмечается высокая термическая устойчивость мерзлых грунтов, при $0{,}5 < K\alpha < 0{,}75$ – средняя устойчивость и при $0{,}75 < K\alpha < 1{,}0$ – слабая устойчивость [19]. Положительные значения коэффициента $K\alpha$, превышающие 1,0 (при условии, когда

Таблица 3

Метеорологические станции Центральной Якутии

Table 3

Meteorological stations in Central Yakutia

№ п/п	Наименование станции	Координаты станции		Высота площадки, м	Перенос станции
		широта	долгота		
1	Сангар	63°58′	127°28′	96	
2	Вилюйск	63°47′	121°37′	110	
3	Верхневилюйск	63°29′	120°11′	115	
4	Намцы	62°44′	129°40′	90	
5	Ытык-Кюёль	62°22′	133°33′	177	1967, 1986, 1994 гг.
6	Бердигестях	62°16′	127°04′	231	1977 г.
7	Чурапча	62°02′	132°36′	181	1967, 2000 г.
8	Якутск	62°01′	129°43′	98	1964 г.
9	Тонгулах	61°55′	124°33′	199	1971 г.
10	Охотский Перевоз	61°52′	135°30′	140	
11	Покровск	61°29′	129°09′	115	2001 г.
12	Амга	60°58′	131°57′	146	1968 г.
13	Исить	60°49′	125°19′	117	
14	Олекминск	60°24′	120°25′	223	
15	Усть-Мая	60°23′	134°27′	169	

αT_0 значительно превышают $\alpha T_{вг}$), свидетельствуют о неустойчивости грунта и деградации многолетнемерзлых пород. Отрицательные значения коэффициента $K\alpha$ показывают охлаждение многолетнемерзлых пород в условиях потепления климата, подтверждающие аградационные процессы.

Результаты исследований

Оценка изменений термического состояния литогенной основы мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии по результатам натурных наблюдений на стационарах и мониторинговых участках. В пределах исследуемой территории ξ с разным литологическим составом, в зависимости от характера растительного, напочвенного покровов и влагосодержания отложений изменяется в больших пределах от 0,4 до 4,2 м, T_0 варьирует от +0,9 до –6,4 °С, а (ΔT_0) от –0,1 до –6,5 °С (табл. 4) [15].

Наиболее высокие температуры грунтов наблюдаются в крупнодисперсных песках, характеризующихся, в зависимости от разнообразия и изменчивости теплофизических свойств (влажности, теплопроводности) покровов и подстилающих песков, наибольшим диапазоном изменения температур. Для песчаных отложений характерно большое разнообразие ландшафтных урочищ. Наиболее низкая температура пород формируется в торфяных отложениях и суглинках, перекрытых торфом. Эти участки отличаются однообразием поверхностных условий, наименьшим набором урочищ и узким диапазоном изменения температуры. За песками по изменчивости ΔT_0 следуют пески, перекрытые торфом. Пески перекрытые супесями, супесчано-суглинистые и суглинистые отложения характеризуются узким диапазоном изменения T_0.

На рис. 1 показана пространственно-временная изменчивость среднегодовой температуры грунтов в слое годовых теплооборотов (глубина 10 м) по девяти типам местности в Центральной Якутии. Разность пространственной изменчивости среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м по типам местности следующая: пойменный – 2,6; надпойменно-низкотеррасовый – 2,0; песчано-грядовый – 3,3; межгрядово-низинный – 3,4; межаласный – 4,5; аласный – 1,3; мелкодолинный – 5,3; склоновый – 2,1 и плакорный – 0,8 °С (см. рис. 1).

Максимальные значения межгодовой изменчивости температуры грунтов (T_0) составляют по типам местности: пойменный – 1,0; надпойменно-низкотеррасовый – 1,1; песчано-грядовый – 1,7;

