



Оригинальная статья

Изменение геокриологических условий межаласий Центральной Якутии при прогнозируемом потеплении климата

В. А. Новоприезжая✉, А. Н. Федоров

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

✉schwarz999@mail.ru

Аннотация

В Центральной Якутии широко распространен ледовый комплекс, приуроченный к межаласному типу местности, формирование которого произошло в плейстоцене. В условиях глобального потепления климата актуально изучение реакции и устойчивости мерзлотных ландшафтов к климатическим изменениям в будущем. При нарушении условий теплообмена происходят разрушительные криогенные процессы, такие как термокарст и термоэрозия, в особенности при техногенных воздействиях. На территории исследования распространены аласы, образовавшиеся в основном в голоценовом оптимуме при протаивании ледового комплекса. Для составления прогнозных моделей и карты распространения температур грунтов при прогнозируемом потеплении климата проанализированы климатические данные семи метеостанций и теплофизические характеристики пород типичного для исследуемого района криолитологического разреза межаласья, произведена верификация моделей. Исследуемая область – хорошо дренируемые приводораздельные пространства лесных межаласий. Результаты моделирования отражают динамику температур и глубины протаивания ледового комплекса при потеплении климата по известным климатическим сценариям: при повышении средней годовой температуры воздуха на +2 °C/100 лет, +3 °C/100 лет, +4 °C/100 лет с учетом увеличения снежного покрова на 10 и 30 %, также без учета изменения количества осадков. По результатам моделирования, протаивание ледового комплекса может начаться при повышении средней годовой температуры воздуха на 4 °C с неизменным количеством осадков, при повышении на 3 °C с увеличением осадков на 10 % и при повышении на 2 °C с увеличением осадков на 30 %. Выделены два типа территорий по устойчивости к протаиванию ледового комплекса при климатических изменениях: неустойчивые и устойчивые. На участках неустойчивого типа протаивание ледового комплекса может начаться при увеличении средней годовой температуры воздуха на +3 °C.

Ключевые слова: межаласье, многолетнемерзлые грунты, ледовый комплекс, прогноз, моделирование, изменение климата

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта СО РАН «Криогенные процессы и формирование природных рисков освоения мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (№ 122011400152-7).

Для цитирования: Новоприезжая В.А., Федоров А.Н. Изменение геокриологических условий межаласий Центральной Якутии при прогнозируемом потеплении климата. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):73–84. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-73-84>

Original article

Changes in geocryological conditions in interalas terrain under predicted climate warming, Central Yakutia

Varvara A. Novopriezzhaia✉, Alexander N. Fedorov

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

✉schwarz999@mail.ru

Abstract

Central Yakutia is distinguished by the widespread presence of highly ice-rich permafrost dating back to the Pleistocene epoch, commonly known as the Ice Complex. In the context of global climate warming, it is essential to evaluate the sensitivity and response of permafrost-dominated landscapes to projected climatic changes. The Ice Complex

sediments are primarily found in the interalas terrain type. Disruptions to the surface energy balance, particularly those associated with human activities, often lead to destructive cryogenic processes, such as thermokarst and thermal erosion. Alases are prevalent in the region, most of which formed during the Holocene Optimum as a result of the thawing of the Ice Complex. In this study, we analyzed climatic data from weather stations and the thermophysical characteristics of soil samples collected from interalas sites to develop predictive models and compile maps of future soil temperatures under projected climate warming scenarios. Moreover, we conducted model verification. The simulations were based on climatic data from seven meteorological stations and a cryolithological profile representative of the interalas terrain. The study area is a well-drained, forest-covered upland. The simulation results project the dynamics of ground temperatures and active layer thickness in the Ice Complex under three climate warming scenarios for the year 2100: an increase of +2 °C, +3 °C, and +4 °C per century, along with increases in snow cover of 10% and 30%, with no change in precipitation. The findings indicate that thawing of the Ice Complex will commence at a warming of 4 °C with no change in precipitation, at 3 °C with a 10% increase in precipitation, and at 2 °C with a 30% increase in precipitation. Additionally, we classified the terrain into two categories based on susceptibility to Ice Complex degradation due to climate change: unstable and stable. In unstable areas, thawing of the Ice Complex is projected to begin with a +3°C increase in mean annual air temperature.

Keywords: interalas terrain, permafrost, ice complex, prediction, modeling, climate change

Funding. This study was conducted within the framework of the SB RAS project “Cryogenic processes and the formation of natural risks in the development of permafrost landscapes in Eastern Siberia” (No. 122011400152-7).

For citation: Novopriyazhaya V.A., Fedorov A.N. Changes in geocryological conditions in interalas terrain under predicted climate warming, Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):73–84. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-73-84>

Введение

Центральная Якутия представляет собой самую густонаселенную часть Республики Саха (Якутия). В районе сосредоточены многие важные центры промышленности и половина посевных площадей республики. Район находится в зоне сплошного распространения мерзлоты. По карте льдистости поверхностных отложений, в регионе развиты сильнольдистые грунты (объемная льдистость 0,40–0,60 д. ед.) [1], мощность ледового комплекса изменяется от 2–5 до 20–40 м, местами до 70 м [2, 3]. На территории исследования развиты аласы, представляющие собой замкнутые термокарстовые котловины, образовавшиеся в основном в голоцене при вытаивании подземных льдов и просадке грунтов межаласья. В настоящее время в Центральной Якутии аласами местами занято до 20 % всей площади [4]. На межаласье преобладают лиственничные леса с мохово-брусничным покровом.

