

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345.2

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234>

Оригинальная статья

Реконструкция палеотемператур грунтов ледового комплекса Центральной Якутии в голоцене

В. А. Новопррезжая[✉], А. Н. Федоров

*Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]schwarz999@mail.ru*

Аннотация

Современное потепление климата вызывает изменения мерзлотных ландшафтов на нарушенных участках вследствие активизации криогенных процессов, что отрицательно влияет на несущую способность грунтов, устойчивость зданий и линейных сооружений. Реконструкция объектов является нагрузкой на экономику республики и влияет на качество жизни населения. В Центральной Якутии эти процессы обширно распространены, ввиду высокой плотности населения и воздействия человека на мерзлоту. Изучение эволюции криолитозоны при изменении климата в прошлые эпохи необходимо для отождествления будущих преобразований мерзлотных ландшафтов, динамики температурного режима грунтов при современном потеплении климата и оценки устойчивости верхней части криолитозоны. На основе хронологии эволюции климата Центральной Якутии в голоцене проведена реконструкция температурного режима грунтов ледового комплекса посредством математического моделирования. Математическое моделирование температурного режима грунтов ледового комплекса произведено на основе климатических и теплофизических характеристик грунтов, которые подобраны по литологическим разрезам Центральной Якутии. Произведены анализ и выборка климатических характеристик, таких как средняя годовая и месячная температуры воздуха, мощность снежного покрова по архивным данным метеостанций. В периоды потеплений расчетные температуры грунтов на глубине нулевых теплооборотов составляли $-2,1 \dots -2,7$ °C с разницей от современных в $0,4-1$ °C, а в периоды похолоданий $-5,2 \dots -12,3$ °C с разницей от современных $2,1-9,2$ °C. Анализ расчетных моделей показывает зависимость динамики теплового состояния грунтов ледового комплекса от мощности снежного покрова и устойчивость ледового комплекса Центральной Якутии в самые теплые периоды голоцена.

Ключевые слова: криолитозона, Центральная Якутия, голоцен, потепление климата, моделирование

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

Для цитирования: Новопррезжая 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>

Original article

Reconstruction of the paleotemperature of the Central Yakutia Ice Complex during the Holocene period

Varvara A. Novopriezzhasya[✉], Alexander N. Fedorov

*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[✉]schwarz999@mail.ru*

Abstract

The increase in worldwide temperatures is leading to changes in permafrost landscapes in disturbed areas, which are causing the onset of cryogenic processes. Central Yakutia has a high population density and human impact on the permafrost, which contribute to the widespread occurrence of these processes. Studying the changes in permafrost

over past periods is crucial for predicting future landscape changes, monitoring soil temperature changes in current warming conditions, and evaluating the stability of the upper permafrost layer. We reconstructed the temperature regime of the soils in the Ice Complex using mathematical modeling based on the chronology of climate evolution in Central Yakutia during the Holocene. Mathematical modeling of the temperature regime of the ice complex's soils is based on climatic and thermophysical characteristics of the soils selected from the lithological sections of Central Yakutia. Archive data from weather stations was used for the analysis and sampling of climatic characteristics such as average annual and monthly air temperatures and snow cover thickness. During periods of warming, the calculated ground temperatures at the depth of zero heat turnover were between -2.1 and -2.7 °C, showing a difference of $0.4-1$ °C from the current temperatures. Conversely, during cooling periods, the temperatures ranged from -5.2 to -12.3 °C, with a variance of $2.1-9.2$ °C from the current soil temperatures. Thus, the examination of computational models indicates that the thermal conditions of the soils within the Ice Complex in Central Yakutia during the most significant periods of the Holocene are impacted by the thickness of the snow cover and the integrity of the Ice Complex.

Keywords: permafrost zone, Central Yakutia, Holocene, climate warming, modeling

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

For citation: Novopriezzhasya 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>

Введение

В настоящее время в Центральной Якутии повышение температур воздуха в дополнение к антропогенным воздействиям приводит к активизации и интенсификации криогенных процессов. Это вызывает интерес к прогнозу геокриологических условий, основой которого является история эволюции криолитозоны. Криолитозона – продукт взаимосвязи климата и природной среды, соответственно, динамика многолетней мерзлоты прямо зависит от изменений климата.

Рассматриваемая часть Центральной Якутии входит в зону средней тайги с преобладанием межаласного и аласного типов местности. Межаласье представляет собой природно-территориальный комплекс, развитый на высоких террасах крупных рек и озерно-аллювиальных равнинах, характеризуется наличием мощных повторно-жильных льдов [1]. Аласный тип местности представляет собой наиболее характерные ландшафты в Центральной Якутии, в которых ледовый комплекс был деградирован в периоды потеплений в позднем плейстоцене и голоцене (рис. 1). По Н.П. Босикову [2], под аласами понимаются замкнутые или полузамкнутые термокарстовые котловины, развитые на плакорных пространствах криолитозоны. Он также поясняет, что развитие аласов определяется вытаиванием подземных льдов и образованием термокарстового озера. После усыхания озера на днище котловины образуется комплекс лугов с засоленными почвами. Коренной тип леса межаласья представлен листовенными лесами. Формирование ледового комплекса в Центральной Якутии происходило в экс-

тремально холодных климатических условиях позднего плейстоцена около 50–11 тыс. лет назад, а среднегодовая температура мерзлых пород не превышала -10 °C [3]. По В.В. Колпакову [4], в среднем течении Лены развиты лессовидные породы.

По С.М. Фотиеву [6], в голоцене на территории Сибири по развитию криогенного метаморфизма выделяются две эпохи: деградационная от 11 тыс. лет назад до конца эпохи климатического максимума (термохрон) и далее агтрадационная до настоящего времени (криохрон). М. Ульрих и др. [7] с учетом палеоэкологических реконструкций Сибири указывают на интенсивную термокарстовую активность в голоценовый оптимум примерно 7–5 тыс. лет назад, с сильными колебаниями уровня вод и дальнейшим боковым расширением бассейна между 3,5 и 1,5 тыс. лет назад. После ледниковое потепление достигло своего максимума между 6–4,5 тыс. лет назад. С.П. Качурин [8] предположил, что термокарстовые процессы в Сибири были более слабыми в период позднего голоцена. Переход позднего плейстоцена в голоцен характеризуется резким увеличением пыльцы деревьев и снижением степной растительности [9–11].

