

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ

УДК 551.345 (235.223)
DOI: 10.15372/KZ20250402
EDN: GXFXKE

КРИОЛИТОЗОНА ОКИНСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ: ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ИХ ИЗМЕНЧИВОСТЬ В СВЯЗИ С ДИНАМИКОЙ КЛИМАТА

С.В. Алексеев¹, Л.П. Алексеева^{1,*}, Ю.К. Васильчук², А.А. Светлаков¹,
В.А. Пеллинен¹, Е.С. Королёва³

¹Институт земной коры СО РАН, лаборатория гидрогеологии, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

³ГАУ Ямало-Ненецкого автономного округа "Научный центр изучения Арктики", 629007, Салехард, ул. Республики, 20, Россия

*Автор для контакта; e-mail: lalex@crust.irk.ru

Представлены результаты исследований мерзлых горных пород на Окинском плоскогорье в Восточных Саянах. Комплекс научно-исследовательских работ, выполненных в долине р. Сенца, включал параметрическое бурение, режимные геотермические наблюдения в скважинах, криолитологический анализ рыхлых отложений и петрографические исследования подземных льдов с определением их структурно-генетических особенностей. Установлено, что геологический разрез до глубины 45 м представлен глинами, суглинками, супесями и песками с прослоями и линзами льда. Мощность многолетнемерзлых пород в долине р. Сенца не превышает 44 м, а их среднегодовая температура на глубине 10 м составляет $-1.1...-2.1$ °C. Параметры структуры подземных льдов указывают на их сегрегационный и инъекционный генезис. Устойчивый многолетний положительный тренд среднегодовой температуры воздуха на Окинском плоскогорье способствует постепенному повышению температуры мерзлых отложений в слое годовых теплооборотов, разрушению ледоминальных бугров пучения и опусканию их кровли.

Ключевые слова: многолетнемерзлые рыхлые отложения, криогенные текстуры, температурный режим, бугры пучения, подземные льды, долина реки Сенца, Окинское плоскогорье.

Ссылка для цитирования: Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Васильчук Ю.К., Светлаков А.А., Пеллинен В.А., Королёва Е.С. Криолитозона Окинского плоскогорья: основные параметры и их изменчивость в связи с динамикой климата // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 4, с. 22–36. DOI: 10.15372/KZ20250402. EDN: GXFXKE.

PERMAFROST OF THE OKA PLATEAU:
KEY PARAMETERS AND THEIR VARIABILITY DUE TO CLIMATE DYNAMICS

S.V. Alexeev¹, L.P. Alexeeva^{1,*}, Yu.K. Vasil'chuk², A.A. Svetlakov¹, V.A. Pellinen¹, E.S. Koroleva³

¹Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lermontov St. 128, Irkutsk, 664033 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of landscape geochemistry and geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

³Arctic Research Center of the Yamal-Neenets Autonomous District, Republic St. 20, Salekhard, 629007 Russia

*Corresponding author; e-mail: lalex@crust.irk.ru

This article presents the results of the permafrost research of the Oka Plateau in the Eastern Sayan Ridge. The complex of scientific research works carried out in the Sentsa River valley involved parametric drilling, geothermal regime observations in boreholes, cryolithological analysis of unconsolidated sediments, and petrographic studies of ground ice, as well as its structural and genetic features. It was established that the geological section down to 45 m consists of clays, clayey silts, silts and sands with ice interlayers and lenses. Permafrost thickness in the Sentsa River valley does not exceed 44 m, and a mean annual ground temperature at a depth of 10 m ranges from -1.1 to -2.1 °C. The parameters of the structure of ground ice indicate its segregation and injection origin. The stable multi-year positive trend in the mean annual air temperature on the Oka Plateau contributes to a gradual increase of the frozen sediments temperature in the layer of annual heat fluctuation, the destruction of ice-mineral frost mounds and the lowering of the surface.

Keywords: frozen unconsolidated sediments, cryogenic structures, temperature regime, frost mounds, ground ice, Sentsa River valley, Oka Plateau.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования мерзлоты в долине реки на Окинском плоскогорье (Восточный Саян) начаты авторами в 2011 г. Часть результатов о литологическом составе, криогенном строении и температуре озерно-аллювиальных отложений в долине р. Сенца, химическом и изотопном составе подземных льдов в буграх пучения, механизмах формирования бугров пучения опубликована в 2021 г. [Alexeev et al., 2021].

В дальнейшем усилия авторов были направлены на установление основных параметров криолитозоны: мощности многолетнемерзлых пород (ММП), их температурного режима, криогенного строения отложений, текстурных особенностей и строения подземных льдов в буграх пучения, глубины залегания водоносных горизонтов. Особое внимание уделялось изучению реакции мерзлоты на современное изменение климата.

РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Окинское плоскогорье (абс. высота 1800–2400 м) занимает восточную часть Алтае-Саянской горной страны. Климат региона – умеренный, резко континентальный с коротким и относительно теплым летом. Зимой в регионе доминирует мощный Сибирский антициклон, летом погоду контролирует западный атмосферный перенос. Среднегодовая температура воздуха отрицательная и в зависимости от абсолютной высоты изменяется от -5.6°C (1372 м) до -6.6°C (2084 м). Зимой в среднем выпадает около 70 мм осадков, летом – около 370 мм [Научно-прикладной справочник..., 1991; Безрукова и др., 2022]. Снежный покров маломощный, всего 20–60 см в днищах речных долин [Геокриология СССР..., 1989], что приводит к глубокому промерзанию подстилающих пород. Постоянный снежный покров формируется уже в октябре и начинает таять в середине апреля.