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения устойчивости ледового комплекса и инженерных сооружений, расположенных в зоне их распространения, при современном потеплении климата. Под устойчивостью ландшафтов мы понимаем свойство сохранять свое состояние при внешнем воздействии, т. е. противостоять активизации экзогенных процессов и возвращаться в первоначальное состояние. С 1980-х годов наблюдается постоянное повышение средней годовой температуры воздуха Центральной Якутии. В настоящее время на нару-

шенных территориях и на безлесных участках в зоне средней тайги наблюдается образование просадочных термокарстовых форм рельефа. Также частыми явлениями становятся аварийные состояния линейных и площадных инженерных сооружений, что связано с деформациями грунтового основания при протаивании льдистых пород и снижением несущей способности грунтов, в первую очередь обусловленными изменением геокриологических условий, увеличением глубины сезонного протаивания и повышением температуры грунтов ледового комплекса, что безусловно влияет на инфраструктуру Центральной Якутии. Чуткий отклик мерзлоты на антропогенные нарушения и потепление климата предполагает постановку вопроса детального изучения устойчивости ледового комплекса. При деградации вечной мерзлоты парниковые газы, которые содержатся в плейстоценовых сильнольдистых породах, высвобождаясь в атмосферу, могут принести дополнительный вклад в потепление климата [5]. В последние годы потепление происходит за счет увеличения продолжительности периода положительных температур. Исследователи отмечают, что при теплом лете происходит более глубокое сезонное протаивание, а при холодном – соответственно глубина протаивания невелика [6, 7]. На основании анализа массива данных температур воздуха Центральной Якутии можно сказать, что средние месячные летние температуры практически не меняются, иногда наблюдаются превышения

июньских температур воздуха. Тепловое состояние ледового комплекса меняется только при многолетней тенденции повышения температур воздуха. Ранее авторами было произведено моделирование по теплым периодам в голоцене, которое показало, что климатические изменения в голоцене не являются прямой причиной возникновения аласов и образование последних обусловлено потеплением климата с дополнительными факторами [8].

Материалы и методы исследования

Тренд повышения средней годовой температуры воздуха в Центральной Якутии составляет 0,02–0,03 °C/год [9]. По предположениям М.И. Будыко [10] и М.К. Гавриловой [11], повышение средней годовой температуры воздуха в середине XXI века для Центральной Якутии и Сибири составит 1–4 °C. По мнению Климанова А.А. [12], повышение средней годовой температуры воздуха на этот период составит 1,5–4,5 °C. Годовое количество осадков в Сибири по сравнению с современными может увеличиться на 10–20 % [10]. Повышения средних годовых температур воздуха по сценариям семейства RCP (Representative Concentration Pathways) основаны на концентрации парниковых газов в атмосфере к 2100 году, где по RCP 2.6 повышение средней годовой температуры воздуха составит 0,2–1,8 °C, RCP 4.5 – 1,0–2,6, RCP 6.0 – 1,3–3,2, RCP 8.5 – 2,6–4,8 °C.

Моделирование производилось программным обеспечением для теплотехнических расчетов QFrost, произведенным на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ, и Frost 3d – продуктом ООО «Симмейкерс», Беларусь и основано на решении одномерной задачи Стефана. Климатическое воздействие в моделях учитывалось через средние месячные и годовые температуры воздуха, средние месячные мощности и плотности снежного покрова, приведенные в научно-прикладном справочнике [13]. Высота и плотность снежного покрова пересчитаны в среднемесечные по среднедекадным значениям (рис. 1), по температурам воздуха произведена выборка характерных средних месячных температур по метеостанциям по общедоступным данным с сайта meteo.ru [14], по скорости ветра определен коэффициент теплообмена приземного воздуха на основе данных справочника [13]. Типичный литологический разрез сложен в верхней части покровными супесями и суглинками

до глубины 2,1–2,2 м, ниже вскрываются сильнольдистые грунты и повторно-жильные льды до глубины 15 м. Для каждого слоя были в зависимости от его плотности и влажности подобраны теплофизические характеристики: теплопроводность и теплоемкость в талом и мерзлом состояниях, теплота фазовых переходов, температура замерзания грунта. Современная температура грунтов межаласий Центральной Якутии около –2...–3 °C, глубина протаивания составляет 1,2–1,6 м.

Прогноз геокриологических условий производился до 2100 г., так как в основном циклы похолодания-потеплений прослеживались в голоцене продолжительностью 50–200 лет [12]. По Мельникову Е.С. [15], сильные дожди в середине лета способствует оттаиванию через конвективное потепление проницаемых почв, тогда как осенние дожди являются охлаждающим фактором, который подавляет сезонное оттаивание в течение следующего лета путем увеличения содержания льда в сезонно-талом слое. Однако влияние летних осадков относительно температуры грунтов незначительно в силу высокой инсоляции, характерной для Якутии [16], и не играет большую роль при долгосрочном прогнозе, потому что при моделировании летние осадки не учитывались. Основываясь на предположении М.И. Будыко [10] об увеличении осадков до 20 % и палеорекострукции Андреева А.А. [17] с увеличением осадков до 30 % в периоды потеплений голоцена, прогноз производился с учетом приращения по высоте снежного покрова на 10 и 30 %.

В силу того, что с 1980-х годов в Центральной Якутии наблюдается значимый тренд на потепление климата, то исходным годом начала моделирования был взят 1980-й. Это позволит верифицировать динамику изменения температур грунтов на настоящий момент времени. Для верификации прогноза были сопоставлены фактические и прогнозные расчеты на 2020 г. по данным мониторинговых полигонов Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН Юкэчи и Умайбыт. Расчетные модели показали сходимость с замеренными температурами грунтов и глубинами сезонного оттаивания [18].

Результаты и обсуждение

При тренде в +2 °C/100 лет протаивание кровли подземного льда, который вскрывается на глубине 2,1 м, происходит в Верхоянском Пере-

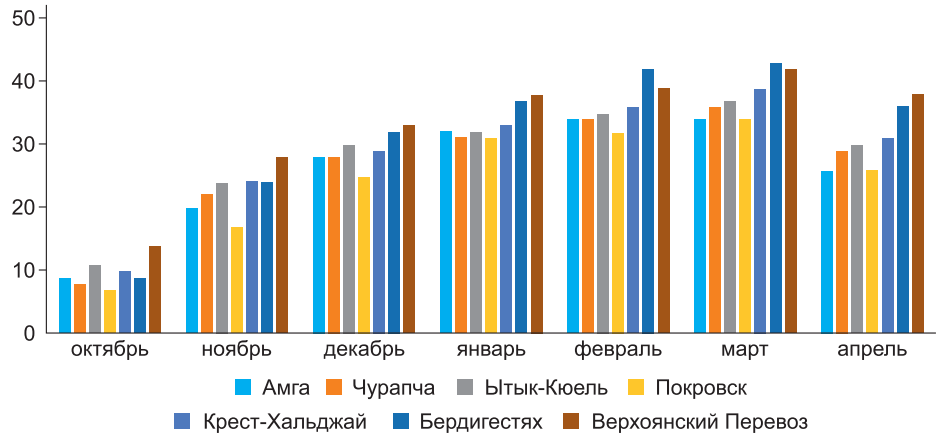


Рис. 1. График среднего многолетнего распределения снежного покрова (см) по месяцам

Fig. 1. Graph depicting the average long-term distribution of snow cover in centimeters by month

возе и Бердигестяхе приблизительно к 2093 г., в Крест-Хальджай при тренде +3 °C/100 лет в 2083 г., а в Покровске, Чурапче, Амге при тренде +4 °C/100 лет в 2085–2095 годах (табл. 1).