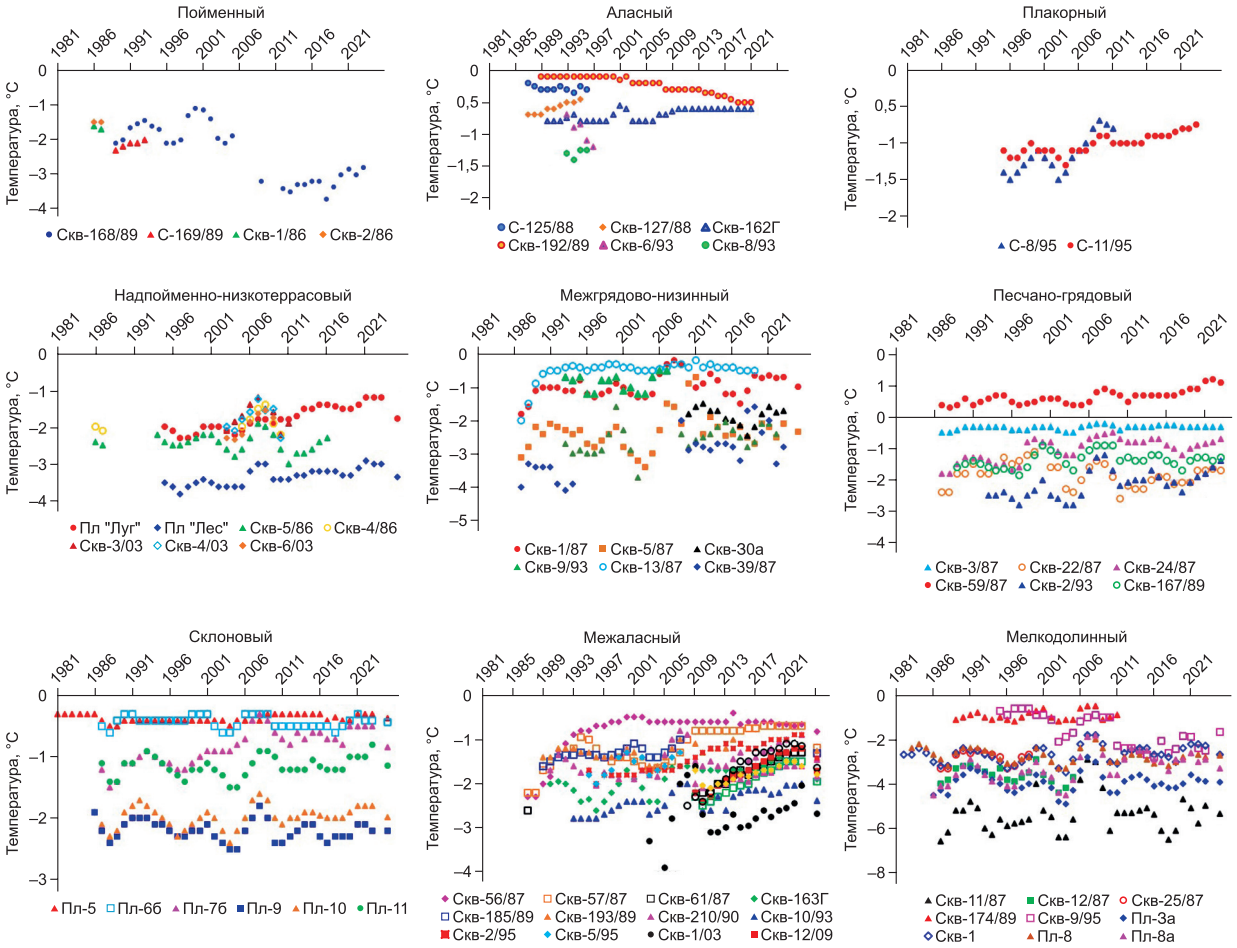

Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м по типам местности в Центральной Якутии

Fig. 1. Dynamics of the mean annual ground temperature at a depth of 10 m by terrain type in Central Yakutia

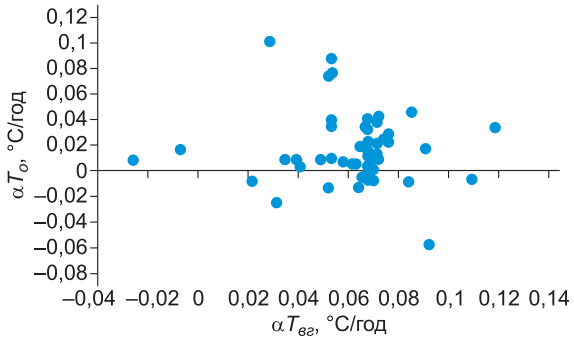

Рис. 2. Зависимость тренда температуры грунтов на глубине 10 м (αT_0, °С/год) и тренда среднегодовой температуры воздуха ($\alpha\Sigma T_{вг}$, °С/год)

Fig. 2. Dependence of the trend in ground temperature at a depth of 10 m (αT_0, °°С /year) and the trend of the mean annual air temperature ($\alpha\Sigma T_{вг}$, °С /year)

межгрядово-низинный – 2,7; межаласный – 3,5; аласный – 0,4; мелкодолинный – 3,7; склоновый – 1,1 и плакорный – 0,8 ºС (см. рис. 1).

Тренды среднегодовой температуры в слое годовых теплооборотов как показателя отклика на потепление климата (αT_0), в Центральной Якутии по типам местности распределены следующим образом: положительные – в межаласном (0,0086–0,1009 °С/год), в плакорном (0,0134–0,0428 °С/год); преимущественно положительные – в песчано-грядовом (–0,0069–0,0287 °С/год), в межгрядово-низинном (–0,0571–0,0176 °С/год), в мелкодолинном (–0,0246–0,0339 °С/год), в склоновом (–0,0028–0,0222 °С/год); отрицательные и положительные – в надпойменно-низкотеррасовом (–0,0087–0,0378 °С/год) и преимущественно отрицательные – в аласном (–0,0132–0,0342 °С/год). При этом отрицательные тренды часто встречаются в менее дренированных типах местности (аласном, мелкодолинном), приуроченных к отрицательным формах рельефа (табл. 5). Не выявлено четкой эмпирической зависимости

между трендами αT_0 и среднегодовой температурой воздуха ($\alpha T_{вг}$) (рис. 2).

Наибольшие значения мощности деятельного слоя присущи крупнодисперсным пескам. В то же время они характеризуются, в зависимости от поверхностных условий (растительного и напочвенного покровов) и изменчивости их свойств (влажности, теплопроводности), наибольшим диапазоном его изменения. За песками по изменчивости $\Delta\xi$ и значениям ξ последуют супеси, перекрытые песками, и суглинки, перекрытые супесями. Наименьшими значениями мощности деятельного слоя характеризуются торф (0,4–0,5 м) и минеральные грунты, перекрытые торфом (0,4–1,2 м). Мощность деятельного слоя в супесях и суглинках изменяется соответственно в пределах 1,3–2,5 и 0,9–2,0 м.

Пространственно-временная изменчивость мощности деятельного слоя (рис. 3) и межгодовая ее изменчивость (рис. 4) по девяти типам местности соответственно составляют: пойменный – 0,56 (0,56); надпойменно-низкотеррасовый – 0,47 (0,39); песчано-грядовый – 1,24 (1,18); межгрядово-низинный – 0,89 (0,76); межаласный – 1,25 (0,97); аласный – 0,98; мелкодолинный – 2,41 (1,03); склоновый – 2,59 (0,6) и плакорный – 1,30 (1,30) м (см. рис.3 и 4).