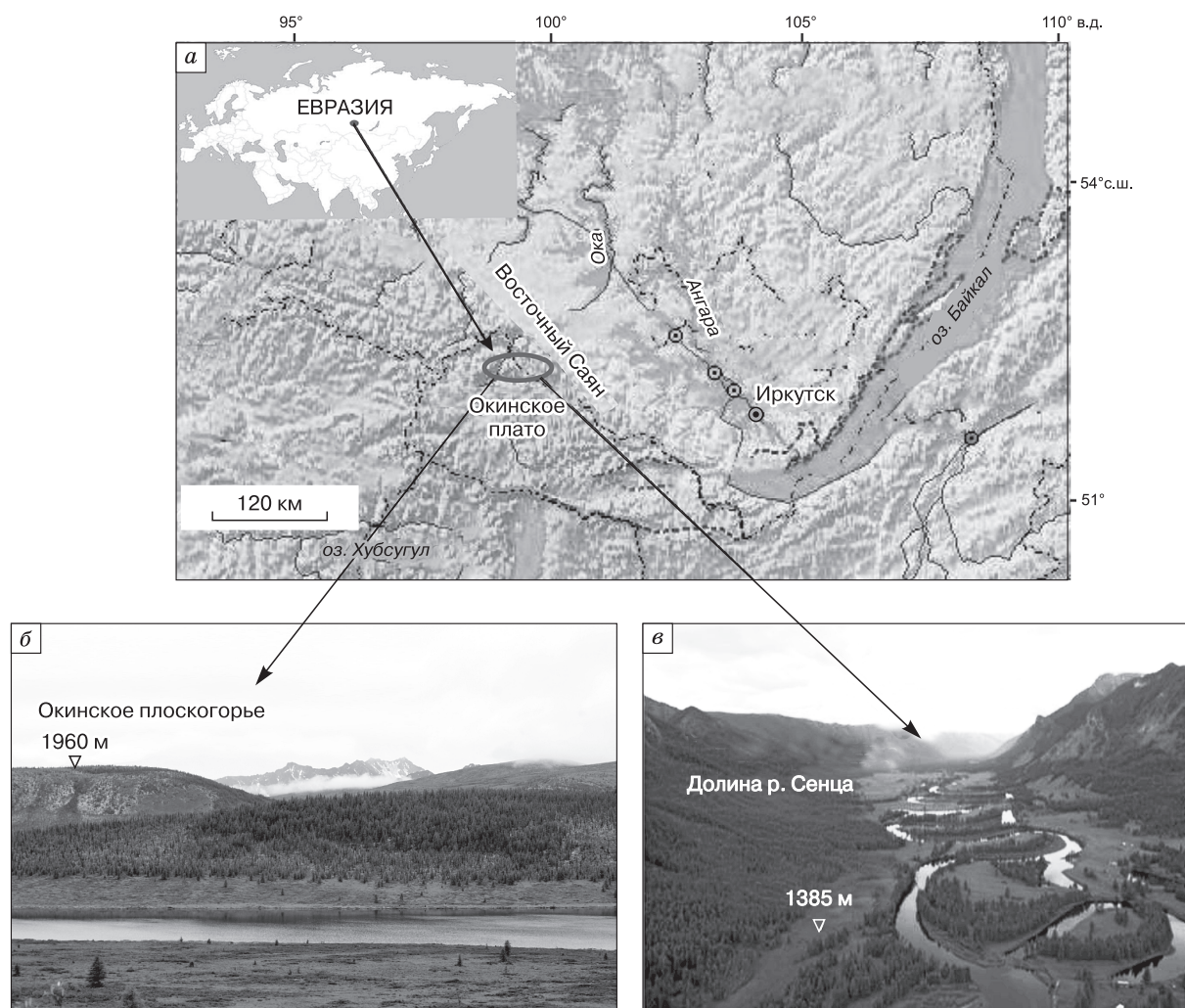


Рис. 1. Местоположение района исследований (а) и морфология Окинського плоскогорья (б) и долины р. Сенца (в) с абсолютными отметками местности.

Фотографии сделаны с помощью БПЛА.

По многолетним данным метеостанции Орлик, расположенной в 36 км от участка исследований ($52^{\circ}34'44''$ с.ш., $99^{\circ}49'38''$ в.д., 1375 м), среднегодовая температура воздуха за период 1935–2023 гг. изменялась от -6.9 до -2.1 °С. Абсолютный минимум среднесуточной температуры воздуха -42.2 °С, абсолютный максимум $+22.8$ °С.

Окинское плоскогорье сложено докембрийскими и раннепалеозойскими породами. Плоскогорье прорезано троговыми долинами рек Ока, Тисса, Сенца, Жомболок, выполненными четвертичными отложениями. Имеющиеся публикации свидетельствуют о масштабном позднеплейстоценовом оледенении юга Восточного Саяна [Кропоткин, 1867; Перетолчин, 1908; Обручев, 1953; Nemchinov et al., 1999; Arzhannikov et al., 2012, и др.]. В голоцене при отступании ледников в долинах формировались подпрудные озера. После их спуска происходило прогрессирующее всестороннее промерзание водонасыщенных рыхлых отложений, формирование бугров пучения на значительной площади и специфического криогенного рельефа.

Исследования авторов в течение нескольких лет были сосредоточены в долине р. Сенца – притока р. Оки, которая прорезает Окинское плоскогорье на глубину 800 м (рис. 1). Долина р. Сенца представляет собой классический трог с элемен-

тами ледникового рельефа в виде боковых и конечных морен позднеплейстоценового возраста [Олюнин, 1965] и интенсивно меандрирующим руслом реки.

В днище долины широко распространены бугры пучения и туфуры (рис. 2). Размеры бугров пучения различны: высота от 3 до 15 м, диаметр от 10 до 30 м. Туфуры представлены мелкими буграми, покрытыми травянистой растительностью, высотой 0.4–0.5 м и диаметром 0.5–0.9 м. Они сложены голубоватой супесью, которая перекрыта почвенным слоем мощностью 0.1–0.2 м.

Отложения, выполняющие долину реки, представлены глинами, суглинками, супесями, песками, галечниками, валунами.

Согласно немногочисленным опубликованным данным [Соловьева, 1976; Геокриология СССР..., 1989], криолитозона в пределах Окинского плоскогорья имеет сплошное распространение с тенденцией сокращения занимаемой площади в западном и северо-северо-восточном направлениях (рис. 3). Для региона характерно широкое развитие сквозных таликов с постоянно действующими источниками подземных вод, которые приурочены к зонам разломов, и несквозных таликов под руслами рек и озерами.

Мощность ММП изменяется от 50 до 300 м, среднегодовая температура пород опускается

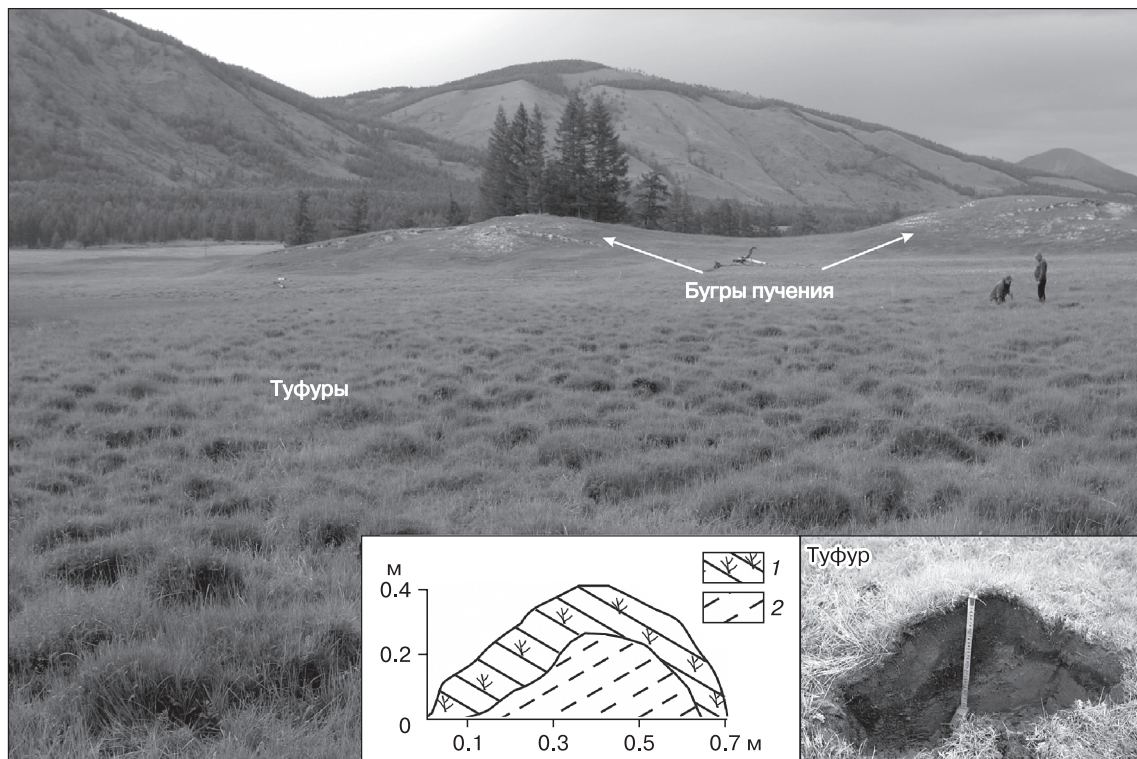


Рис. 2. Бугры пучения и туфуры в долине р. Сенца.