В условиях увеличения снежного покрова на 10 % протаивание кровли ледового комплекса на многоснежных участках Бердигестях и Верхоянский Перевоз при тренде +2 °C/100 лет начнется в 2068–2064 гг., на участках Покровск, Чурапча и Крест-Хальджай таяние подземного льда с трендом +3 °C/100 лет ожидается к 2083–2093 гг. При тренде +4 °C/100 лет и увеличении снежного покрова на 10 % таяние начнется в Верхоянском Перевозе и Бердигестяхе в 2051–2056 гг., в Крест-

Хальджай в 2071 г., в Покровске, Чурапче, Амге в 2076–2078 гг., в Ытык-Кюеле и Амге в районе 2085–2087 гг.

При тренде +4 °C/100 лет и приращении снега на 30 % глубина протаивания достигнет горизонта подземного льда к 2036–2041 гг. в многоснежных районах, как Бердигестях, Верхоянский Перевоз, Крест-Хальджай, а на остальных участках к 2050–2061 гг.

Результаты моделирования в виде температуры грунтов на глубине подошвы слоя годовых колебаний 15 м и глубине протаивания при различных трендах изменения средней годовой температуры воздуха и увеличении мощности

Таблица 1

Год достижения глубиной протаивания кровли ледового комплекса

Table 1

The year when the active layer depth reaches the top of the Ice Complex

Условия, °C	Покровск	Чурапча	Амга	Ытык-Кюель	Крест-Хальджай	Верхоянский Перевоз	Бердигестях
При изменении средней годовой температуры воздуха без снега							
При +2	–	–	–	–	–	2093	2093
При +3	–	–	–	–	2083	2076	2075
При +4	2088	2095	2085	–	2071	2067	2065
При росте +10 % снежного покрова							
При +2	–	–	–	–	–	2068	2064
При +3	2089	2093	–	–	2083	2060	2056
При +4	2076	2078	2085	2087	2071	2056	2051
При росте +30 % снежного покрова							
При +2	2067	2070	2061	2083	2045	2044	2039
При +3	2058	2061	2054	2069	2043	2041	2037
При +4	2053	2055	2050	2061	2041	2040	2036

Таблица 2

Прогнозные геокриологические условия

Table 2

Predicted geocryological conditions

Условия, °С	Амга		Бердигестях		Верхоянский Перевоз		Крест-Хальджай		Покровск		Чурапча		Ытык-Кюель	
	t ₀	ξ	t ₀	ξ	t ₀	Ξ	t ₀	ξ	t ₀	ξ	t ₀	ξ	t ₀	ξ
	-3,0	1,4	-2,5	1,6	-2,9	1,5	-2,7	1,6	-2,5	1,6	-2,9	1,4	-3,0	1,4
При изменении средней годовой температуры воздуха без снега														
При +2	-2,4	1,6	-1,8	2,3	-1,9	2,3	-1,9	2,0	-2,1	1,6	-2,2	1,5	-2,3	1,6
При +3	-2,1	1,8	-1,5	4,5	-1,8	3,3	-1,8	2,6	-2,0	2,0	-2,1	1,9	-2,1	1,8
При +4	-1,8	2,6	-1,4	5,0	-1,6	4,3	-1,7	3,5	-1,9	2,5	-2,0	2,8	-1,8	2,7
При росте +10 % снежного покрова														
При +2	-2,0	1,8	-1,6	3,0	-1,8	2,5	-1,9	1,9	-2,0	1,8	-2,1	1,8	-2,0	1,7
При +3	-1,7	2,8	-1,5	4,8	-1,7	4,4	-1,7	3,2	-1,7	2,5	-1,8	2,5	-1,7	2,3
При +4	-1,6	4,9	-1,4	6,0	-1,5	5,2	-1,5	5,3	-1,4	4,8	-1,6	4,6	-1,6	4,1
При росте +30 % снежного покрова														
При +2	-1,8	3,7	-1,4	5,1	-1,6	5,4	-1,6	4,8	-1,4	3,2	-1,7	3,7	-1,8	2,8
При +3	-1,7	5,3	-1,4	6,4	-1,5	6,1	-1,5	5,6	-1,4	4,8	-1,6	5,3	-1,7	4,9
При +4	-1,5	6,7	-1,3	7,2	-1,4	6,7	-1,4	6,3	-1,3	6,3	-1,5	6,7	-1,5	6,2

Примечание. t₀ – температура грунтов на глубине нулевых теплооборотов, 15 м, °С, ξ – глубина протаивания, м.

Note. t₀ – temperature of the soil at a depth of zero heat rotations, 15 m, °C, ξ – depth of thawing, m.

снежного покрова приведены в табл. 2, пространственное распределение прогнозных температур грунтов в Центральной Якутии показано на картах (рис. 2–4). При определении изменения средней годовой температуры воздуха без учета повышения количества осадков достижение протаиванием произойдет к 2100 г. при тренде +3 °С/100 лет на участках Крест-Хальджай, Покровск, Верхоянский Перевоз, Бердигестях. При повышении средней годовой температуры воздуха на +4 °С протаивание льдистых пород прогнозируется повсеместно по всем участкам, температуры пород на глубине годовых теплооборотов составят -1,4...-1,8 °С.

При приращении снежного покрова на 10 % и при повышении средней годовой температуры воздуха на 2 градуса начнется протаивание льдистых грунтов в Покровске, Верхоянском Перевозе и Бердигестях. По всем участкам вероятное протаивание прогнозируется при повышении на 3 градуса, температуры пород на глубине 15 м составят -1,5...-1,8 °С.