Преимущественно отрицательные тренды мощности деятельного слоя ($\alpha\xi$) характерны для дренированных песчано-грядового (–2,81–0,73 см/год) и склонового (–1,16–0,43 см/год) типов местности; преимущественно положительные – в надпойменно-низкотеррасовом (–0,19–0,32 см/год), в межгрядово-низинном (–2,72–0,60 см/год), в межаласном (–1,29–6,00 см/год), в мелкодолинном (–0,25–1,09 см/год). При этом зависимость между трендами мощности деятельного слоя ($\alpha\xi$, см/год) и суммы положительных среднемесячных температур воздуха ($\alpha\Sigma T_{вл}$, °С/сезон) в дренированных типах местности (песчано-грядовом, межаласном, плакорном и склоновом) имеет обратный характер. В недренированных (мелкодолинном, межгрядово-низинном, пойменном и надпойменно-низкотеррасовом) типах местности – прямой (см. рис. 4).

По данным многолетних наблюдений за тепловым состоянием грунтов естественных ландшафтов по типам местности по пунктам наблюдений рассчитаны: экстремумы и средние многолетние значения мощности деятельного слоя (ξ), среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м (T_o), их тренды (α) и термическая устойчивость ($K\alpha$) (см. табл. 5).

Таблица 4

Среднегодовые температуры грунтов (T_0) и пределы их изменчивости (ΔT_0) в зависимости от состава грунтов в сезоннопротаивающем слое [16]

Table 4

The mean annual ground temperatures (T_0) and the limits of their variability (ΔT_0), depending on their composition in the active layer [16]

Состав грунта	T_0, °С	ΔT_0, °С
Пески	–4,4…0,9	5,3
Пески, перекрытые супесями	–3,8…–1,1	2,7
Пески, перекрытые суглинками	–1,4	–
Пески, перекрытые торфом	–3,5…–0,1	3,4
Супеси	–3,8…–0,7	3,1
Супеси, перекрытые песками	–2,6…–0,1	2,5
Супеси, суглинки	–2,7…–0,8	1,9
Суглинки	–2,3…–0,2	2,1
Суглинки, перекрытые торфом	–6,4…–3,7	2,7
Торф	–4,5…–3,3	1,2

Отрицательные значения коэффициента $K\alpha$, встречающиеся в большинстве типов местности за исключением плакорного и межаласного, показывают охлаждение ММП, несмотря на потепление климата.

Положительные значения коэффициента $K\alpha$, превышающие 1,0, отмечаются, когда тренды повышения среднегодовой температуры грунтов равны и превышают тренды роста среднегодовой температуры воздуха. Это свидетельствует о деградации многолетнемерзлых пород.

Оценка изменений термического состояния грунтов деятельного слоя на открытых участках по данным метеостанций. По данным ряда метеостанций нами рассчитаны коэффициенты термической устойчивости грунтов на глубине 1,6 м (рис. 6). По наблюдаемым относительно однородным открытым площадкам $K\alpha$ изменяется в пределах от 01,23 до +3,0. Из рассматриваемых 15 метеостанций в семи грунты деятельного слоя относятся к деградируемым (неустойчивым) грунтам. Из этих семи метеостанций в четырех наблюдаемые площадки переносились. К грунтам с высокой термической устойчивостью относятся почвогрунты метеостанций Исить, Намцы, Охотский Перевоз и Якутск. Средней термической устойчивостью грунтов характеризуются площадки метеостанций Пок-

Таблица 5

Экстремумы и средние многолетние значения мощности деятельного слоя (ξ), среднегодовой температуры грунтов на глубине 10 м (T_0), их тренды (α) и термическая устойчивость ($K\alpha$) мерзлых толщ по типам местности

Table 5

Extremes and long-term average values of active layer thickness (ALT) (ξ), mean annual ground temperature at a depth of 10 m (T_0), their trends (α), and the thermal stability ($K\alpha$) of permafrost by terrain types

Номер скважины или площадки	Период наблюдений	Межгодовая изменчивость		Тренды: $\alpha\xi$ и αT_o		Термическая устойчивость мерзлых толщ
		ξ, м	T_o, °C	$\alpha\xi$, см/год	αT_o, °C/год	$K\alpha = \alpha T_0/\alpha T_{вг}$
Надпойменно-низкотеррасовый						
Пл «Луг»	1995–2023	1,82–1,97 1,87 (27)	–2,3…–1,2 –1,77 (29)	0,32	0,0378	0,53
Пл «Лес»	1995–2023	1,70–1,90 1,84 (27)	–3,8…–2,9 –3,33 (29)	0,07	0,0213	0,30
Скв-5/86	1994–2016, 1986–2016	1,66–2,05 1,92 (25)	–3,0…–1,9 –2,42 (22)	–0,19	–0,0087 –0,0049	–0,10 –0,07
Песчано-грядовый						
Скв-3/87	1987–2023	3,48 –	–0,5…–0,2 –0,33 (37)	–	0,0032	0,05
Скв-22/87	1987–2023	1,64–2,50 1,85 (16)	–2,6…–0,9 –1,82 (37)	–2,29	–0,0069	–0,10
Скв-24/87	1987–2023	1,80–3,08 2,41 (15)	–1,8…–0,5 –1,04 (37)	–2,81	0,0234	0,35
Скв-59/87	1987–2023	–	0,3…1,2 0,65 (37)	–	0,0155	0,23
Скв-167/89	1989–2023	1,50–1,96 1,73 (16)	–1,9…–0,9 –1,37 (34)	0,73	0,0069	0,12
Скв-2/93	1993–2023	1,14–1,80 1,48 (12)	–2,8…–1,2 –2,13 (31)	–1,62	0,0287	0,38
Межгрядово-низинный						
Скв-1/87	1987–2023	0,85–1,61 1,23 (19)	–1,8…–0,2 –0,98 (37)	0,48	0,0143	0,21
Скв-5/87	1987–2023	0,40–1,17 0,75 (19)	–3,4…–0,7 –2,34 (37)	0,03	0,122	0,18
Скв-39/87	1987–1994, 2009–2023	0,31–1,15 0,75 (21)	–4,1…–3,3 –3,67 (8) –3,3…–1,6 –2,56 (15)	0,60	–0,0571 0,0096	0,62 0,10
Скв-9/93	1993–2003, 2009–2022	– 0,90–1,15 1,03 (14)	–3,7…–1,6 –2,76 (11) –2,8…–2,1 –2,41 (14)	– –1,04	0,0055 0,0176	0,09 0,19
Скв-30а	2010–2023	0,94–1,35 1,13 (15)	–2,5…–1,5 –1,85 (14)	–2,72	–0,0139	–0,27
Скв-14/93	1993–2007	0,78	–1,2…–0,5 –0,87 (15)	–	0,0089	0,25
Аласный						
Скв-125/87	1987–1996	2,00	–0,35…–0,2 –0,28 (10)	–	–0,0067	–0,06
Скв-127/87	1987–1995	2,86	–0,7…–0,45 –0,59 (9)	–	0,0342	0,29