На основе палинологических данных А.А. Андреевым и др. [12] составлена палеоклиматическая реконструкция Центральной Якутии (табл. 1). Аллеред и поздний дриас (до 10,3–10,5 тыс. лет назад) характеризовались суровым климатом и малым количеством осадков, развитием тундростепей и ерников. В аллереде июльская температура воздуха была ниже современной темпера-

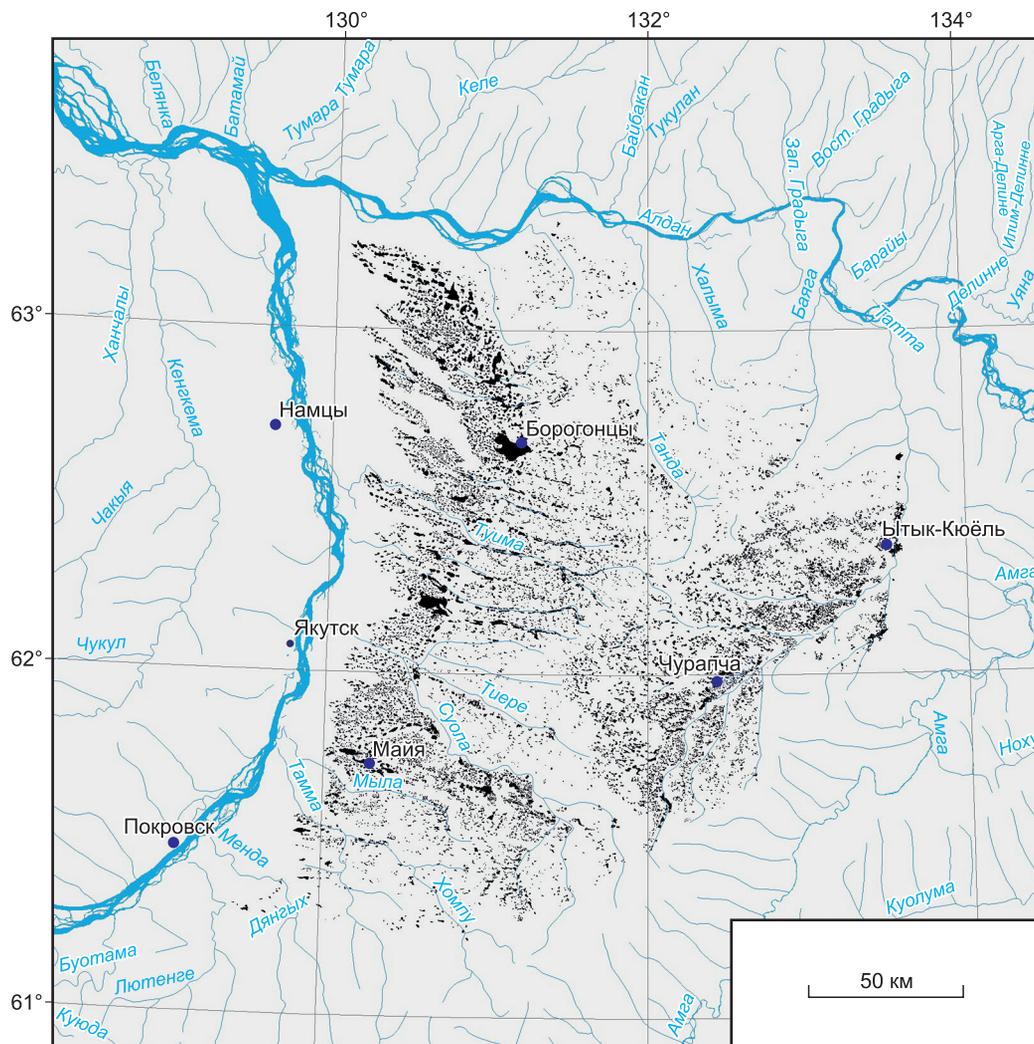


Рис. 1. Карта аласности Лено-Амгинского междуречья [5]

Fig. 1. Map of the alashness of the Lena-Amga interfluvium [5]

туры воздуха на 1,5–2,5 °С, января – на 2–5 °С, в позднем дриасе июльская – на 3 °С, январская – на 6 °С. С предбореального периода около 9,8 тыс. лет назад выражена тенденция к росту температур, тундростепи сменились на лиственничные и березовые редколесья с ерниками. Температура воздуха в июле в предбореальный период была ниже современной на 2 °С, январская – на 4 °С. Бореальный период (8,5 тыс. лет назад) был более теплым, чем предбореальный, отклонение среднегодовой температуры воздуха от нынешней составляло –0,5...–1 °С, произошло обширное распространение лиственничных и березовых лесов с елью и сосной. В атлантический период (7,9 тыс. лет назад) на севере Евразии выделяется географическая зональность и

секторность, чередуются периоды потепления и похолодания. Среднегодовая температура воздуха повысилась до превышения современной среднегодовой на 0,5 °С, а через 900 лет понизилась на 1,5 °С с уменьшением количества осадков, далее среднегодовая температура воздуха повышается на 0,5–1 °С от современных, и в это потепление характерной растительностью являются лиственничные леса с сосной и березой. В суббореальный (4,4–3,5 тыс. лет назад) и субатлантический (2,2–1 тыс. лет назад) периоды происходят чередования похолоданий и потеплений через 900–1200 лет. В суббореальный период похолодания (4,4 тыс. лет назад) температура воздуха июля была ниже современной на 1,5 °С, а январская – на 2–3 °С. В периоды по-