На врезке показан разрез туфура и эскиз с его размерами и составом. 1 – почвенный слой; 2 – супесь.

ниже -2°C (примерно на глубине 15–20 м), достигая -7°C в толще ММП максимальной мощности, которая свойственна наиболее высоким частям хребтов, приподнятым возвышенностям и водоразделам. Мощность сезонноталого слоя, согласно тем же публикациям, на плоских водоразделах рек Сенца, Тисса, Ока составляет 1.0–1.5 м, а на пониженных участках иногда не превышает нескольких сантиметров. Результаты авторских наблюдений за изменением глубины сезонного протаивания отложений в долине р. Сенца на различных элементах рельефа изложены ниже.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу исследования положены материалы полевых работ 2016–2024 гг., которые включали бурение скважины глубиной 45 м и изучение талого и мерзлого керна, расчистку одного из бугров пучения в речном уступе с отбором образцов грунта и проб льда, структурно-генетический и криолитологический анализы подземных текстуробразующих льдов и рыхлых отложений, а также режимные геотермические наблюдения в скважинах, пробуренных авторами ранее в долине р. Сенца (см. рис. 3).

Опорная скважина Se-20–скв. 5 (глубиной 45 м) пробурена 12–13 сентября 2020 г. с использованием буровой установки УРБ 2А2 (ООО ИНГЕО, г. Иркутск) на первой надпойменной террасе в 100 м от русла р. Сенца. Отбор керна осуществлялся через 0.5–0.8 м. Первоначальный диаметр бурения составил 151 мм до глубины 2.5 м (ниже глубины сезонного протаивания) с установкой металлической обсадной трубы диаметром 146 мм. Ниже диаметр бурения составил 132 мм короткими рейсами всухую до забоя. После завершения бурения скважина обсажена пластиковой трубой диаметром 50 мм до глубины 30.5 м. Затрубное пространство заполнено среднезернистым песком. Режимные геотермические наблюдения проводились также в двух скважинах глубиной 20.4 м (Se-16–скв. 1) и 13.4 м (Se-15–скв. 2), пробуренных ранее (2015 и 2016 гг.) в центральных частях бугров пучения. Расстояние между скважинами составляет 240 м. Все скважины были оборудованы четырехканальными логгерами НОВО UA-12-008 с диапазоном измерений от -20 до $+70^{\circ}\text{C}$, точностью $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ при температуре от 0 до $+50^{\circ}\text{C}$. Для оценки динамики температуры пород в слое годовых теплооборотов и ниже его датчики установлены на глубине: 1, 5, 10, 20 и 30 м. Дополнительно измерения температуры выполнялись в приповерхностном слое 0.1 м, поскольку на участке развит растительный покров, представленный в основном степными и луговыми травами. Регистрация и запись значений температуры горных пород производились непрерывно каждый час. Термоизоплеты построены на ос-

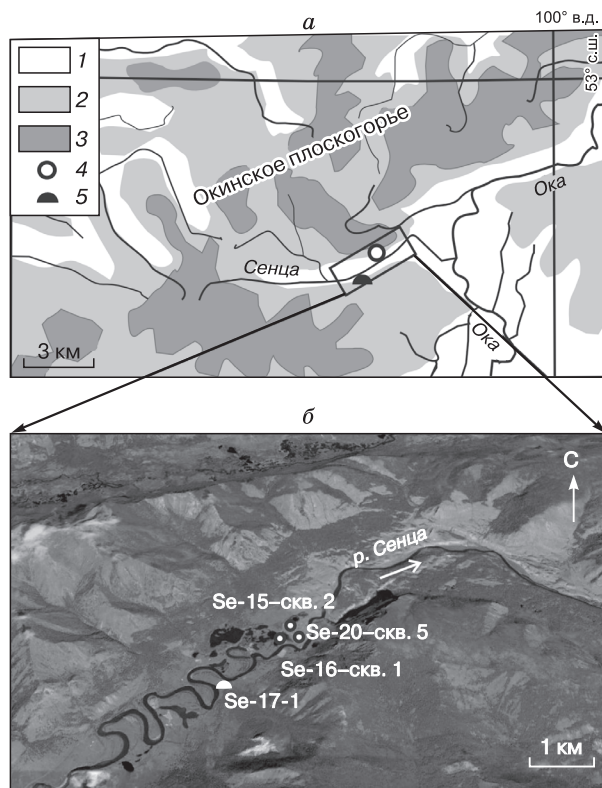


Рис. 3. Распространение многолетнемерзлых пород в горах и долинах Окинское плоскогорье (фрагмент Геокриологической карты СССР [1996], с упрощением) (а) и участок исследований (б).

1 – преимущественно сплошная мерзлота мощностью до 100 м и температурой пород $t_{\text{пор}} = -2...-0.5^{\circ}\text{C}$; 2 – преимущественно сплошная мерзлота мощностью до 150 м, $t_{\text{пор}} = -5...-1^{\circ}\text{C}$; 3 – сплошная мерзлота мощностью до 300 м, $t_{\text{пор}} = -7...-3^{\circ}\text{C}$; 4 – скважина Se-20–скв. 5; 5 – бугор пучения Se-17-1.

нове расчета значений среднегодовой температуры пород за гидрологический год с помощью программного пакета Surfer-10 методом интерполяции Kriging по четырем глубинам.

Суммарная влажность мерзлых отложений измерена точечным методом [ГОСТ 5180-2015..., 2016]. Для названий отложений по преобладающей фракции в разрезах, вскрытых расчистками и скважинами, использована классификация И.П. Иванова [1990].

Для исследования структурно-текстурных характеристик льда из расчистки бугра пучения бензопилой “Metabo” выпилены монолиты чистого льда из линзы и подстилающего мерзлого суглинка (размером $25 \times 25 \times 25$ см), упакованы в полиэтиленовый пакет и в мерзлом состоянии доставлены в Институт криосферы Земли СО РАН (г. Тюмень). Исследование текстуры и структуры льдов в ориентированных шлифах выполнено пет-

рографическим методом [Шумский, 1955; Савельев, 1963] в проходящем и поляризованном свете в поляроиде диаметром 12 см [Рогов, 2009]. Метод основан на оптических свойствах льда, одно из которых – двулучепреломление, т. е. разложение поляризованного луча света в толще кристалла на два луча под углом 90° с постоянным и переменным показателями преломления. Это свойство хорошо проявляется в тонкой пластинке льда, поэтому из монолитов были изготовлены прозрачные пластины и шлифы толщиной 0.5–1.0 мм в трех срезах: вертикальные фронтальный “а”, поперечный “б”, горизонтальный “с”. Под поляризованным светом каждый кристалл приобретает свою интерференционную окраску, что позволяет судить о его размерах, форме и ориентировке в шлифе. Размер кристаллов определялся в диагональном сечении, размерность указана в сантиметрах.