Продолжение таблицы 5

Номер скважины или площадки	Период наблюдений	Межгодовая изменчивость		Тренды: $\alpha\xi$ и αT_o		Термическая устойчивость мерзлых толщ
		ξ, м	T_o, ºС	$\alpha\xi$, см/год	αT_o, ºС/год	$K\alpha = \alpha T_0/\alpha T_{вг}$
Скв-192/89	1989–2008, 1989–2020	1,84–1,92	–0,5…–01 –0,20 (26)	–	–0,0079 –0,0132	–0,36 –0,21
Скв-162/89	1990–2021, 1990–2008	1,88–2,15	–0,8…–0,6 –0,72 (25)	–	0,0073 0,0037	0,11 0,09
Межаласный						
Скв-57/87	1987–2023	1,33–1,83 1,57 (17)	–2,2…–0,7 –1,18 (37)	0,07	0,0321	0,47
Скв-61/87	2010–2023, 1987–2023	1,12–1,77 1,44 (11)	–2,2…–1,3 –1,76 (15)	0,51	0,0739 0,0400	1,42 0,59
Скв-163/89	1990–2020	1,27–2,03 1,70 (5)	–2,6…–1,4 –1,90 (31)	0,98	0,0249	0,34
Скв-185/89	1989–2007	1,98	–1,6…–1,0 –1,32 (19)	–	0,0167	2,39
Скв-193/89	1989–2016	1,13–1,81 1,63 (8)	–1,6…–0,9 –1,27 (28)	–1,29	0,0086	0,18
Скв-210/90	1990–2023	1,53–1,83 1,65 (17)	–2,1…–0,8 –1,46 (34)	–0,23	0,0186	0,29
Скв-10/93	1993–2023	1,25–1,86 1,55 (17)	–2,8…–2,0 –2,39 (31)	–0,39	0,0228	0,30
Скв-2/95	1995–2023	1,24–1,90 1,51 (8)	–2,0…–0,9 –1,42 (29)	1,25	0,0382	0,54
Скв-1/03	2003–2023	1,01–2,00 1,28 (19)	–5,1…–2,1 –2,80 (21)	–2,78	0,0456	0,54
Скв-28/08	2008–2023	0,78–1,75 1,34 (14)	–2,5…–1,1 –1,65 (16)	6,00	0,1009	3,54
Скв-12/09	2009–2023	0,82–1,43 1,12 (17)	–2,4…–1,2 –1,71 (15)	3,00	0,0875	1,64
Скв-17/09	2009–2023	0,77–1,42 1,02 (17)	–2,5…–1,5 –1,95 (15)	2,66	0,0761	1,43
Скв-39/09	2009–2023	0,68–1,31 1,04 (16)	–2,1…–1,6 –1,84 (15)	2,42	0,0395	074
Скв-40/09	2009–2023	0,73–1,41 1,20 (15)	–2,1…–1,5 –1,78 (15)	3,61	0,0355	0,67
Пойменный						
Скв-168/89	1989–2005, 2009–2023	1,40–1,96 1,66 (10) –	–2,1…–1,1 –1,71 (17) –3,5…–2,8 –2,22 (12)	–1,11 –	0,0085 0,0347	–0,33 0,65
Мелкодолинный						
Скв-1/82	1982–2023	0,81–1,30 1,06 (43)	–3,5…–1,8 –2,67(42)	0,12	0,0091	0,13
Пл 8	1983–2023	0,86–1,37 1,17 (41)	–3,3…–1,9 –2,74 (41)	0,20	–0,0071	–0,10
Пл 3а	1986–2023	0,37–0,53 0,47 (37)	–4,9…–2,8 –3,94 (38)	0,29	0,0031	0,05
Пл 8а	1986–2023	0,65–1,45 1,02 (37)	–3,6…–1,8 –3,29 (38)	–0,25	0,0339	0,50
Скв-11/87	1987–2023	0,47–1,50 0,68 (22)	–6,6…–2,9 –5,35 (37)	–012	0,0113	0,17