**Хронология периодов голоцена
и их климатические характеристики в Центральной Якутии [12]**

Table 1

Chronology of the Holocene periods and their climatic characteristics in Central Yakutia

| Период | Время | Отклонения от среднегодовой температуры воздуха, °С | Отклонения годовой суммы осадков, мм | Характерная растительность |
|------------------|-------|---|--------------------------------------|---|
| Аллеред | 10500 | -3...-4,5 | -50...-100 | Тундростепи и ерники |
| Поздний дриас | 10300 | -5 | -150 | Тундростепи и ерники |
| Предбореальный | 9800 | -2,5 | -50 | Редколесья лиственничные и березовые с ерниками |
| Бореальный | 8500 | -0,5...-1 | -25 | Леса лиственничные и березовые с елью и сосной |
| Атлантический | 7900 | +0,5 | +25 | Леса лиственничные с березой |
| | 7000 | -1,5 | -50 | Леса лиственничные |
| | 5500 | +0,5...+1 | +25 | Леса лиственничные с сосной и березой |
| Суббореальный | 4400 | -2 | -50 | Леса лиственничные с сосной, березой и ерниками |
| | 3500 | +0,5...+1 | +50...+75 | Леса лиственничные с сосной и березой |
| Субатлантический | 2200 | -1,5 | -50 | Леса лиственничные с сосной, березой и ерниками |
| | 1000 | +0,5...+1 | +25 | Леса лиственничные с сосной и березой |

теплений суббореального и субатлантического периодов характерная растительность представлена лиственничными лесами с сосной и березой, а в периоды похолоданий к ним добавляются ерники [13].

Целью настоящей работы является реконструкция температурного режима грунтов ледового комплекса Центральной Якутии в голоцене для геокриологического прогноза при будущих изменениях климата и оценки устойчивости криогенных ландшафтов, т. е. верхней части криолитозоны, которая наиболее важна для строительства и эксплуатации инженерных сооружений и деятельности человека.

Материалы и методы исследования

Мониторинговые полигоны Умайбыт (близ г. Покровск) и Юкэчи (близ с. Майя), где были проведены детальные геокриологические исследования Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, были выбраны как опорные участки. На этих мониторинговых полигонах сотрудниками института проводились регулярные ежегодные замеры температур грунтов и слоя сезонного оттаивания. Для моделирования использовались дан-

ные метеостанций Бердигестях, Покровск, Амга, Чурапча, Охотский Перевоз, Крест-Хальджай и Ытык-Кюель (табл. 2). Основой для моделирования стали современные значения среднемесячных температур и воздуха, мощности и плотности снежного покрова по метеостанциям (рис. 2 и 3) [14–17].

В целях реконструкции теплового состояния пород промоделированы климатические характеристики голоцена по участкам согласно табл. 1. Произведена выборка массива архивных данных средних годовых температур воздуха по отклонению от современной средней годовой температуры воздуха. В ходе решения задачи теплотехнического расчета по максимальным периодам похолодания в аллереде и позднем дриасе, в силу отсутствия натуральных данных с настолько низкими температурами воздуха, для расчетов выборка произведена по метеостанциям северной тайги и тундры, которые могли быть аналогами центральноякутских метеостанций в эти эпохи. Отклонения суммы осадков в виде высоты снежного покрова высчитывались в процентном соотношении, в холодные периоды упор делался на первые месяцы снегопада, так как в сильные морозы количество осадков уменьшалось. Если

Таблица 2

Среднемесячные температуры и среднегодовые температуры воздуха, °С

Table 2

Monthly temperatures and mean annual air temperatures, °C

| Участок | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Ср.год |
|------------------|-------|-------|-------|------|-----|------|------|------|-----|-------|-------|-------|--------|
| Амга | -42,9 | -38,0 | -24,0 | -7,5 | 6,1 | 14,5 | 17,7 | 14,1 | 5,3 | -8,9 | -29,6 | -40,6 | -11,2 |
| Чурапча | -44,0 | -38,4 | -24,0 | -7,8 | 5,8 | 14,7 | 18,1 | 14,3 | 5,2 | -9,4 | -30,8 | -41,8 | -11,5 |
| Ытык-Кюель | -44,9 | -39,5 | -25 | -8,2 | 5,6 | 14,4 | 17,4 | 13,8 | 4,5 | -10,3 | -32,4 | -42,7 | -12,2 |
| Покровск | -40,9 | -35,5 | -22,5 | -7 | 5,8 | 14,5 | 18 | 14,4 | 5,6 | -7,8 | -28,1 | -38,7 | -10,2 |
| Крест-Хальджай | -44,3 | -38,2 | -23,0 | -6,5 | 6,4 | 15,4 | 18,4 | 14,4 | 5,6 | -9,5 | -31,8 | -42,4 | -11,3 |
| Охотский Перевоз | -44,2 | -39,4 | -24,7 | -7,8 | 5,7 | 14,2 | 17,4 | 14,0 | 5,5 | -8,7 | -30,3 | -41,1 | -11,6 |
| Бердигестях | -40,5 | -35,7 | -22,9 | -8,3 | 4,7 | 13,5 | 16,5 | 12,6 | 3,9 | -8,7 | -28,2 | -38,9 | -11,0 |

отклонение от современной годовой суммы осадков превышало 25 %, то плотность снежного покрова принималась в большую или меньшую сторону по схожей метеостанции. В экстремально холодные периоды голоцена, где господствовали тундростепи и ерники, дополнительно вводились коэффициенты теплообмена с учетом скорости ветра.

Литологический разрез на мониторинговых полигонах Умайбыт и Юкэчи однотипный, характерный для Абалахской равнины Центральной Якутии, сложен покровными суглинками и супесями до глубины 2,2–2,4 м, ниже вскрываются повторно-жильные льды мощностью от 10 до 13,8 м, подстилаемые песками [18–20]. На его основе и свойств грунтов по физическим свойствам подобраны теплофизические параметры для каждого слоя [21, 22]. Теплопроводность талых супесей около 1,16–1,26 Вт/(м · °С), мерзлых 1,28–1,89, талых суглинков 1,16–1,33, мерзлых 1,51–2,15, талых песков 2,5, мерзлых

2,73 Вт/(м · °С). Теплоемкость талых супесей составляет 642–686 Вт/м³, мерзлых 523–529, талых суглинков 686–896, талых песков 872, мерзлых супесей 523–529, мерзлых суглинков 523–605, мерзлых песков 651 Вт/м³. Температура замерзания грунтов следующая, °С: супесей –0,15, суглинков –0,20, песков –0,10; теплота фазовых переходов для супесей 14–23 тыс. Вт/(ч · м³), суглинков 23–48 тыс., песков 36 тыс. Вт/(ч · м³) [23]. Грунты межлассий Центральной Якутии являются незасоленными, и, следовательно, в расчетах температура замерзания принята по незасоленным разновидностям дисперсных грунтов.