Радиоуглеродный анализ выполнен в Аналитическом центре изотопных исследований Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН, г. Томск) на основе жидкостного сцинтилляционного метода с использованием спектрометра-радиометра Quantulus (ТомЦКП СО РАН). Калибровка радиоуглеродного возраста к календарному производилась с помощью программы CALIB REV-8.20.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строение мерзлых пород. Строение ММП на слабонаклонной, местами заболоченной первой надпойменной террасе р. Сенца подтверждено данными бурения первой опорной скважины Se-20–скв. 5 ($52^\circ 39' 50.11''$ с.ш., $99^\circ 30' 03.54''$ в.д., 1380 м) (рис. 4).

Кровля мерзлоты вскрыта на глубине 1.1 м, а подошва ММП – на глубине 44 м. Криотекстуры преимущественно редкошлировые, массивные, но встречаются прослои и шлиры льда толщиной до 5–8 см (через 30–40 см, иногда 50–60 см). Лыдистость (влажность) отложений уменьшается с глубиной от 84–114 % (в интервале 1.5–4.5 м) до 20–33 % (в интервале 4.5–44 м).

На глубине 44 м вскрыт напорный водоносный горизонт, водовмещающие породы представлены пылеватыми супесями и песками. Уровень воды установился на глубине 27.3 м, напор над кровлей горизонта составил 16.7 м.

Гранулометрический состав керна скважины и последовательность осадконакопления в озерном палеоводоеме подробно описаны в работе [Алексеев и др., 2024]. В разрезе рыхлых отложений (до глубины 44 м) преобладают суглинки средней и плохой сортировки, которые переслаиваются преимущественно с супесями хорошей, средней и плохой сортировки, хорошо сортированными песками и редко – с глинами средней и

плохой сортировки. Такое чередующееся накопление прослоев глин, суглинков, супесей и песков различной мощности обусловлено многократным изменением режима седиментации в подпрудном озере в течение голоцена при немаловажном значении колебания уровня воды в палеоозере, которое было вызвано сезонными факторами (весенним половодьем, летними паводками) либо сейсмогенными и тектоническими факторами (землетрясения, обвалы, оползни).

Радиоуглеродный анализ образца керна из скважины (супесь голубовато-серая с растительными остатками, ИМКЭС– $^{14}\text{C}2215$) с глубины 1.5 м показал датировку (3510 ± 120) лет (калиброванный медианный возраст –1838 ВС или 3788 кал. лет ВР, где ВР – 1950 г. н.э.). Этот результат подтверждает существование открытого водоема в позднем голоцене. Согласно расчетам, средняя скорость осадконакопления в позднем голоцене в озере составила 0.4 мм/год. Предыдущими исследованиями установлено, что активное формирование почвенных горизонтов после осушения палеоозера стартовало лишь 500–200 лет назад [Васильчук и др., 2019; Alexeev et al., 2021]. В это время на осушенных участках началось промерзание, образование относительно молодой многолетней мерзлоты, активное пучение и формирование бугров пучения.

Строение мерзлых пород в бугре пучения.

Расчистка бугра пучения Se-17-1 с ледяным ядром позволила выявить особенности литологического состава отложений и строение аллювиально-озерной толщи (рис. 5). Бугор пучения высотой около 3.5–4.0 м и диаметром около 30 м расположен на надпойменной террасе высотой 11 м в уступе правого берега р. Сенца ($52^\circ 39.24'$ с.ш., $99^\circ 29.06'$ в.д., 1399 м).

Детальный литологический разрез бугра пучения и криогенное строение многолетнемерзлых пород, слагающих бугор, представлены на рис. 6. В целом бугор пучения до глубины 1.1 м сложен светло-серой супесью, ниже до уреза воды – голубовато-серым суглинком. Под кровлей мерзлоты, которая зафиксирована на глубине 1.1 м, обнаружена ледяная линза мощностью по вертикали 0.82 м с субгоризонтальной нижней границей и выпуклой верхней поверхностью. Криогенная текстура нижележащего суглинка изменяется вниз по разрезу от атакситовой (с лыдистостью более 110 %) к блоковой и крупношлировой (с лыдистостью до 40 %) до массивной на глубине 15.6 м от поверхности (с лыдистостью до 10 %).

Строение и генезис ледяных прослоев. С помощью поляроида в проходящем и поляризованном свете исследованы структурно-текстурные особенности подземного льда в бугре пучения Se-17-1. Образцы чистого льда отобраны из ледяной линзы с глубины 1.3 м. Лед состоит из мелких

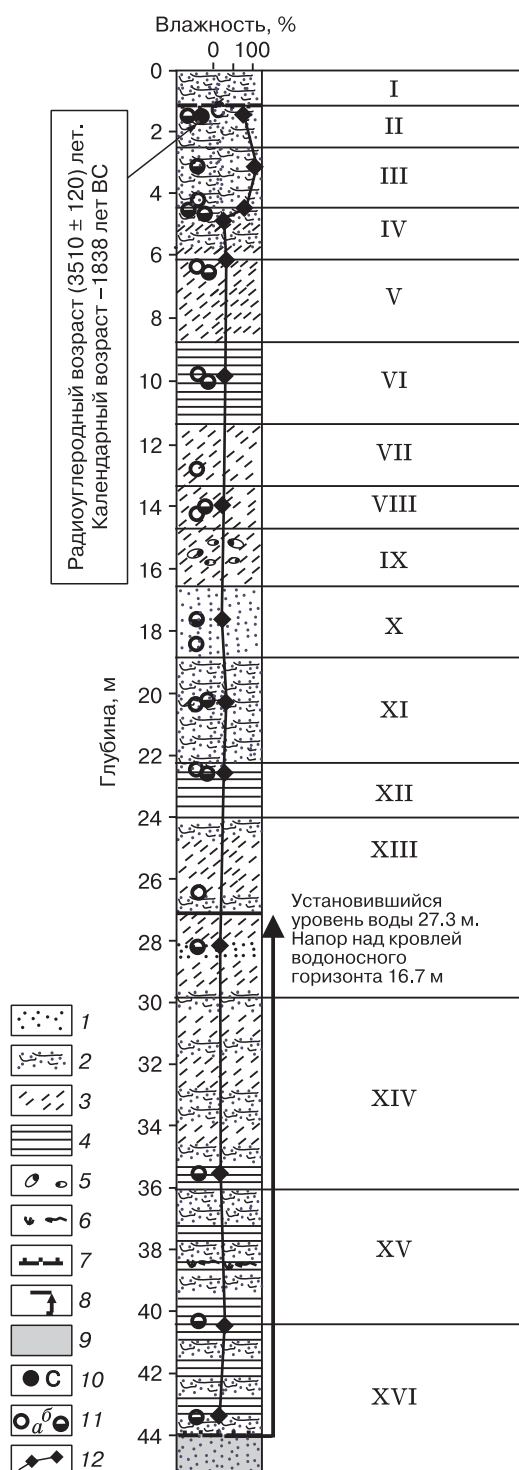


Рис. 4. Литологический состав и криогенное строение разреза скважины Se-20–скв. 5, пробуренной в долине р. Сенца.