Окончание таблицы 5

Номер скважины или площадки	Период наблюдений	Межгодовая изменчивость		Тренды: $\alpha\xi$ и αT_o		Термическая устойчивость мерзлых толщ
		ξ, м	T_o, ºС	$\alpha\xi$, см/год	αT_o, ºС/год	$K\alpha = \alpha T_0/\alpha T_{вг}$
Скв-12/87	1987–2005	0,88–1,35 1,12 (6)	–4,4…–2,9 –3,62 (19)	1,09	–0,0246	–0,78
Скв-25/87	1987–1999	1,05–1,24 1,12 (3)	–3,3…–2,5 –2,85 (13)	–	0,0060	0,10
Скв-174/89	1989–2011	2,78 –	–1,2…–0,5 –0,93 (23)	–	0,0089	0,23
Плакорный						
Скв-8/95	1995–2011	1,45 –	–1,5…–0,7 –1,16 (17)	–	0,0428	0,59
Скв-11/95	1995–2023	1,35–2,65 1,90 (16)	–1,3…–0,7 –1,01 (29)	3,42	0,0134	0,19
Склоновый						
Пл 5	1981–2023	3,26–3,86 3,50 (42)	–0,5…–0,3 –0,37 (43)	–0,60	0,0010	0,01
Пл 6б	1987–2023	3,54–4,11 3,76 (38)	–0,6…–03 –0,43 (37)	–1,16	–0,0015	–0,02
Пл 7б	1987–2023	1,70–2,00 1,88 (38)	–1,5…–0,3 –0,84 (37)	0,18	0,0222	0,33
Пл 9	1986–2023	1,31–1,72 1,52 (39)	–2,5…–1,8 –2,20 (38)	–0,11	–0,0028	–0,04
Пл 10	1987–2023	1,63–2,18 1,93 (39)	–2,4…–1,6 –1,98 (37)	0,43	0,0049	0,07
Пл 11	1987–2023	1,73–2,27 1,90 (39)	–1,5…–0,8 –1,15 (37)	–0,21	0,0047	0,07

Примечание. В числителе – экстремумы, в знаменателе – средние многолетние значения, в скобках – количество рядов наблюдений (лет).

Note. The numerator represents the extremes, the denominator shows the long-term average values, and the number of observation series (years) is indicated in parentheses.

ровск (переносилась) и Сангар. На площадках Амга и Крест-Хальджай грунты деятельного слоя отмечаются понижением температуры, т. е. охлаждающим эффектом. Отметим, что данные метеостанций Бердигестях, Верхневилюйск, Тонгулах, Чурапча и Ытык-Кюель по температуре грунтов на глубине 1,6 м подтверждают существенное повышение температуры грунтов деятельного слоя.

Интересно сравнение коэффициентов термической устойчивости грунтов на подошве деятельного слоя и на разных глубинах (3 и 10 м) слоя годовых теплооборотов по данным стационаров «Туймаада» и «Чабыда» за длительный период наблюдений, соответственно 29 и 39–43 года (табл. 7).

На стационаре «Туймаада» на открытых луговых комплексах супесчано-песчаные грунты на подошве деятельного слоя (1,8–2,0 м) отличаются слабой термической устойчивостью ($K\alpha$ = 0,98), постепенно переходя в среднеустойчивое состояние на глубине 10 м ($K\alpha$ = 0,60). В лесных комплексах в этих же типах грунтов термическое состояние на подошве деятельного слоя (аналогичная глубина) с среднеустойчивого ($K\alpha$ = 0,68) переходит на глубине 10 м в высокоустойчивое ($K\alpha$ = 0,35).

На территории стационара «Чабыда» литогенная основа природных комплексов, представленная песчаными отложениями, на подошве деятельного слоя характеризуется стабильно высокой термической устойчивостью. Здесь исключение составляют участки со средней термической устойчивостью расположенные в низинах, часто затапливаемых талыми водами (см. табл. 7, Пл-8а), и участки с отрицательной термической устойчи-