При увеличении снежного покрова на 30 % протаивание льдистых грунтов предположительно ожидается при повышении средней годовой температуры на 2 градуса по всем участкам, температуры грунтов на глубине годовых теплооборотов (15 м) составят -1,4...-1,7 °С. Резуль-

таты моделирования подтверждают заключение М.К. Гавриловой [19] о границе распространения сплошной мерзлоты по границе средней годовой температуры воздуха выше -8 °С.

Выделены два типа зон по вероятной устойчивости ледового комплекса. Первая зона – это участки, где глубина протаивания достигает кровли льдистых грунтов, – Бердигестях, Покровск, Крест-Хальджай, Верхоянский Перевоз. Более устойчивые районы к потеплению и сопровождающему увеличению осадков – Чурапча, Амга и Ытык-Кюель с маломощным снежным покровом и низкими средними годовыми температурами воздуха. Максимальные изменения глубины протаивания при всех сценариях – на участках Верхоянский Перевоз и Бердигестях.

По прогнозным моделям наибольшее протаивание предполагается в Бердигестях, что объясняется большей мощностью снежного покрова и теплой зимой. Бердигестях обладает средней годовой температурой воздуха -11,0 °С, а снежный покров в начале зимы в декабре составляет 32 см, что превышает средние значения по Центральной Якутии. Его зимние температуры воздуха выше температур Верхоянского Перевоза.

Верхоянский Перевоз расположен близ Предверхоянского краевого прогиба, что обуславливает большее количество осадков по сравнению

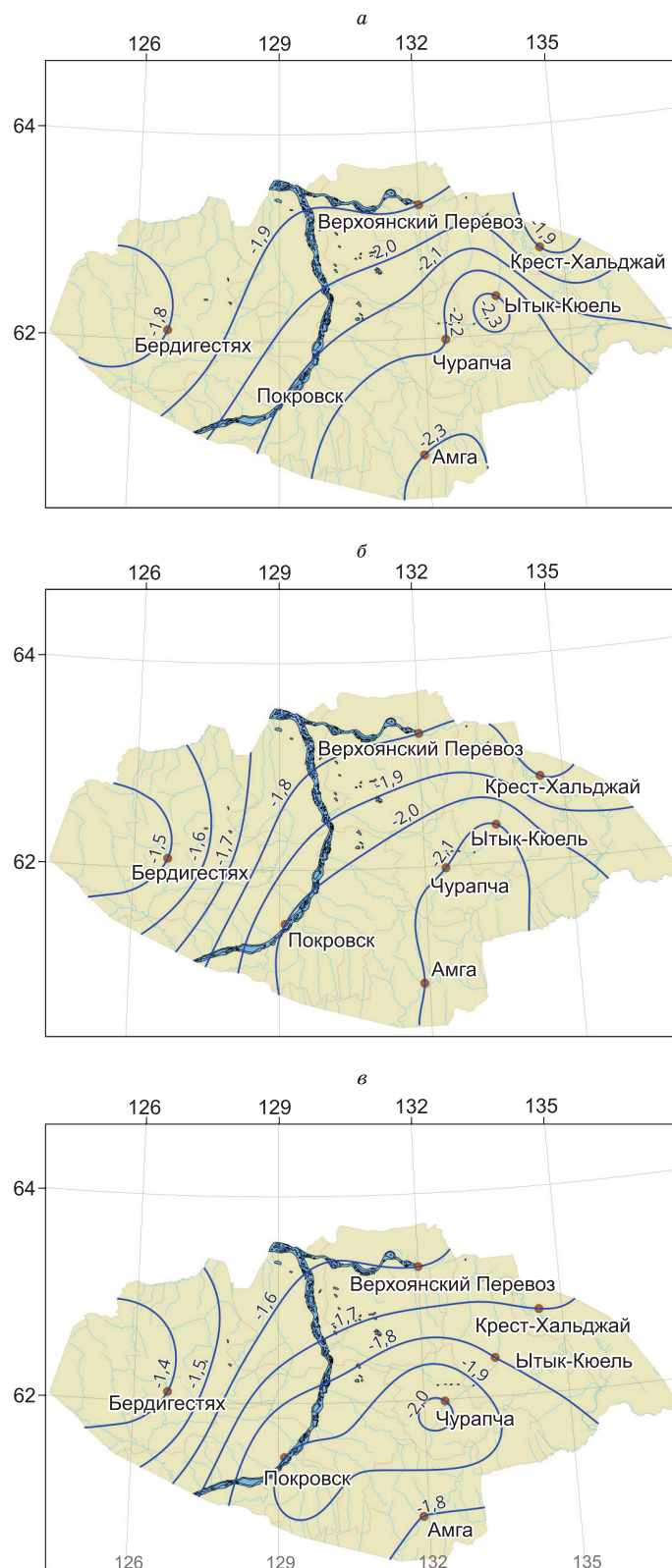


Рис. 2. Карта-схема температур грунтов межаласий на 2100 год при трендах: а – +2 °C/100 лет, б – +3 °C/100 лет, в – +4 °C/100 лет

Fig. 2. Schematic maps of soil temperatures in interalas terrain for the year 2100, illustrating trends: а) +2 °C/100 years, б) +3 °C/100 years, в) +4 °C/100 years