Реконструкция температур грунтов была выполнена с помощью математического метода решения одномерной задачи Стефана, с использованием программы Qfrost, разработанной кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ. Расчет производился по периодам голоцена на весь промежуток времени периода по-

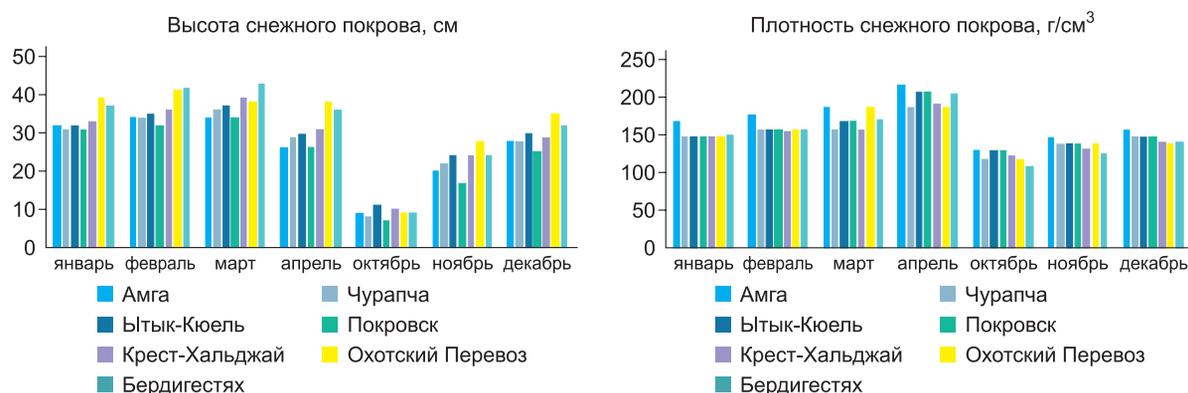


Рис. 2. Динамика характеристик снежного покрова по метеостанциям

Fig. 2. Dynamics of snow cover characteristics observed by meteorological stations

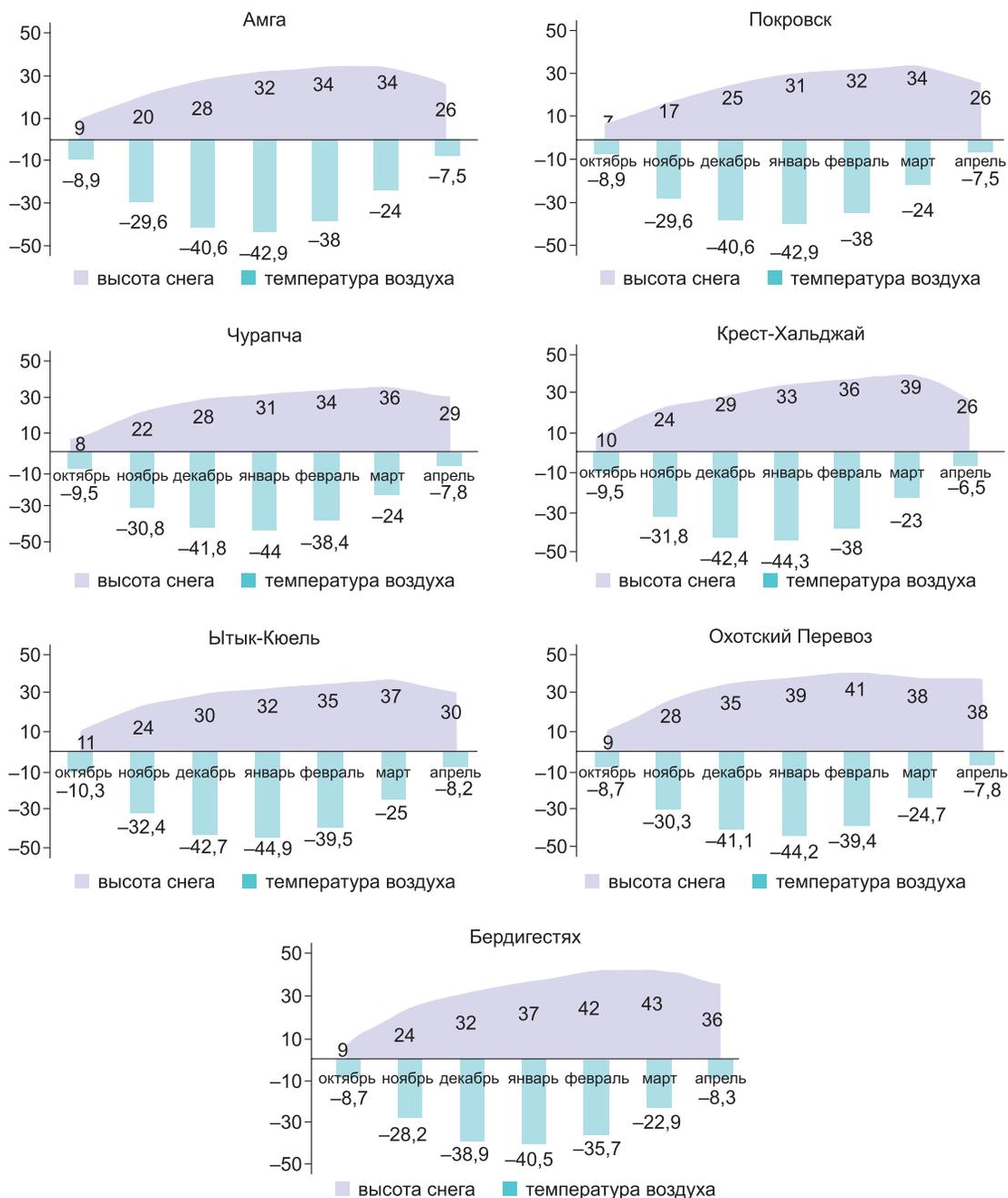


Рис. 3. Распределение снежного покрова и температур воздуха в период отрицательных температур по метеостанциям

Fig. 3. Distribution of snow cover and air temperatures during the period of sub-zero temperatures recorded by meteorological stations

сле выборки и подбора среднемесячных температур воздуха и высоты снежного покрова по метеостанциям.