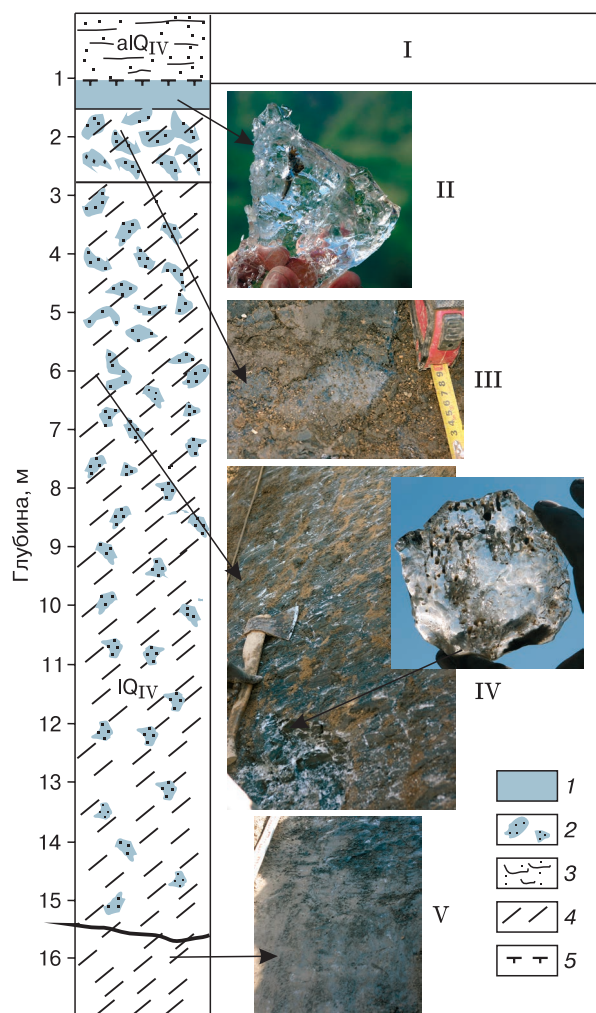
I – супесь пылеватая, светло-коричневая, талая; II – супесь голубовато-серая, пылеватая, мерзлая, криотекстура косо-слоистая, толщина шпиров 0.5–0.7 до 1 см; III – супесь пылеватая, серо-коричневая, криотекстура тонкошпировая, горизонтально- и косослоистая, шпирь редкие, расстояние между ними 6–20 см; IV – супесь легкая голубовато-серая, криотекстура массивная с прослоями суглинков толщиной 1.0–1.5 см; V – суглинок тяжелый, пылеватый, голубовато-серый, криогенная текстура горизонтально- и косослоистая, толщина прослоев льда 0.5 см, встречаются гнезда льда; VI – глина пылеватая, голубовато-серая, уплотненная, криотекстура косо-слоистая, редкие прослои льда (угол наклона 30°) толщиной 0.5 см, расстояние между прослоями 25–30 см; VII – суглинок голубовато-серый, редкие горизонтальные прослои льда толщиной до 0.1 см через 30–40 см. Лыдность очень низкая; VIII – суглинок пылеватый, голубовато-серый, иногда с прослоями песка, криотекстура редкошпировая, толщина шпиров до 5 см, расстояние между ними 30–40 см; IX – суглинок голубовато-серый с редкими прослоями тонких ледяных шпиров, с включениями гальки (1.5 × 2.5 см). На глубине 16.5 м четкая граница с песком; X – песок голубовато-серый, криотекстура массивная. Редкие прослои льда через 30–40 см. На глубине 18.8 м размытая граница с суглинком; XI – супесь тяжелая, пылеватая, голубовато-серая с редкими прослоями тонких шпиров льда. На глубине 20.5 м прослой дегрунта мощностью 6 см, толщина ледяных прослоев до 1.5 см, лед прозрачный с пузырьками воздуха. На глубине 22.3 м прослой чистого льда мощностью 8 см; XII – глина пылеватая, голубовато-серая; XIII – суглинок голубовато-серый с прослоями супеси толщиной 50–60 см через 60–70 см. Криотекстура суглинка и супеси массивная. Встречаются прослои льда толщиной до 1 см (иногда до 3.5–4 см) через 50–60 см. На глубине 28.2 м прослой мелко- и среднезернистого песка толщиной 10 см; XIV – супесь голубовато-серая с прослоями суглинка толщиной около 10 см, с редкими горизонтальными прослоями льда толщиной 0.1–0.4 см через 20–60 см. В интервале 30.0–31.2 м прослой суглинка, состоящий из тонких слоев темного и светлого цвета, сложно изогнутых. В интервале 35.5–36.8 м глина пылеватая; XV – супесь с прослоями глины пылеватой толщиной около 10 см через 40–50 см. Криотекстура массивная. На глубине 38.5 м тонкий прослой органики; XVI – глина пылеватая с прослоями супеси толщиной 0.1–1.0 см через 60 см. Криотекстура массивная. В интервале 40.4–43.1 м чередуются слои глины талой и супеси мерзлой. Толщина прослоев глина 60 см, прослоев супеси 40 см. На глубине около 44.0 м вскрыт водоносный горизонт. Водоносные отложения – пески голубовато-серые. Подземные воды напорные, уровень установился на глубине 27.3 м. 1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – глина; 5 – галька; 6 – органика (растительные остатки); 7 – кровля (берштрихи вниз) и подошва (берштрихи вверх) ММП; 8 – глубина вскрытия воды и установившийся уровень над кровлей водоносного горизонта; 9 – водоносный горизонт; 10 – место отбора образца на радиоуглеродный анализ; 11 – места отбора проб льда (а) и образцов горных пород на грансостав (б); 12 – кривая влажности отложений (%).

и крупных изометричных кристаллов, неравномерно насыщенных газовыми пузырьками. Крупные кристаллы (от 1.5 до 7 см) с неупорядоченной ориентировкой оптических осей (рис. 7) образова-

лись в ходе медленного промерзания свободной воды. Более мелкие кристаллы (0.01–0.5 см) и скопление пузырьков газа (круглые до 0.1–0.2 см и продолговатые до 0.5 см) свидетельствуют о не-



Рис. 5. Бугор пучения Se-17-1 на правом берегу р. Сенца (а – вскрытый разрез, б – общий вид).



равномерном промерзании: льдовыделение способствовало отжатию воздуха и скоплению пузырьков в отдельных прослоях.

Расположение гроздьев (размером до 3 см) газовых пузырьков в горизонтальном срезе отвечает однонаправленному (снизу вверх), но очень медленному замерзанию свободной воды, находящейся под гидростатическим давлением [Курчатова, Рогов, 2020], т. е. инъекции. Внедрение подземных вод в промерзающие или мерзлые рыхлые отложения приводило к формированию микроstructures ледяных линз, которая характеризует-

Рис. 6. Литологический состав и криогенное строение бугра пучения Se-17-1.

I – супесь светло-серая, талая с включениями угля (сгоревшие стволы деревьев) диаметром 10 см и стволов деревьев и веток; II – лед чистый, прозрачный, иногда молочно-белый, насыщен пузырьками газа (1–3 мм), некоторые пузырьки подвижны; III – на глубине 1.54 м – четкий и волнистый контакт с ледогрунтом. В нижележащей толще льда “плавают” блоки и прослои темно-серого суглинка размером 5–7 см. Криотекстура атакситовая. Размер ледяных ячеек 5 × 4 и 6 × 10 см. Лedyистость составляет 86–107 %; IV – с глубины 2.8 м размеры ледяных ячеек увеличиваются до 10 × 15 см, грунтовых прослоев становится больше, толщина ледяных шпиров составляет 1.0–1.5 см. Лedyистость уменьшается до 30–40 %. Криотекстура изменяется сверху вниз от блоковой к крупношпировой и линзовидно-слоистой. Лед в ячейках прозрачный, насыщен пузырьками газа, собранными в гроздьи и скопления разного размера; V – с 15.6 м суглинок голубовато-серый, мерзлый. Криотекстура массивная. Контакт неровный, наклонно вогнутый.