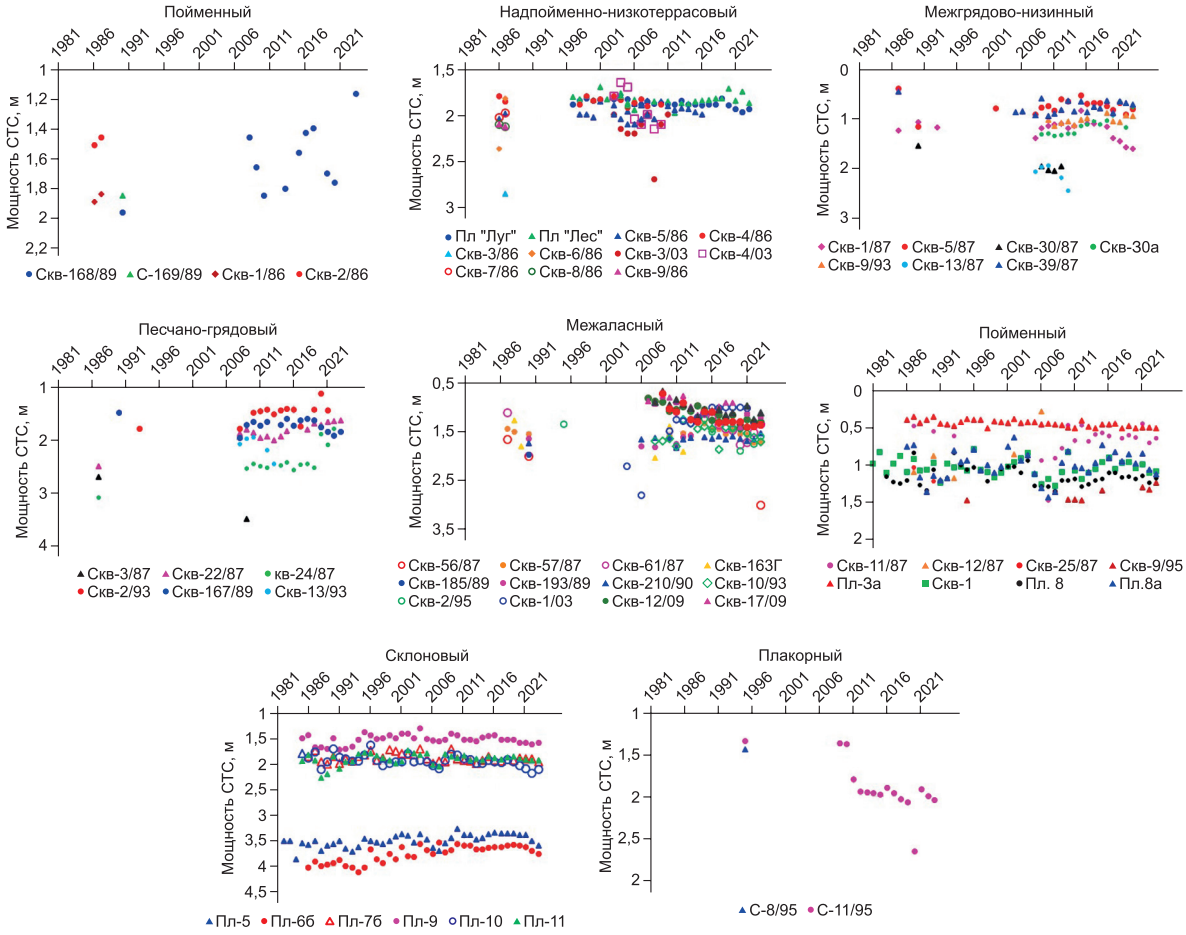

Рис. 3. Динамика мощности деятельного слоя по типам местности в Центральной Якутии

Fig. 3. Dynamics of active layer thickness by terrain type in Central Yakutia

востью ($K\alpha$ = –0,11) расположенные на приводораздельных склонах с брусничным лиственничником, где с потеплением климата происходит увеличение биомассы и соответственно повышение затеняющей роли леса (см. табл. 7, Пл-9). В слое годовых теплооборотов на глубине 3 м $K\alpha$ стабильно высокий на всех площадках, за исключением площадки 8а. На глубине 10 м в условиях потепления климата (44-летний период) грунты характеризуются высокой термической устойчивостью. На некоторых площадках (см. табл. 7, площадки 8, 6б и 9) $K\alpha$ даже имеют отрицательные значения.

Заключение

Для рассматриваемого региона количественно оценена реакция теплового состояния верхних горизонтов ММП на современное потепление климата, определяемого совокупным влиянием повышения температуры воздуха и основных параметров мерзлотных ландшафтов (растительного, напочвенного и снежного покровов, состава отложений).

Несмотря на существенное потепление современного климата Центральной Якутии, динамика термического состояния многолетнемерзлых пород в естественных ландшафтах имеет разнонаправленную тенденцию, объясняемую в основном большой межгодовой изменчивостью режима снегонакопления и увеличением биомассы ландшафтов. В годы значительного уменьшения мощности снежного покрова (особенно в начальный период его формирования) происходит переохлаждение грунтовой толщи, что нивелирует общую тенденцию к потеплению.

Последние десятилетия реакция температуры грунтов, в зависимости от ландшафтных условий, характеризуется преимущественно высокой

Таблица 6

Термическая устойчивость почвы на глубине 1,6 м по данным метеостанций для разных периодов

Table 6

Thermal stability of soil at a depth of 1.6 m according to weather station data over various time periods

Метеостанция	Коэффициент термической устойчивости ($K\alpha = \alpha T_{1,6}/\alpha T_{в2}$)					
	Период	$K\alpha$	Период	$K\alpha$	Период	$K\alpha$
Амга	1966–2006	–0,41	1966–1988	–1,23	1989–2006	–0,08
Бердигестях	1965–1994	1,93	1966–1988	3.00	–	–
Верхневилюйск	1958–1997	1,06	1966–1988	1,76	–	–
Вилюйск	1964–2023	0,08	1966–1988	2,62	1989–2023	–0,09
Исить	1957–1997	0,09	1966–1988	0,40	–	–
Крест-Хальджай	1961–1989	–1,24	1966–1988	–0,81	–	–
Намцы	1966–1996	0,58	1966–1988	0,46	–	–
Олекминск	1966–2023	0,45	1966–1988	1,47	1989–2023	1,17
Охотский Перевоз	1956–2007	0,27	1966–1988	0,33	–	–
Покровск	1931–1996	2,48	1966–1988	0,75	–	–
Сангар	1964–1997	0,81	1966–1988	0,54	–	–
Тонгулах	1964–1988	1,59	1966–1988	1,48	–	–
Чурапча	1959–1996	1,89	1966–1988	1,38	–	–
Ытык-Кюель	1958–1990	1,63	1966–1988	1,44	–	–
Якутск	1965–2023	0,51	1966–1988	0,37	1989–2023	0,47

Примечание. Метеостанции, где был перенос местоположения: Амга (1968 г.), Бердигестях (1977 г.), Покровск (2001 г.), Тонгулах (1971 г.), Чурапча (1967, 2000 гг.), Ытык-Кюель (1967, 1986, 1994 гг.).

Note. The meteorological stations that underwent location changes are as follows: Amga (1968), Berdigestyakh (1977), Pokrovsk (2001), Tongulakh (1971), Churapcha (1967 and 2000), and Ytyk-Kyuyel (1967, 1986, and 1994).

Таблица 7

Термическая устойчивость почвы на подошве деятельного слоя (ξ) и грунтов на глубинах 3 и 10 м по данным стационаров «Туймаада» и «Чабыда»

Table 7

Thermal stability of the soil at the bottom of the active layer (ξ) and of the ground at depths of 3 m and 10 m, according to data from the Tuymaada and Chabyda stations