Верификация моделей полигонов Умайбыт и Юкэчи производилась посредством ретроспективного моделирования на период 1980–2018 гг. и демонстрирует хорошую сходимость расчетных температур грунтов с фактическими замерами температур и согласованность с ходом раз-

вития динамики температурного поля многолетнемерзлой толщи (рис. 4).

Результаты и обсуждение

По результатам реконструкции температуры грунтов Центральной Якутии в аллереде составили, °С: -8,4...-9,2, в позднем дриасе -11,4...-13,2, в предбореальный период -7,1...-8,0, в бо-реальный -4,9...-5,5, в атлантические теплые

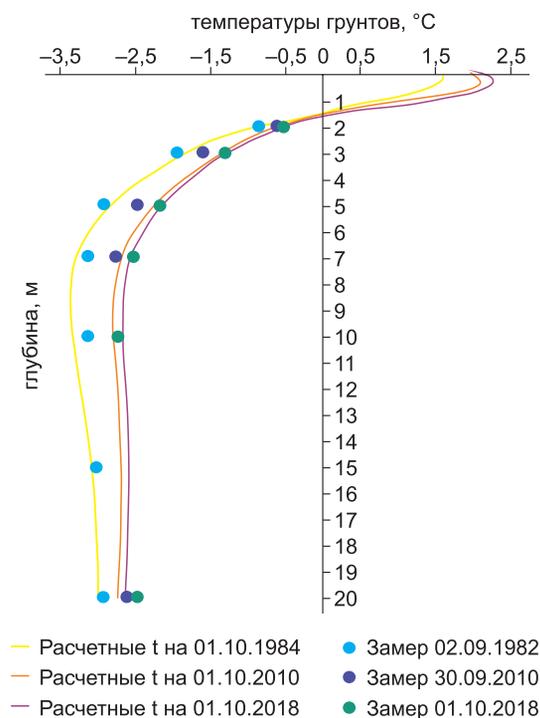


Рис. 4. Сопоставления расчетных температур грунтов с замерами. Полигон Умайбыт

Fig. 4. Comparison of calculated ground temperatures with actual measurements at the Umaybyt site

периоды $-2,4...-3,0$, в атлантический холодный период $-5,6...-6,8$, в суббореальный холодный период $-6,1...-7,3$, в суббореальный термохрон $-1,9...-2,3$, в субатлантический холодный период $-5,6...-6,8$, в субатлантический теплый период $-2,0...-2,9$ (табл. 3). Температуры грунтов приведены на глубине нулевых годовых теплооборотов, которая составляет для Центральной Якутии в настоящее время 15 м.

В ходе ретроспективного анализа прослеживаются следующие особенности:

Температурный режим грунтов Покровска аналогичен режимам Бердигестяха и Охотского перевоза. Как правило, температуры ниже многоснежного бердигестяхского на $0,1-0,5$ °С в многоснежный, равны в бореальный (8,5 тыс. лет назад), атлантический (5,5 тыс. лет назад) и суббореальный (3,5 тыс. лет назад) периоды. Покровск по сравнению с Охотским перевозом теплее, но малоснежен, разница в температурах грунтов составляет $0,1-0,3$ °С.

Бердигестях отмечен как участок с самой высокой температурой грунтов, вследствие высокой среднегодовой температуры и большей высоты снежного покрова.

Температуры грунтов Чурапчи схожи с температурами Амги, Крест-Хальджай (особенно в

Таблица 3

Реконструкция температур грунтов Центральной Якутии в голоцене, °С

Table 3

Soil temperature reconstruction in Central Yakutia During the Holocene, °С

| Период | Время | Отклонения от ср. год. темп. воздуха, °С | Отклонения год. суммы осадков, мм | Покровск | Чурапча | Амга | Крест-Хальджай | Охотский Перевоз | Бердигестях | Ытык-Кюель | Среднее | Стандартное отклонение |
|------------------|-------|--|-----------------------------------|----------|---------|-------|----------------|------------------|-------------|------------|---------|------------------------|
| Аллеред | 10500 | -3...-4,5 | -50...-100 | -8,8 | -9,1 | -9,2 | -8,9 | -8,7 | -8,4 | -9,2 | -8,9 | 0,29 |
| Поздний дриас | 10300 | -5 | -150 | -11,9 | -12,7 | -12,7 | -12,4 | -12,0 | -11,4 | -13,2 | -12,3 | 0,60 |
| Предбореальный | 9800 | -2,5 | -50 | -7,2 | -7,8 | -7,9 | -7,6 | -7,4 | -7,1 | -8 | -7,6 | 0,35 |
| Бореальный | 8500 | -0,5...-1 | -25 | -4,9 | -5,2 | -5,5 | -5,3 | -4,9 | -4,9 | -5,5 | -5,2 | 0,28 |
| Атлантический | 7900 | +0,5 | +25 | -2,5 | -2,8 | -2,9 | -2,6 | -2,5 | -2,4 | -3 | -2,7 | 0,23 |
| | 7000 | -1,5 | -50 | -5,8 | -6,6 | -6,6 | -6,3 | -6 | -5,6 | -6,8 | -6,2 | 0,45 |
| | 5500 | +0,5...+1 | +25 | -2 | -2,4 | -2,8 | -2,4 | -2,3 | -2 | -2,9 | -2,4 | 0,35 |
| Суббореальный | 4400 | -2 | -50 | -6,2 | -6,9 | -7 | -6,9 | -6,5 | -6,1 | -7,3 | -6,7 | 0,44 |
| | 3500 | +0,5...+1 | +50...+75 | -1,9 | -2,1 | -2,1 | -2,1 | -2,1 | -1,9 | -2,3 | -2,1 | 0,14 |
| Субатлантический | 2200 | -1,5 | -50 | -5,8 | -6,6 | -6,6 | -6,3 | -6 | -5,6 | -6,8 | -6,2 | 0,45 |
| | 1000 | +0,5...+1 | +25 | -2 | -2,4 | -2,8 | -2,6 | -2,3 | -2 | -2,9 | -2,5 | 0,36 |
| Современный | 0 | | | -2,7 | -3 | -3,2 | -3,4 | -3 | -2,5 | -3,6 | -3,1 | 0,38 |