1 – лед; 2 – ледяные ячейки; 3 – супесь; 4 – суглинок; 5 – кровля ММП.

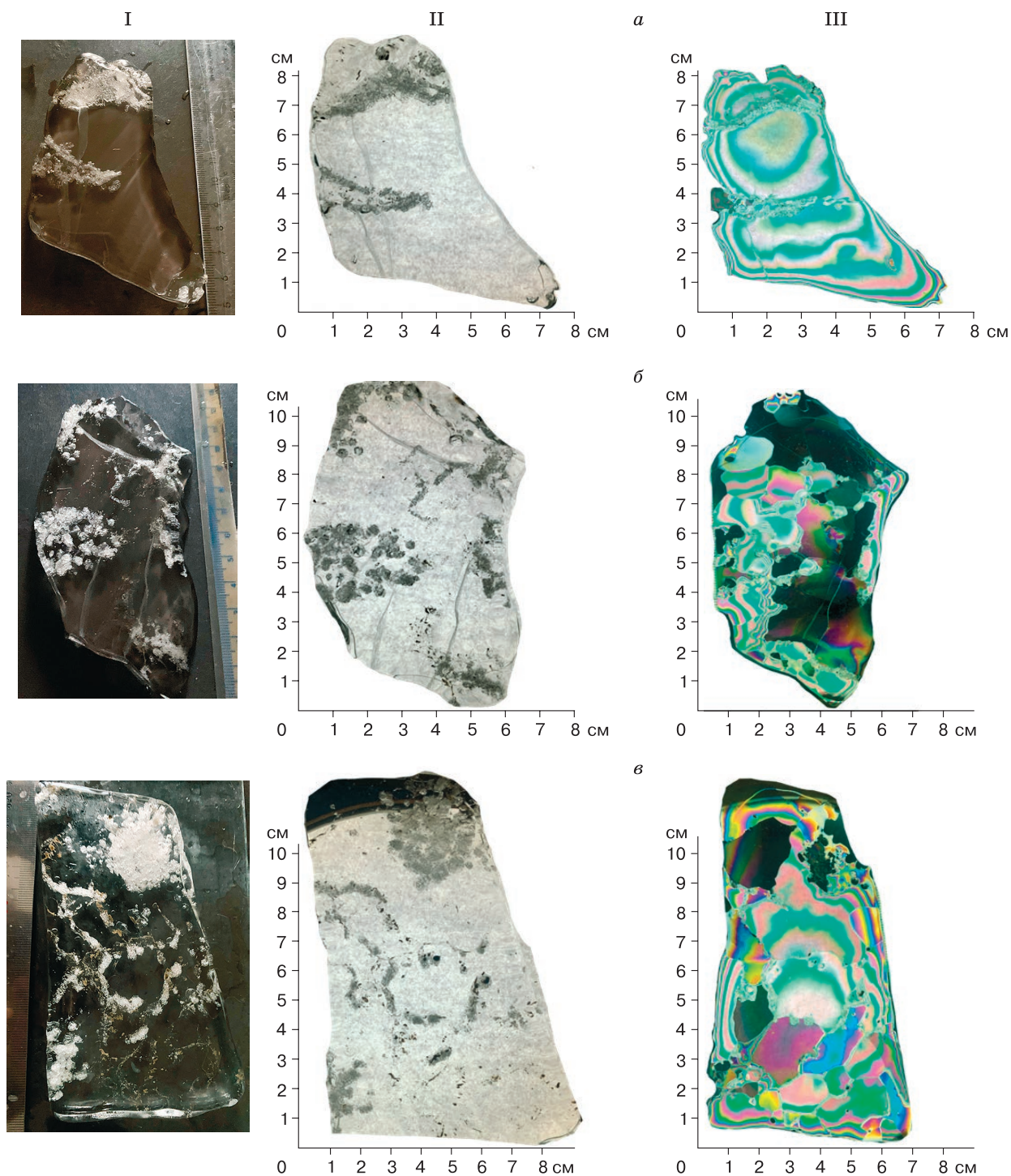


Рис. 7. Фото образцов льда (I) и шлифы, демонстрирующие структурно-текстурные особенности ледяного ядра инъекционного генезиса в бугре пучения в проходящем свете (II) и поляризованном свете (III).

Вертикальные срезы: а – фронтальный, б – поперечный, в – горизонтальный.

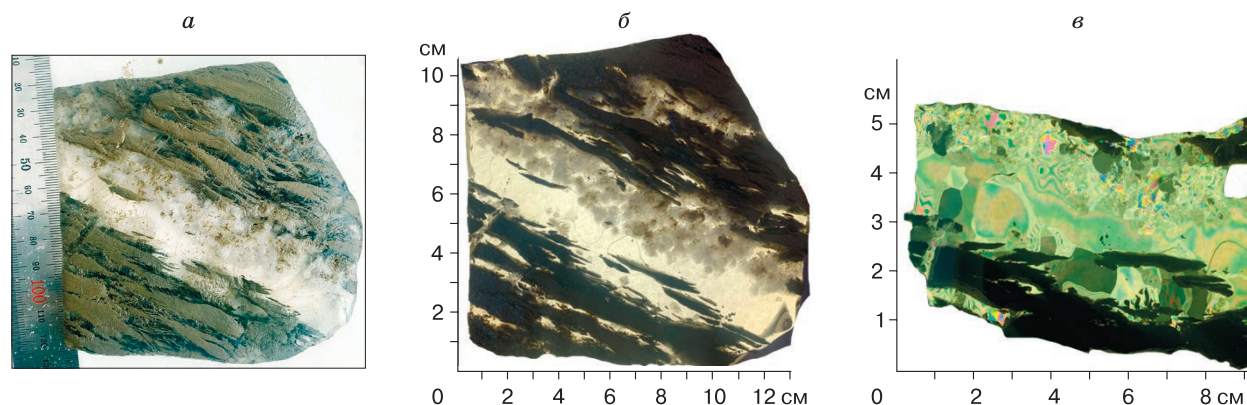


Рис. 8. Фото образца мерзлого суглинка (а) и шлифы, демонстрирующие структурно-текстурные особенности льда сегрегационного генезиса в бугре пучения (б – фронтальный срез, в – в поляризованном свете).

ся [Втюрина, Втюрин, 1970]: а) пузырьчатостью, т. е. насыщенностью льда пузырьками воздуха; б) субгоризонтальной слоистостью, подчеркнутой слоями крупных и мелких ледяных кристаллов; в) цепочками и галереями мелких кристаллов, вытянутых по вертикали; г) отсутствием твердых примесей (в идеале). Эти структурные особенности ледяной линзы прослеживаются в изученном бугре пучения, формирование которого происходило в результате промерзания водонасыщенных рыхлых отложений на надпойменной террасе с вероятным притоком воды извне (возможно, из подруслового талика). Важно подчеркнуть, что процесс инъекционного льдообразования определяется формированием и заполнением водой полости в породе под гидростатическим давлением у поверхности. Линза воды сохраняется на всем протяжении развития инъекции. Кристаллизация происходит медленно (в течение десятилетий), фронт промерзания на начальном этапе движется сверху вниз, а на заключительном может двигаться и сверху, и снизу [Соломатин, 1986].