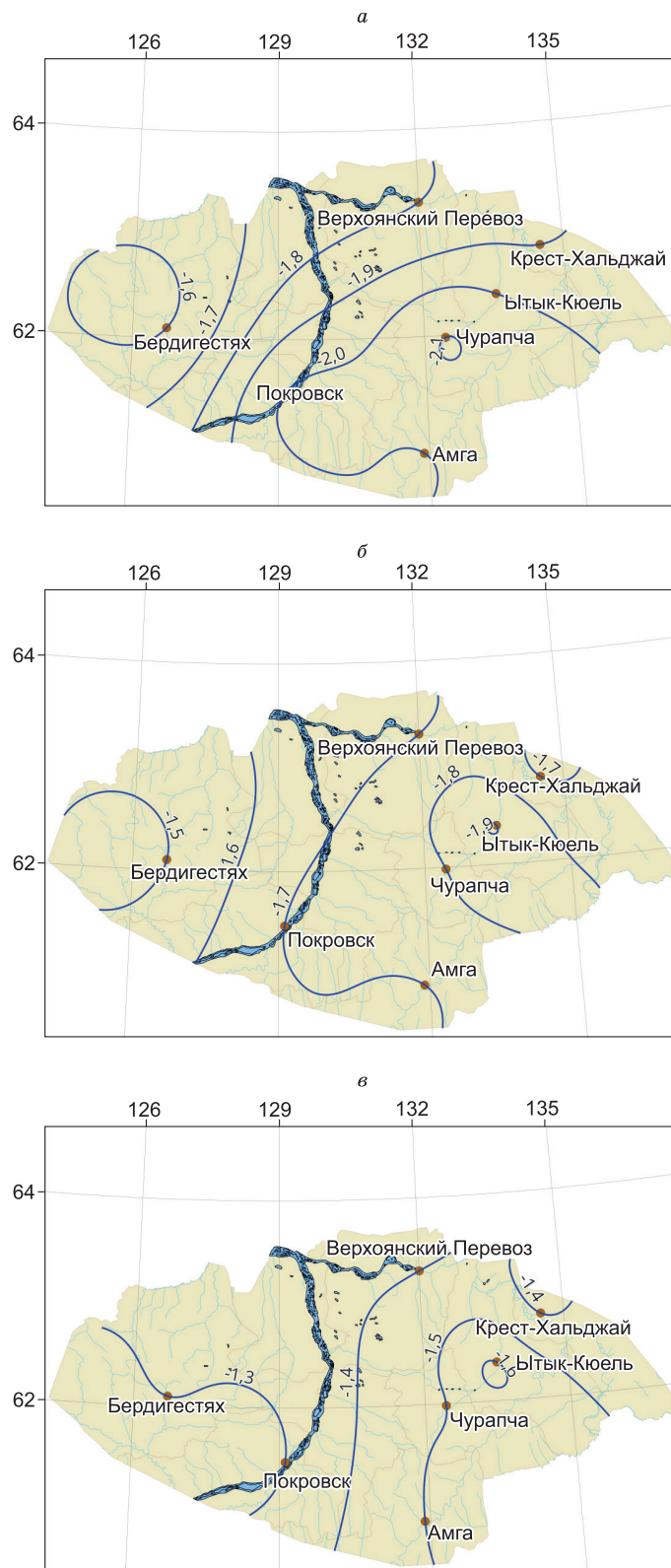


Рис. 3. Карта-схема температур грунтов межаласий на 2100 год с увеличением снежного покрова на 10 % при трендах: *a* – +2 °C/100 лет, *б* – +3 °C/100 лет, *в* – +4 °C/100 лет

Fig. 3. Schematic maps of soil temperatures in interalas terrain for the year 2100, reflecting 10% increase in snow cover along with trends: *a*) +2 °C/100 years *б*) +3 °C/100 years *в*) +4 °C/100 years

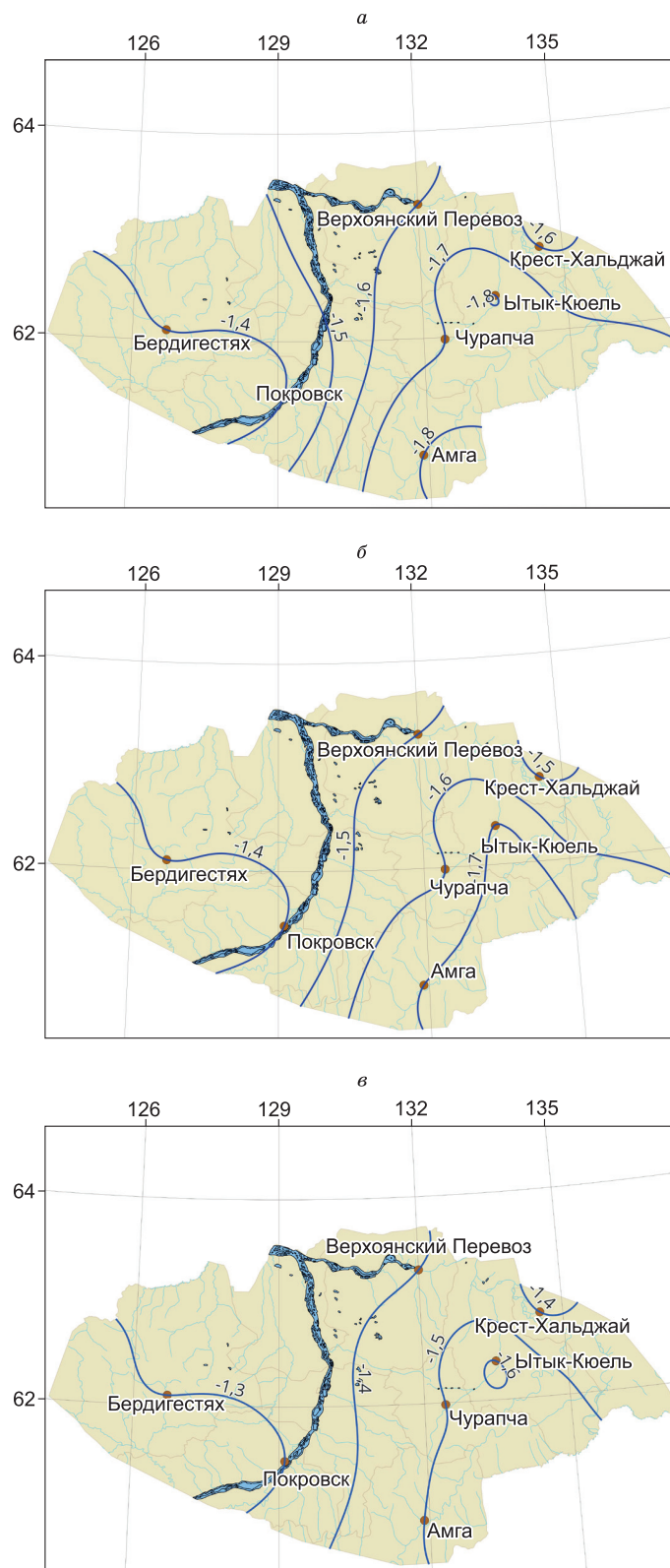


Рис. 4. Карта-схема температур грунтов межлассий на 2100 год с увеличением снежного покрова на 30 % при трендах: *а* – +2 °C/100 лет, *б* – +3 °C/100 лет *в* – +4 °C/100 лет

Fig. 4. Schematic maps of soil temperatures in inter-lake terrain for the year 2100, reflecting 30% increase in snow cover along with trends: *a*) +2 °C/100 years *б*) +3 °C/100 years *в*) +4 °C/100 years

с другими районами Центральной Якутии. Участок Покровск обладает наиболее высокой средней температурой воздуха $-10,2^{\circ}\text{C}$ по сравнению с другими и протаивание кровли ледового комплекса начинается при потеплении на $+3^{\circ}\text{C}$, т. е. при средней годовой температуре $-7,2^{\circ}\text{C}$.