атлантический, суббореальный, субатлантические теплые периоды) и Ытык-Кюеля. В позднем дриасе, в атлантическом холодном, суббореальном теплом периодах чурапчинские и амгинские температуры грунтов совпадают, а в остальные периоды чурапчинские выше на 0,1–0,4 °С, что, вероятно, связано с меньшими плотностями снежного покрова в начале зимы.

Участок Охотский перевоз по температурному режиму схож с Крест-Хальджем, но имеет большую высоту снега (но меньшую плотность) к началу морозного периода. Температуры воздуха незначительно ниже температур участка Крест-Хальджай, потому в периоды похолоданий с меньшим количеством снега, такие как поздний дриас, бореальный, атлантический (7,0 тыс. лет назад) и субатлантический (2,2 тыс. лет назад), температуры грунтов становятся ниже крестхальджайских на 0,2–0,4 °С.

Ытык-Кюель выделяется среди прочих участков наиболее низкими температурами грунтов, но в отдельные холодные периоды (аллеред и бореальный) температуры грунтов равны амгинским.

По результатам моделирования, наиболее теплые температурные режимы в Центральной Якутии имеют участки Покровск и Бердигестях, а наиболее холодные – Амга и Ытык-Кюель, что объясняется различием в среднегодовых температурах воздуха и мощностях снежного покрова, также по географическому расположению самые «теплые» участки находятся на юго-западной стороне.

В.В. Самсоновой [24] была смоделирована мерзлотно-климатическая динамика криогенных систем Центральной Якутии в голоцене через задание трендов температур воздуха от +0,0015 до –0,05 °С в год на определенные периоды. По данным Самсоновой В.В., температуры грунтов на глубине годовых нулевых теплооборотов составили, °С: в аллереде –10,6, в позднем дриасе –10,9...–11,8, в предбореальный период –9,0, в бореальный –4,4, в атлантический (7900 л.н.) –1,2, в атлантический (7000 л.н.) –5,1...–5,3, в атлантический (5500 л.н.) –0,5...–2,7, в суббореальный (4400 л.н.) –3,5...–5,5, в суббореальный (3500 л.н.) –0,6...–1,9, в субатлантический (2200 л.н.) –5,3, в субатлантический период (1000 л.н.) –0,4. При сопоставлении результатов моделирования разница составляет 0,2–2,0 °С. При сопоставлении с данной реконструкцией палеотемператур наибольшие различия температуры грунтов в аллереде – 1,7 °С, в предбореаль-

ный – 1,4, в атлантический период (7900 л. н.) – 1,5, в суббореальный (4400 л.н.) – 1,2, а в субатлантический период (1000 л.н.) в 2,0 °С. Предположительно, эти различия обусловлены разницей подходов, в одном случае использовались тренды температур воздуха и опорные метеостанции для характеристик снежного покрова в соответствующий период, в другом – отклонения среднегодовых и среднемесячных температур воздуха от современных в сочетании с разницей по высоте снежного покрова в процентном соотношении через подборку архивных данных.

Самые теплые периоды голоцена [25, 26] могут быть использованы как опорные для прогноза изменений температурного режима и для оценки устойчивости верхних горизонтов криолитозоны и криогенных ландшафтов при будущем потеплении климата. Модели мерзлотных ландшафтов показывают достаточную устойчивость криолитозоны в самые теплые периоды голоцена: атлантический (5500 л. н.), суббореальный (3500 л. н.), субатлантический (1000 л. н.), когда повышенные температуры грунтов составило от +0,4 до +1 °С при повышении температуры воздуха на +0,5...+1 °С, но около 80 % территории ледового комплекса сохранили устойчивость, согласно Карте аласности Центральной Якутии [27], так как аласы формировались при развитии термокарста в периоды потеплений позднего плейстоцена и голоцена.

По Т.П. Каплиной [28], причиной возникновения аласного рельефа на территории Северной Якутии является увеличение осадков примерно 13–12 тыс. лет назад, отмечается, что процесс был весьма стремительным, к рубежу 10–8,5 тыс. лет назад аласный рельеф был сформирован. М. Ульрих и др. [7], основываясь на анализе седиментологических и биогеохимических характеристик термокарстовых процессов, подчеркивают, что эволюция аласов и термокарстовых озер Центральной Якутии не была непрерывным процессом и возникла из-за кратковременных фаз ускорения динамики климатических условий. Таяние вечной мерзлоты и экстенсивное развитие термокарстовых бассейнов ускоряются при увеличении количества осадков и возможны даже в кратковременные теплые периоды.

А.Ф. Фрадкина с соавторами [10] также считает, что термокарстовые озера начали формироваться к концу позднего оледенения в аллереде около 13 тыс. лет назад.

Согласно работам Ф. Катамуры и др. [29, 30], в Центральной Якутии формирование аласов про-

изошло около 11–9 тыс. лет назад и термокарст интенсивно развивался 7–8,5 тыс. лет назад, в так называемый голоценовый оптимум. Основной причиной развития термокарста в Центральной Якутии на основе изучения остатков древесного угля они считают лесные пожары.

Заключение

1. Динамика состояния криолитозоны находится в тесной зависимости от местных климатических особенностей. Наиболее теплые температурные режимы грунтов имеют участки Покровск и Бердигестях, а наиболее холодный – участок Ытык-Кюель, что объясняется различием в среднегодовых температурах воздуха и мощностях снежного покрова.

2. Наибольшие стандартные отклонения температуры грунтов отмечены в холодные периоды из-за уменьшения мощности снежного покрова и далее большего влияния экстремально низких зимних температур.