Промерзание обусловило создание криогенного напора грунтовых вод, их внедрение в мерзлые толщи с последующим образованием линзы льда в растущем бугре пучения (с возможным захватом минеральных частиц) и формированием атакситовых полновыраженных криогенных текстур под линзой (см. рис. 6). Подобный интрузивный механизм образования ледяных линз был предложен ранее авторами настоящей статьи на основе гидрогеохимических и изотопных исследований [Алексеев, Алексеева, 2018; Vasil'chuk et al., 2016].

Признаки сегрегационного льдовыделения (определенная ориентировка и форма кристаллов льда, небольшой объем ледяного тела, слоистая криотекстура вмещающих отложений) были ус-

тановлены в мерзлых суглинках ниже в разрезе (с глубины 2.8 м). Лед в массиве образует крупношлировую, местами линзовидно-слоистую криогенную текстуру (см. рис. 6), которая прослеживается в шлифе с крупным шлиром льда толщиной до 4 см в центральной его части (рис. 8).

В верхней части ледяного штира на контакте с суглинком находится скопление мелких кристаллов льда неправильной формы и газовых пузырьков с минеральными включениями. В поляризованном свете четко выражены слои с разными размерами ледяных кристаллов: на контакте с суглинком кристаллы имеют размеры от 0.5 до 1.5 см, ниже залегает ряд кристаллов с размерами от 0.5 до 2.5 см. Рассеянные минеральные включения зажаты между кристаллами или заключены в них. Расслоение и изгибание прослоек суглинка вызвано ростом мелких сегрегационных кристаллов, которые имеют правильную прямоугольную форму и выстроены в одну цепочку между линзами.

Ориентировка, форма и размер микрокристаллов льда в ледяных штирах совместно с литологическими особенностями вмещающих суглинков (уплощенной формой частиц и их параллельно-слоистой текстурой) указывают на сегрегационное выделение льда на глубине 2–3 м и ниже при формировании бугра пучения. Механизм формирования сегрегационного льда обусловлен криосакцией (подтягиванием жидкости за счет отрицательного давления), миграцией незамерзшей воды, перераспределением влажности при продвижении фронта промерзания, медленной скоростью промерзания и глубиной льдообразования не более 10 м [Gurney, 2001].

Оценка реакции криолитозоны на современные изменения климата. Режимные наблюдения в скважинах. Выполненные геотермиче-

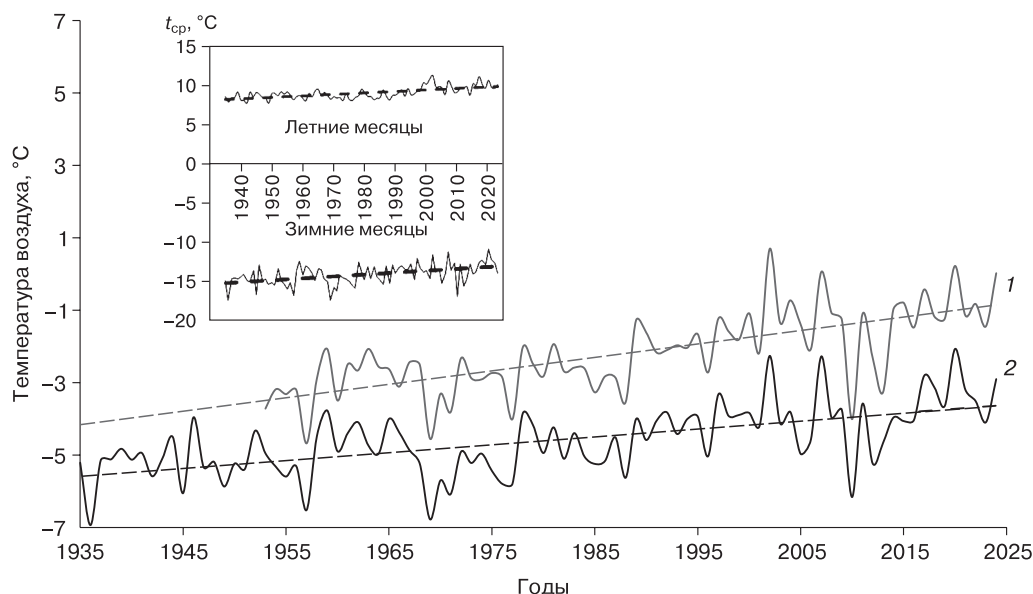


Рис. 9. Среднегодовая температура воздуха (t_{cp}) и тренды ее изменения на Окинском плоскогорье.

За период 1935–2024 гг. – по данным метеостанции Орлик (2), за 1952–2024 гг. – по данным метеостанции Кырен (1). На врезке – t_{cp} и ее тренд в “зимний” и “летний” периоды.

ские наблюдения в двух скважинах, пробуренных в 2015 г. (глубиной 13.4 м) и 2016 г. (глубиной 20.4 м), свидетельствуют о наличии высокотемпературной мерзлоты в долине р. Сенца [Alexeev *et al.*, 2021], крайне чувствительной к современным изменениям климата.

Как видно на рис. 9, начиная с 30-х годов прошлого столетия, происходит повышение среднегодовой температуры воздуха (t_{cp}) на Окинском плоскогорье, которое за период до 2024 г., по данным метеостанции Орлик (1375 м абс.), составило 1.8°C ($0.02^{\circ}\text{C}/\text{год}$, $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$). При этом вклад “зимнего” (октябрь–апрель) и “летнего” (май–сентябрь) периодов в рост среднегодовой температуры примерно одинаков. За последние 60 лет продолжительность теплого сезона в регионе увеличилась на 8 дней и составила 184 дня.

Для сравнения на рис. 9 приведены данные по метеостанции Кырен ($51^{\circ}41'\text{ с.ш.}$, $102^{\circ}08'\text{ в.д.}$), которая расположена в Тункинской долине в 230 км от метеостанции Орлик на абсолютной высоте 750 м. Общая тенденция повышения t_{cp} сохраняется и в долине (на 2.4°C с 1952 г.), хотя темпы ее роста немного превышают таковые в горных районах ($1.7^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$).

Похожие данные по росту среднегодовой температуры воздуха получены в Забайкалье – $0.33/10\text{ лет}$ [Носкова, Вахнина, 2023], на Алтае – $0.2\text{--}0.5^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ [Железняк и др., 2019; Паспорт..., 2022], в Якутии – $0.25\text{--}0.38^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ [Лоскин и

др., 2021; Константинов и др., 2024] и других регионах.

Режимные наблюдения в трех скважинах показали заметное различие температуры пород на глубине 1 м в зависимости от положения скважин на разных участках (рис. 10). Скважина Se-16–скв. 1 пробурена на бугре пучения, который находится вблизи небольшого старичного озера и лесного массива и подвержена их отопляющему влиянию; Se-15–скв. 2 заложена на бугре в 200–300 м от озера и русла реки. Поверхность этого бугра лишена древесной растительности и снежного покрова в результате активного ветрового переноса. Скважина Se-20–скв. 5 приурочена к понижению надпойменной террасы, где мощность снега достигает 0.3–0.4 м.