Зоны вероятно неустойчивых участков – Покровск Хангаласского улуса, Верхоянский Перевоз Усть-Алданского улуса и Бердигестях Горного улуса районы обладают рельефом с уклоном, т. е. имеется естественный дренаж, и вода, образующаяся при протаивании льдистых грунтов, будет стекать вниз по склону. Для развития термокарста более подходят плоские и слабонаклонные участки [4], и можно предположить фрагментарное развитие термопросадочных процессов на неустойчивых участках с расчлененным рельефом.

С.М. Фотиев [20] произвел районирование криолитозоны России по степени возможных изменений температурного поля грунтов к 2050 году при повышении средней годовой температуры воздуха на 2 и 4°C . Он сделал вывод, что смещения сплошного типа распространения мерзлоты не произойдет и для этого требуются сотни и тысячи лет, для северных областей криолитозоны могут повыситься абсолютные значения средней годовой температуры грунтов без заметной перестройки температурного поля мерзлой толщи.

Прогнозные модели в данном исследовании показывают более значительные изменения геокриологических условий, чем модели деградации многолетнемерзлых пород Центральной Якутии при потеплении климата В.А. Иванова и И.И. Рожина [21]. В их расчетах через 50 лет глубина сезонно-талого слоя при темпе потепления климата $2^{\circ}\text{C}/100$ лет увеличится на 30 см, $4^{\circ}\text{C}/100$ лет – на 50 см, далее начинает формироваться надмерзлотная таликовая зона, и при темпе $2^{\circ}\text{C}/100$ лет деградация многолетнемерзлой толщи начнется через 120 лет и будет иметь скорость 12 м/100 лет, а при $4^{\circ}\text{C}/100$ лет деградация многолетнемерзлой толщи начнется через 60 лет со скоростью 15 м/100 лет. При этом температура грунтов на глубине 15 м не меняется через 100 лет при тренде $2^{\circ}\text{C}/100$ лет, но при тренде $4^{\circ}\text{C}/100$ лет за 100 лет примерно повышается на $0,5^{\circ}\text{C}$.

В.Т. Балобаев и др. [22] произвели прогноз изменения температурного поля в районе г. Якутск на период 1960–2200 гг. В этой работе они предположили, что температура пород на 20 м достиг-

нет в 2025 г. $-1,3^{\circ}\text{C}$, 2050 г. $-1,9^{\circ}\text{C}$, 2105 г. $-1,5^{\circ}\text{C}$, 2150 г. $-1,5^{\circ}\text{C}$ и в 2190 г. $-1,4^{\circ}\text{C}$. Разница результатов их прогноза и приведенного в нашей работе объясняется различием исходных данных и граничных условий, и на 2024 год прогноз не действителен, фактические температуры грунтов ниже прогнозных.

По Мелешко В.П. [23], в Средней Сибири максимальные отклонения глубины протаивания от современных составят 100–120 см в середине XXI века.

При повышении средней годовой температуры воздуха на 4°C по оценкам А.В. Павлова и Г.Ф. Грависа [24], В.Е. Романовского и др. [25] прогнозируются существенные изменения геокриологических условий верхней границы многолетнемерзлой толщи, что согласуется с полученными результатами моделирования.

При расчетах не учитывалось возникновение термоэрозионных процессов за счет фильтрационных процессов и механического воздействия воды. В основном суглинки обладают водоупорными свойствами. Но в низинах, где застаиваются поверхностные воды, неизбежно развитие термокарста, дальнейший расчет возможен только при подробном рассмотрении условий накопления воды. Прогноз с учетом накопления вод возможен только на локальных участках, так как рельеф и скорость накопления для каждого случая индивидуальны.

При потеплении климата и протаивании льдистых грунтов не исключается саморегуляция ландшафтов, обусловленная защитной реакцией на изменения климатических условий в виде увеличения продуктивности растительного покрова в коренных фациях и восстановительных сукцессиях из-за увеличения влажности верхних горизонтов, что является трудновыполнимой задачей моделирования при подборе теплофизических характеристик напочвенных покровов и периода их смены. О.А. Анисимов и др. [26] указывал на недостаточную изученность климатообусловленной динамики растительного покрова.

На основании анализа проведенных исследований мы резюмируем следующее:

1. Протаивание льдистых грунтов на лесных межаласях начнется к 2093 году в многоснежных Бердигестях и Верхоянском Перевозе, а в Покровске, Амге, Чурапче, Ытык-Кюеле и Крест-Хальджае в 2085–2093 гг. при тренде повышения средней годовой температуры воздуха $+3^{\circ}\text{C}/100$ лет

и +4 °C/100 лет без изменения высоты снежного покрова. В случае роста средней годовой температуры воздуха +4 °C/100 лет и увеличения высоты снежного покрова на 30 % протаивание льдистых грунтов ожидается к 2036–2041 гг. в Бердигестях и Верхоянском Перевозе, а в Покровске, Амге, Чурапче, Ытык-Кюеле и Крест-Хальджай в 2050–2061 гг.

2. При самом негативном рассматриваемом в работе тренде повышения средней годовой температуры воздуха +4 °C/100 лет с увеличением высоты снежного покрова на 30 % прогнозная глубина протаивания в Центральной Якутии составит к 2100 году 5,8–6,6 м, а температуры грунтов –1,3...–1,5 °C.