3. Расчетные модели температуры грунтов показывают относительную устойчивость верхней части криолитозоны и криогенных ландшафтов в самые теплые периоды голоцена – атлантический (5500 л.н.), суббореальный (3500 л.н.), субатлантический (1000 л.н.), когда повышение температур грунтов составило от +0,6 до +1 °С при повышении температуры воздуха на +0,5...+1 °С и увеличении осадков на 10–30 %.

Список литературы / References

1. Федоров А.Н., Ботулу Т.А., Варламов С.П. *Мерзлотные ландшафты Якутии (Пояснительная записка к Мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1: 2 500 000)*. Новосибирск: ГУГК; 1989. 170 с.
Fedorov A.N., Botulu T.A., Varlamov S.P. *Permafrost landscapes of Yakutia (Explanatory note to the Permafrost-landscape map of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic, scale 1: 2,500,000)*. Novosibirsk: GUGK; 1989. 170 p. (In Russ.)
2. Босиков Н.П. *Эволюция аласов Центральной Якутии*. Якутск: ИМЗ СО РАН; 1991. 127 с.
Bosikov N.P. *Evolution of the Alases in Central Yakutia*. Yakutsk: IMZ SB RAS; 1991. 127 p. (In Russ.)
3. Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата. *Криосфера Земли*. 2011;15(4):15–18.
Konishchev V.N. Permafrost response to climate warming. *Kriosfera Zemli*. 2011;15(4):15–18. (In Russ.)
4. Колпаков В.В. Эоловые четвертичные отложения приленской Якутии. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. 1983;52:123–131.
Kolpakov V.V. Eolian Quaternary deposits of the Lena Yakutia. *Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period*. 1983;52:123–131. (In Russ.)
5. Торговкин Я.И., Шестакова А.А. Пространственный анализ криогенных форм рельефа северной части Лено-Амгинского междуречья (на примере аласов Усть-Алданского улуса). *Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле»*. 2019;4(16):102–112. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.16.49746>
Torgovkin Y.I., Shestakova A.A. Spatial analysis of cryogenic forms of the relief in the northern part of the Leno-Amga interfluvium: the case of alases in the Ust-Aldansky District. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*. 2019;4(16):102–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.16.49746>
6. Фотиев С.М. Геокриологические летописи Сибири. *Криосфера Земли*. 2009;13(3):3–16.
Fotiyev S.M. Geocryological chronicles of Siberia. *Kriosfera Zemli*. 2009;13(3):3–16. (In Russ.)
7. Ulrich M., Matthes H., Schmidt J., et al. Holocene thermokarst dynamics in Central Yakutia – A multi-core and robust grain-size endmember modeling. *Quaternary Science Reviews*. 2019;218:10–33. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.06.010>
8. Качурин С.П. *Термокарст на территории СССР*. М.: Изд-во АН СССР; 1961. 291 с.
Kachurin S.P. *Thermokarst on the territory of the USSR*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1961. 291 p. (In Russ.)
9. Andreev A.A., Klimanov V.A., Sulerzhitsky L.D. Younger Dryas pollen records from central and southern Yakutia. *Quaternary international*. 1997;41(42):111–117.
10. Andreev A.A., Tarasov P.E. Northern Asia. In: Elias S.A. (ed.). *The Encyclopedia of Quaternary Science*, 4. Elsevier, Amsterdam. 2013, pp. 164–172. <https://doi.org/10.13140/2.1.3263.3929>
11. Fradkina A.F., Alekseev M.N., Andreev A.A., Klimanov V.A. East Siberia. In: Velichko A.A., Nechaev V.P. (eds.). *Cenozoic Climatic and Environmental Changes in Russia*. The Geological Society of America. London; 2005, pp. 105–120.
12. Андреев А.А. История растительности и климата Центральной Якутии в голоцене и позднеледниково. В кн.: *Материалы международной конференции «Озера холодных регионов»*. Часть 4: Вопросы палеоклиматологии, палеолимнологии и палеоэкологии. Якутск; Изд-во Якутского университета; 2000. С. 15–19.
13. Андреев А.А. История растительности и климата Центральной Якутии в голоцене и позднеледниково. In: *Proceedings of the Lakes of Cold Regions International Conference. Part 4: Paleoclimatology, paleolimnology and paleoecology issues*. Yakutsk: Yakutsk State University Publishing House; 2000, pp. 15–19. (In Russ.)
14. Ершов Э.Д., Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И. и др. *Основы геокриологии. Ч. 6. Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне*. М.: Изд-во МГУ; 2008. 768 с.
Ershov E.D., Garagulya L.S., Gordeeva G.I., et al. *Fundamentals of geocryology. Part 6. Geocryological fore-*

cast and environmental problems in the permafrost zone. Moscow: MSU Publishing House; 2008. 768 p. (In Russ.)

14. *Научно-прикладной справочник по климату СССР, выпуск 24, часть II, IV*. Л.: Гидрометеониздат; 1989.

Scientific and applied reference book on the climate in the USSR. Issue 24, Part II, IV. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1989. (In Russ.)

15. *Справочник по климату СССР, выпуск 24, часть II, IV*. Л.: Гидрометеониздат; 1968.

Handbook on the climate of the USSR. Issue 24, Part II, IV. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House; 1968. (In Russ.)

16. *Справочно-информационный портал «Погода и климат»*. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru>

Reference and information portal "Weather and Climate". URL: <http://www.pogodaiklimat.ru>

17. *Специализированные массивы для климатических исследований*. URL: <http://aisori-m.meteo.ru>

Specialized arrays for climate research. URL: <http://aisori-m.meteo.ru>

18. Турбина М.И. Оценка геокриологических условий долины средней Амги в связи с сельскохозяйственным освоением территории (на примере района с. Бетюнь). В кн.: Павлов А.В. (ред.). *Термика почв и горных пород в холодных регионах: Сборник научных трудов*. Якутск: ИМ СО АН СССР; 1982. С. 135–141.