Площадка	Период наблюдений	Коэффициент термической устойчивости $K\alpha = \alpha T_г/\alpha T_в$		
		на подошве ξ	на глубине 3 м	на глубине 10 м
Стационар «Туймаада»				
Пл-«Луг»	1995/96–2023/24	0,98	0,92	0,60
Пл-«Лес»	1995/96–2023/24	0,68	0,55	0,35
Стационар «Чабыда»				
Скв-1	1981/82–2023/24	0,13	0,16	0,14
Пл-3а	1986/87–2023/24	0,43	0,13	0,03
Пл-8а	1986/87–2023/24	0,70	0,58	0,50
Пл-8	1982/83–2023/24	0,14	0,04	–0,10
Пл-5	1981/82–2023/24	0,07	0,12	0,02
Пл-6б	1986/87–2023/24	0,01	0,12	–0,02
Пл-7б	1986/87–2023/24	0,15	0,19	0,19
Пл-9	1985/86–2023/24	–0,11	0,08	–0,04
Пл-10	1986/87–2023/24	0,19	0,17	0,08
Пл-11	1986/87–2023/24	0,17	0,02	0,08

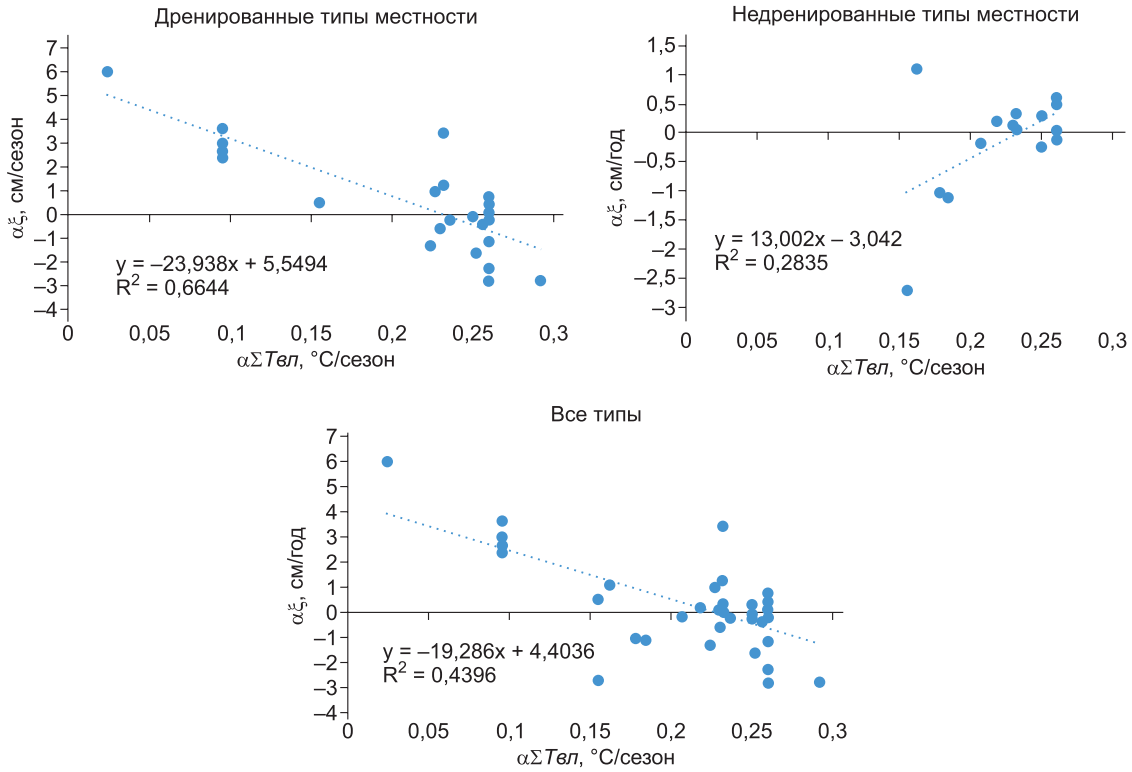

Рис. 4. Зависимость тренда мощности деятельного слоя (αξ, см/год) и тренда суммы положительных месячных температур воздуха ($\alpha\Sigma T_{вл}$, °C/сезон) в дренированных, недренированных и целом во всех типах местности

Fig. 4. Dependence of the trend in the active layer thickness (αξ, cm/year) and the trend in the sum of positive monthly air temperatures ($\alpha\Sigma T_{вл}$, °C/ season) in drained, undrained, and overall terrain types

и средней термической устойчивостью. Однако на локальных участках наблюдаются как аградационные, так и деградационные процессы. Понижение температуры грунтов в основном связано с режимом снегонакопления и увеличением биомассы природных комплексов, приуроченных к отрицательным формам рельефа. Наиболее интенсивно выраженная деградация мерзлых толщ (интенсивные просадки поверхности) отмечается на участках с близко залегающими подземными льдами, где происходит активизация термокарста.

Мощность деятельного слоя в естественных ландшафтах является преимущественно достаточно стабильной величиной и характеризуется малой межгодовой изменчивостью. Тенденция возрастания мощности деятельного слоя статистически незначимая. В то же время локально встречаются участки со значимой тенденцией как возрастания, так и уменьшения его мощности, связанные с теми же факторами, что и температура пород.

Критерии устойчивости мерзлотных ландшафтов, впервые приводимые в работе, несомненно будут использоваться при картировании и прогнозе состояния природной среды.

Список литературы / References

1. Мельников П.И. Задачи охраны окружающей среды и освоения области многолетнемерзлых пород. *Вестник Академии наук СССР*. 1976;(10):37–45.

Melnikov P.I. Tasks of environmental protection and development of the permafrost area. *Herald of the USSR Academy of Sciences*. 1976;(10):37–45. (In Russ.)

2. Berger T.R. *Northern frontier, northern homeland: the report of the Mackenzie Valley Pipeline Inquiry. V. 1.* Ottawa: Supply and Services Canada; 1977. 213 p.

3. Berger T.R. *Northern frontier, northern homeland. Report of the Mackenzie Valley Pipeline Inquiry. V. 2.* Ottawa: Supply and Services Canada; 1977. 268 p.

4. Eedy W. *Environmental cause/effect phenomena relating to technological development in the Canadian Arctic*. Ottawa: National Research Council of Canada, NRC Associate Committee on Scientific Criteria for Environmental Quality; 1974. 125 p.