Заключение

На основании анализа результатов, полученных при математическом моделировании, выявлено, что при повышении средней годовой температуры воздуха на 4 °C без изменения количества осадков, при повышении на 3 °C с увеличением снежного покрова на 10 % и при повышении средней годовой температуры на 2 °C с увеличением снежного покрова на 30 % ледовый комплекс предположительно будет повсеместно деградировать. В неустойчивой зоне (Покровск, Бердигестях, Верхоянский Перевоз) поверхностные воды хорошо дренируются, но в низинах, где скапливаются воды, вероятность развития термокарста весьма высокая. Развитию термокарстового рельефа способствуют плоские поверхности, которые относятся в основном к выделенному устойчивому типу. Возрастание биомассы при увлажнении приповерхностного слоя, что меняет снегонакопление и играет теплоизоляционную роль, достаточно не оценено. В дальнейших работах планируется производить расчеты с учетом образования нового защитного слоя при промерзании протаявших переувлажненных пород сезонно-талого слоя в период малоснежных холодных зим. Но задача осложняется тем, что малоснежные зимы в Центральной Якутии не повторяются циклично, по архивным данным за последние 90 лет, они могут повторяться через 3–7 либо через 9–20 лет. При этом с начала потепления 1980-х годов подобные условия редкое явление, что вероятней всего связано с ослаблением влияния Азиатского антициклона. Результаты прогнозного моделирования могут использоваться при строительстве инженерных сооружений и сельскохозяйственном освоении

района для предупреждения возникновения опасных криогенных процессов.

Список литературы / References

1. Shestakova A.A., Fedorov A.N., Torgovkin Y.I., et al. Mapping the main characteristics of permafrost on the basis of a permafrost-landscape map of Yakutia using GIS. *LAND*. 2021;10(5):462; <https://doi.org/10.3390/land10050462>
2. Соловьев П.А. *Криолитозона северной части Лено-Алданского междуречья*. М.: Изд-во АН СССР; 1959. 144 с.
3. Solovyov P.A. *Cryolithozone of the northern part of the Lena-Aldan interfluvium*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1959. 144 p.
4. Иванов М.С. *Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины*. Новосибирск: Наука; 1984. 132 с.
5. Ivanov M.S. *Cryogenic structure of quaternary sediments of the Lena-Aldan depression*. Novosibirsk: Nauka, 1984. 132 p. (In Russ.)
6. Босиков Н.П. Аласность Центральной Якутии. В кн.: Некрасов И.А., Климовский И.В. (ред.). *Геокриологические условия в горах и на равнинах Азии*. Якутск: Институт мерзлотоведения; 1978. С. 113–118.
7. Bosikov N.P. Alasnost of Central Yakutia. In: Nekrasov I.A., Klimovskiy I.V. (eds.) *Geocryological conditions in the mountains and plains of Asia*. Yakutsk: Permafrost Institute; 1978, pp. 113–118. (In Russ.)
8. Брушков А.В. Глобальные изменения окружающей среды, реакция криолитозоны и устойчивость инженерных сооружений. *Инженерные изыскания*. 2015;(14):14–26.
9. Brushkov A.V. Global environmental changes, cryolithozone reaction and sustainability of engineering structures. *Engineering survey*. 2015;(14):14–26. (In Russ.)
10. Hinkel K.M., Nelson F.E., Klene A.E., Bell J.H. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska. *International Journal of Climatology*. 2003;23(15). <https://doi.org/10.1002/joc.971>.
11. Romanovsky V. E., Osterkamp T.E. Thawing of the active layer on the Coastal Plain of the Alaskan Arctic. *Permafrost and Periglacial Processes*. 1997;(8):1–22.
12. Новоприезжая В.А., Федоров А.Н. Реконструкция палеотемператур грунтов ледового комплекса Центральной Якутии в голоцене. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):224–234. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234>.
13. Novopriezzaya V.A., Fedorov A.N. Reconstruction of the paleotemperature of the Central Yakutia Ice Complex during the Holocene period. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):224–234. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234>.
14. Скачков Ю.Б. Динамика изменения среднегодовой температуры воздуха в Республике Саха Якутия за последние 50 лет. В кн.: *Труды IX международного симпозиума «Баланс углерода, воды и энергии и кли-*

мат бореальных и арктических регионов с особым акцентом на восточную Евразию», г. Якутск, 1–4 ноября 2016 года. Нагоя: Изд-во Университета Нагоя; 2016. С. 208–211.

Skachkov Yu.B. Dynamics of change in average annual air temperature in the Republic of Sakha-Yakutia over the past 50 years. In: *Proceedings of the 9th International Symposium "Carbon, Water, and Energy Balance and Climate of Boreal and Arctic Regions with Special Emphasis on Eastern Eurasia"*, Yakutsk, November 1–4, 2016. Nagoya: Nagoya University Press; 2016, pp. 208–211. (In Russ.)

10. Будыко М.И. Климат конца XX века. *Метеорология и гидрология*. 1988;(10):5–15.

Budyko M.I. Climate of the late 20th century. *Meteorology and hydrology*. 1988;(10):5–15. (In Russ.)

11. Гаврилова М.К. Предстоящие изменения климата и вечная мерзлота. В кн.: *Рациональное природопользование в криолитозоне*. М.: Наука; 1992. С. 8–12.

Gavrilova M.K. Upcoming climate changes and permafrost. In: *Rational Nature Management in the Cryolithozone*. Moscow: Nauka; 1992, pp. 8–12. (In Russ.)

12. Климанов В.А. Палеоклимат Северной Евразии при повышении среднеглобальной температуры на 0,6–0,8 °C и менее. В кн.: Величко А.А. (ред.) *Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального климата. Ретроспективный анализ и сценарии*. Вып. III. М.: ГЕОС; 2010. С. 70–86.

Klimanov V.A. Paleoclimate of Northern Eurasia with an increase in the average global temperature by 0.6–0.8°C. In: Velichko A.A. (ed.) *Climates and landscapes of Northern Eurasia under conditions of global warming. Retrospective analysis and scenarios. Issue 3*. Moscow: GEOS; 2010, pp. 70–86. (In Russ.)

13. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 24, часть II, IV. Ленинград: Гидрометеониздат; 1989. 607 с.

Scientific and applied handbook on the climate of the USSR. Issue 24, part II, IV. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1989. 607 p. (In Russ.)