Turbina M.I. Assessment of the geocryological conditions of the Middle Amga valley in connection with the agricultural development of the territory (on the example of the area of the village of Betyun). In: Pavlov A.V. (ed.). *Thermals of soils and rocks in cold regions: Collection of research papers*. Yakutsk: Permafrost Institute SB AS USSR; 1982, pp. 135–141. (In Russ.)

19. Турбина М.И. Сельскохозяйственное освоение ландшафтов с подземными льдами в Центральной Якутии. В кн.: Возин В.Ф. (ред.). *Охрана природы Центральной Якутии: Сборник научных трудов*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1985. С. 31–42.

Turbina M.I. Agricultural development of landscapes with underground ice in Central Yakutia. In: Vozin V.F. (ed.). *Nature Protection of Central Yakutia: Collection of research papers*. Yakutsk: YaF SB AS USSR; 1985, pp. 31–42. (In Russ.)

20. Босиков Н.П. Изменение климата и эволюция термокарстовых образований. В кн.: Балобаев В.Т. (ред.). *Влияние климата на мерзлотные ландшафты Центральной Якутии*. Якутск: ИМЗ СО РАН; 1996. С. 106–122.

Bosikov N.P. Climate change and evolution of thermokarst formations. In: Balobaev V.T. (ed.). *Influence of climate on the permafrost landscapes of Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1996, pp. 106–122. (In Russ.)

21. Гаврильев Р.В. *Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 1998. 280 с.

Gavriliev R.V. *Thermophysical properties of rocks and ground covers in the permafrost zone*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 1998. 280 p. (In Russ.)

22. Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Шендер Н.И. и др. *Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР; 1988. 240 с.

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

23. Новоприезжая В.А., Федоров А.Н. Модельная реконструкция грунтов Центральной Якутии в голоцене. В кн.: Мотенко Р.Г. (ред.). *Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, г. Москва, 14–17 июня 2022 г. М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. С. 9020906.*

Novopriyehzhaya V.A., Fedorov A.N. Model reconstruction of soils of Central Yakutia in the Holocene. In: Motenko R.G. (ed.) *Collection of reports of the Sixth Conference of geocryologists of Russia with participation of Russian and foreign scientists, engineers and specialists, June 14–17, 2022*. Moscow: University Book House, Dobrosvet; 2022, pp. 902–906.

24. Самсонова В.В., Федоров А.Н. Анализ мерзлотно-климатической динамики криогенных геосистем Центральной Якутии в голоцене средствами численного геокриологического прогноза. В кн.: *Климат и мерзлотные экосистемы: Труды Девятого международного симпозиума «Баланс углерода, воды и энергии и климат бореальных и арктических регионов с особым акцентом на Восточную Евразию», посвященного 25-летию начала совместных Российско-Японских исследований по изучению изменения климата в криолитозоне, г. Якутск, 1–4 ноября 2016*. Якутск; 2016. С. 232–235.

Samsonova V.V., Fedorov A.N. Analysis of permafrost-climatic dynamics of cryogenic geosystems in Central Yakutia in the Holocene by means of numerical geocryological forecasting. In: *Climate and permafrost ecosystems: Proceedings of IXth International Symposium "C/H₂O/energy balance and climate over the boreal and Arctic regions with special emphasis on Eastern Eurasia" dedicated to the 25th anniversary of the joint Russian-Japanese research on climate change in the cryolithozone, Yakutsk, 1–4 November 2016*. Yakutsk; 2016, pp. 232–235. (In Russ.)

25. Величко А.А. *Климаты и ландшафты Северной Азии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарии*. Вып. III. М.: ГЕОС; 2010. 220 с.

Velichko A.A. *Climates and landscapes of Northern Eurasia under conditions of global warming. Retrospective analysis and scenarios. Issue III*. Moscow: GEOS; 2010. 220 p. (In Russ.)

26. Климанов В.А. Палеоклимат Северной Евразии при повышении среднеглобальной температуры

на 0,6–0,8 °С. В кн.: *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. *Climates and landscapes of Northern Eurasia under conditions of global warming. Retrospective analysis and scenarios*. Issue. III. Moscow: GEOS; 2010, pp. 70–86. (In Russ.)

27. Босиков Н.П. Аласность Центральной Якутии. В кн.: Некрасов И.А., Климовский И.В. (ред.). *Геокриологические условия в горах и на равнинах Азии*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения; 1978. С. 113–118.

Bosikov N.P. Alasnost of Central Yakutia. In: Nekrasov I.A., Klimovskii I.V. (eds.) *Geocryological condi-*

tions in the mountains and plains of Asia. Yakutsk: Permafrost Institute, 1978, pp. 113–118. (In Russ.)

28. Каплина Т.Н. Аласные комплексы Северной Якутии. *Криосфера Земли*; 2009;13(4):3–17.

Kaplina T.N. Alas complexes of North Yakutia. *Kriosfera Zemli*. 2009;13(4):3–17. (In Russ.)

29. Katamura F., Fukuda M., Bosikov N.P., et al. Thermokarst formation and vegetation dynamics inferred from a palynological study in central Yakutia, Eastern Siberia, Russia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2006; 38(4):561–570.

30. Katamura F., Fukuda M., Bosikov N.P., Desyatkin R.V. Charcoal records from thermokarst deposits in central Yakutia, eastern Siberia: Implications for forest fire history and thermokarst development. *Quaternary Research*. 2009;71:36–40.

Об авторах

НОВОПРИЕЗЖАЯ Варвара Андреевна, младший научный сотрудник, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-4632-9840>, SPIN: 4245-5312, e-mail: schwarz999@mail.ru

ФЕДОРОВ Александр Николаевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по науке, ResearcherID: K-2478-2016, Scopus Author ID: 22957332600, <https://orcid.org/0000-0002-4016-2149>, 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, <https://orcid.org/0000-0003-4632-9840>, SPIN: 4245-5312, e-mail: schwarz999@mail.ru

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

Authors' contribution

Novopriezzhasya V.A. – conceptualization, methodology, validation, investigation, data curation, writing original draft, editing, visualization

Fedorov A.N. – conceptualization, editing, supervision, project administration, funding acquisition

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 03.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2024

Принята к публикации / Accepted 23.04.2024