5. Браун Дж., Граве Н.А. *Нарушение поверхности и ее защита при освоении Севера*. Новосибирск: Наука; 1981. 88 с.

Brown J., Grave N.A. *Surface disturbance and its protection during the development of the North*. Novosibirsk: Nauka; 1981. 88 p. (In Russ.)

6. Павлов А.В. *Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР*. Якутск: Кн. изд-во; 1975. 302 с.

Pavlov A.V. *Heat exchange between soil and atmosphere in high and mid-latitudes of the USSR.* Yakutsk: Knizhnoe izdatel'stvo; 1975. 302 p. (In Russ.)

7. Павлов А.В. *Теплофизика ландшафтов*. Новосибирск: Наука; 1979. 285 с.

Pavlov A.V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 285 p. (In Russ.)

8. Фельдман Г.М. *Методы расчета температурного режима мерзлых грунтов*. М.: Наука; 1973. 251 с.

Feldman G.M. *Methods for calculating the temperature regime of frozen soils*. Moscow: Nauka; 1973. 251 p. (In Russ.)

9. Rosswall T., Heal O.W. Structure and function of tundra ecosystems. *Ecological Bulletins N. 20*, Stockholm: Swedish Natural Science Research Council; 1975. 450 p.

10. Фельдман Г.М. *Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов.* Новосибирск: Наука; 1977. 191 с.

Feldman G.M. *Forecast of soil temperature regime and development of cryogenic processes.* Novosibirsk: Nauka; 1977. 191 p. (In Russ.)

11. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. *Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз*. М.: Недра; 1980. 384 с.

Grechishchev S.E., Chistotinov L.V., Shur Yu.L. *Cryogenic physico-geological processes and their forecast*. Moscow: Nedra; 1980. 384 p. (In Russ.)

12. Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Шендер Н.И., Гаврильев Р.И. *Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии*. Якутск: Ин-т 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.)

13. Будыко М.И., Гройсман П.Я. Потепление 80-х годов. *Метеорология и гидрология*. 1989;(3):5–10.

Budyko M.I., Groisman P.Ya. The warming of the 80s. *Russian Meteorology and Hydrology.* 1989;(3):5–10. (In Russ.)

14. Кондратьев К.Я. *Глобальный климат*. СПб.: Наука; 1992. 359 с.

Kondratiev K.Ya. *Global climate*. St. Petersburg: Nauka; 1992. 359 p. (In Russ.)

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

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Scryabin P.N. *Ground temperature regime in permafrost landscapes of Central Yakutia*. Yakutsk: Publishing House of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2002. 218 p. (In Russ.)

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

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

17. Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата. *Криосфера Земли*. 2011;15(4):33–36.

Malkova G.V., Pavlov A.V., Skachkov Yu.B. Assessment of the stability of frozen strata under modern climate changes. *Earth's Cryosphere*. 2011;15(4):33–36. (In Russ.)

18. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. *Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2021. 155 с.

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. *Monitoring of the thermal regime of soils in Central Yakutia*. Yakutsk: Publishing House of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021. (In Russ.)

19. Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D., et al. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North. *Polar Geography*. 2021;44(3):203–216. https://doi.org/10.1080/1088937X.2021.1981476

20. Васильев А.Н., Облогов Г.Е., Широков Р.С. Долговременный мониторинг глубины сезонного протаивания пород в типичных тундрах Западного Ямала. *Криосфера Земли*. 2023;27(4):3–13. https://doi.org/10.15372/KZ20230401

Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Shirokov R.S. Long-term monitoring of the active layer thickness in typical tundras of the Western Yamal. *Earth's Cryosphere*. 2023;27(4):3–13. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/KZ20230401

21. Fedorov A.N., Konstantinov P.Y., Vasilyev N.F., et al. Climate and Permafrost Shifts in Yakutia's Arctic and Subarctic from 1965 to 2023. *Land.* 2024;13(12):2150. https://doi.org/10.3390/land13122150

22. Shan W., Qiu L., Guo Y., et al. Long-term changes in the permafrost temperature and surface frost number in Northeast China. *Atmosphere*. 2024;15(6):652.

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, SPIN: 8889-6227, e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

СКАЧКОВ Юрий Борисович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-5602-8956, Scopus AuthorID: 15120142400, SPIN: 8720-7082, e-mail: ubskachkov@mpi.ysn.ru

ФЕДОРОВ Александр Николаевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по науке, https://orcid.org/0000-0002-4016-2149, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus AuthorID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru

Вклад авторов

Варламов С.П. – разработка концепции, методология, проведение исследования, создание черновика и редактирование рукописи; **Скачков Ю.Б.** – методология, проведение исследования, создание черновика и редактирование рукописи; **Федоров А.Н.** – методология, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

VARLAMOV, Stepan Prokopievich, Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher, https://orcid.org/0000-0003-2021-9686, ResearcherID: V-9370-2018, Scopus AuthorID: 22958732100, SPIN: 8889-6227, e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

SKACHKOV, Yuri Borisovich, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, https://orcid.org/0000-0002-5602-8956, Scopus AuthorID: 63431, SPIN: 8720-7082, e-mail: ubskachkov@mpi.ysn.ru

FEDOROV, Alexandr Nikolaevich, Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher, Deputy Director for Science, https://orcid.org/0000-0002-4016-2149, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus AuthorID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: anfedorov@mpi.ysn.ru

Authors' contribution

Varlamov S.P. – conceptualization, methodology, investigation, writing – original draft, writing – review & editing; **Skachkov Yu.B.** – methodology, investigation, writing – original draft, writing – review & editing; **Fedorov A.N.** – methodology, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 15.04.2025
Поступила после рецензирования / Revised 30.07.2025
Принята к публикации / Accepted 12.08.2025