14. Веселов В.М., Прибыльская И.Р., Мирзеабасов О.А. Специализированные массивы для климатических исследований. Режим доступа: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index1.xhtml>

Veselov V.M., Pribylskaya I.R., Mirzeabasov O.A. Specialized arrays for climate research. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index1.xhtml>

15. Melnikov E.S., Leibman M.O., Moskalenko N.G., Vasiliev A.A. Active-layer monitoring in the Cryolithozone of West Siberia. *Polar Geography*. 2004;28(4):267–285. <https://doi.org/10.1080/789610206>

16. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на Севере России. *Криосфера Земли*. 2009;13(4):32–39.

Pavlov A.V., Malkova G.V. Small-scale mapping of trends in modern soil temperature changes in the North of Russia. *Earth's Cryosphere*. 2009;13(4):32–39. (In Russ.)

17. Андреев А.А. История растительности и климата Центральной Якутии в голоцене и позднеледниковье. В кн.: *Материалы международной конференции «Озера холодных регионов». Ч.4: Вопросы палеоклиматологии, палеолимнологии и палеоэкологии*. Якутск: ЯГУ им. М.К. Аммосова; 2000. С. 15–19.

Andreev A.A. History of vegetation and climate of Central Yakutia in the Holocene and Late Glacial period. In: *Proceedings of the international conference "Lakes of cold regions". Part 4: Issues of paleoclimatology, paleolimnology and paleoecology*. Yakutsk, Yakut State University; 2000, pp. 15–19. (In Russ.)

18. Новоприезжая В.А., Федоров Н.А. Моделирование температурного режима грунтов межальсы Центральной Якутии на примере полигона Умайбыт. В кн.: *Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне, г. Якутск, 28–30 сентября 2020 года»*. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН; 2020. С. 142–145.

Novopriezzaya V.A., Fedorov N.A. Modeling of the soil temperature regime in the Central Yakutia interfluvium using the Umaibyt landfill as an example. In: *Proceedings of the All-Russian conference with international participation dedicated to the 60th anniversary of the formation of the P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS "Sustainability of natural and technical systems in the cryolithozone, September 28–30, 2020"*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020, pp. 142–145.

19. Гаврилова М.К. *Современный климат и вечная мерзлота на континентах*. Новосибирск: Наука; 1981. 112 с.

Gavrilova M.K. *Modern climate and permafrost on continents*. Novosibirsk: Nauka; 1981. 112 p.

20. Фотиев С.М. Возможные изменения геотемпературного поля криогенной области России при глобальном изменении климата. *Криосфера Земли*. 2000;4(3):14–29.

Fotiev S.M. Possible changes in the geotemperature field of the cryogenic region of Russia under global climate change. *Earth's Cryosphere*. 2000;4(3):14–29.

21. Иванов В.А., Рожин И.И. Моделирование деградации многолетнемерзлых пород при потеплении климата в условиях Центральной Якутии на ближайшие 300 лет. *Современные наукоемкие технологии*. 2021;(10):41–47.

Ivanov V.A., Rozhin I.I. Modeling of permafrost degradation during climate warming in Central Yakutia for the next 300 years. *Modern Scientific Technologies*. 2021;(10):41–47. (In Russ.)

22. Балобаев В.Т., Скачков Ю.Б., Шендер Н.И. Прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород Центральной Якутии до 2200 года. *География и природные ресурсы*. 2009;(2):50–56.

Balobaev V.T., Skachkov Yu.B., Shender N.I. Forecast of climate change and thickness of frozen rocks in Central Yakutia up to 2200. *Geography and Natural Resources*. 2009;(2):50–56. (In Russ.)

23. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А. и др. Антропогенные изменения климата в XXI веке в Северной Евразии. *Метеорология и гидрология*. 2004;(7):5–26.

Meleshko V.P., Kattsov V.M., Govorkova V.A., et al. Anthropogenic climate change in the 21st century in Northern Eurasia. *Meteorology and hydrology*. 2004;(7):5–26. (In Russ.)

24. Павлов А.В., Гравис Г.Ф. Вечная мерзлота и современный климат. *Природа*. 2000;(4):10–18.

Pavlov A.V., Gravis G.F. Permafrost and modern climate. *Priroda*. 2000;(4):10–18. (In Russ.)

25. Romanovsky V.E., Kholodov A.L., Marchenko S.S., et al. Thermal state and fate of permafrost in Russia: first results of IPY. In: Kane D.L., Hinkel K.M. (eds.) *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, Vol. 2, Fairbanks, Alaska, 28 June–3 July 2008*. Fairbanks: Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks; 2008, pp. 1511–1518.

26. Анисимов О.А., Жирков А.Ф., Шерстюков А.Б. Современные изменения криосферы и природной среды в Арктике. *Арктика XXI век*. Естественные науки. 2015;(2):24–47.

Anisimov O.A., Zhirkov A.F., Sherstyukov A.B. Current changes in cryosphere and environment in the Arctic. *Arctic XXI century. Natural sciences*. 2015;(2):24–47. (In Russ.)

Об авторах

НОВОПРИЕЗЖАЯ Варвара Андреевна, младший научный сотрудник, аспирант, Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4632-9840>, ResearcherID: AER-2270-2022, Scopus Author ID: 57219963224, SPIN: 4245-5312, e-mail: schwarz999@mail.ru

ФЕДОРОВ Александр Николаевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по науке, Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4016-2149>, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus Author ID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

Вклад авторов

Новоприезжая В.А. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация; **Федоров А.Н.** – разработка концепции, редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

NOVOPRIEZZHAYA, Varvara Andreevna, Junior Researcher, Post-Graduate Student, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4632-9840>, ResearcherID: AER-2270-2022, Scopus Author ID: 57219963224, SPIN: 4245-5312, e-mail: schwarz999@mail.ru

FEDOROV, Alexander Nikolaevich, Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher, Deputy Director for Science, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4016-2149>, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus Author ID: 22957332600, SPIN: 6083-1651, e-mail: fedorov@mpi.ysn.ru

Authors' contribution

Novopriezzhaya V.A. – conceptualization, methodology, validation, investigation, data curation, writing original draft, writing – review & editing, visualization; **Fedorov A.N.** – conceptualization, writing – review & editing, supervision, project administration, funding acquisition

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 12.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.03.2025

Принята к публикации / Accepted 20.03.2025