На глубине 10 м среднегодовая температура пород равна -1.1°C (Se-16–скв. 1 и Se-20–скв. 5) и -2.1°C (Se-15–скв. 2). Ниже по разрезу амплитуда ее колебаний практически нулевая, сравнима с точностью измерений. На отметке 20 м среднегодовая температура горных пород составляет -0.9°C (в Se-16–скв. 1), а на глубине 30 м равна -0.6°C (Se-20–скв. 5) при постоянстве в течение года.

В целом за девять лет наблюдений положительный тренд среднегодовой температуры пород хорошо проявлен на глубине 1 м (до $+0.7^{\circ}\text{C}$), немного слабее – на глубине 5 м, а на глубине 10 м она сохранялась постоянной (-1.1°C) в Se-16–скв. 1 и испытывала незначительные колебания в Se-15–скв. 2 (рис. 11).

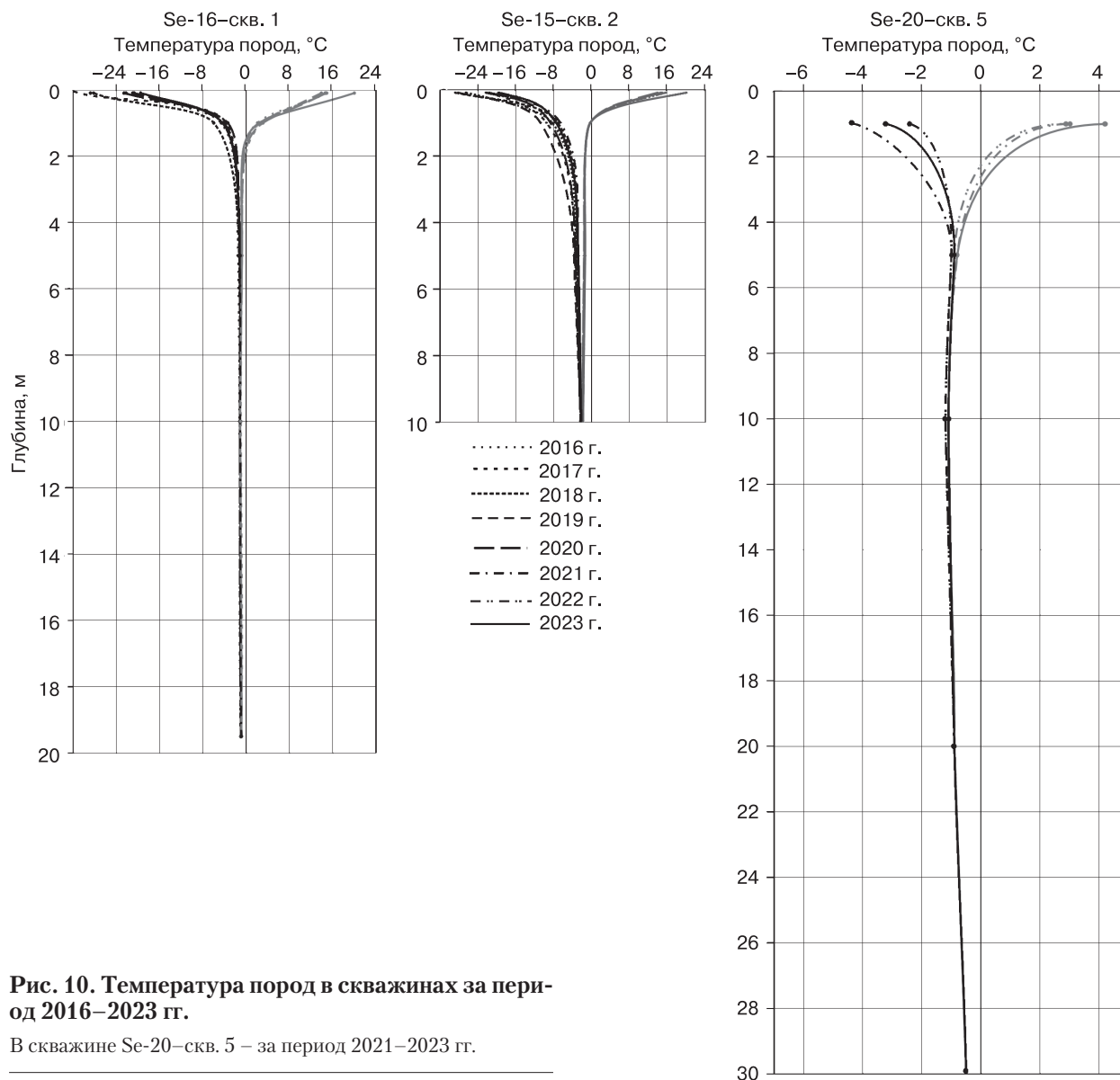


Рис. 10. Температура пород в скважинах за период 2016–2023 гг.

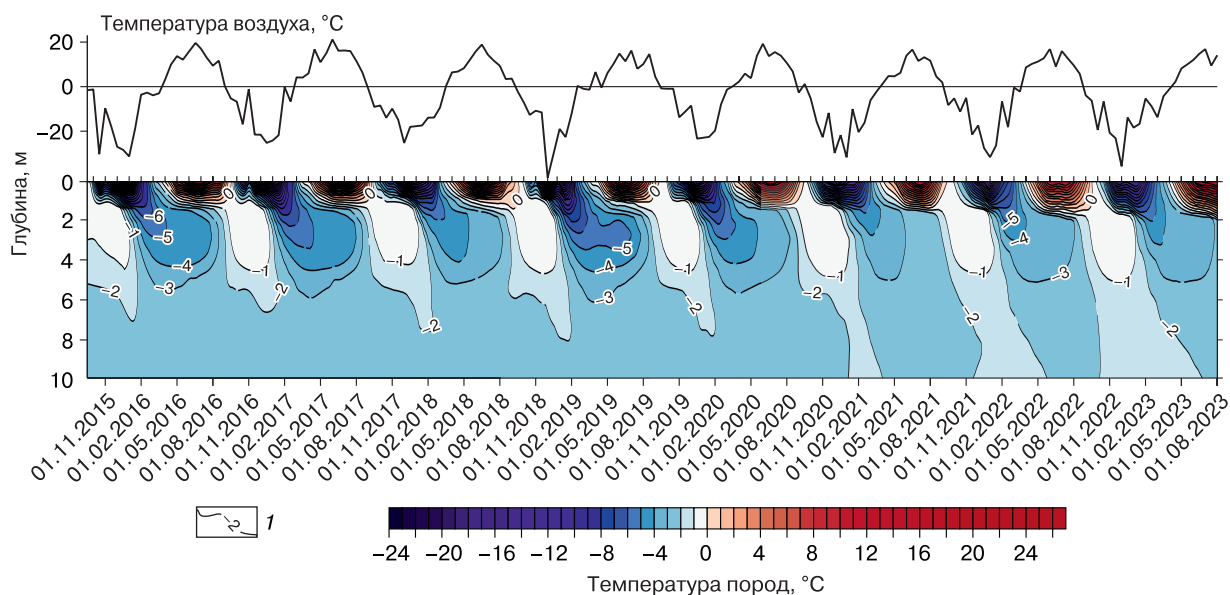
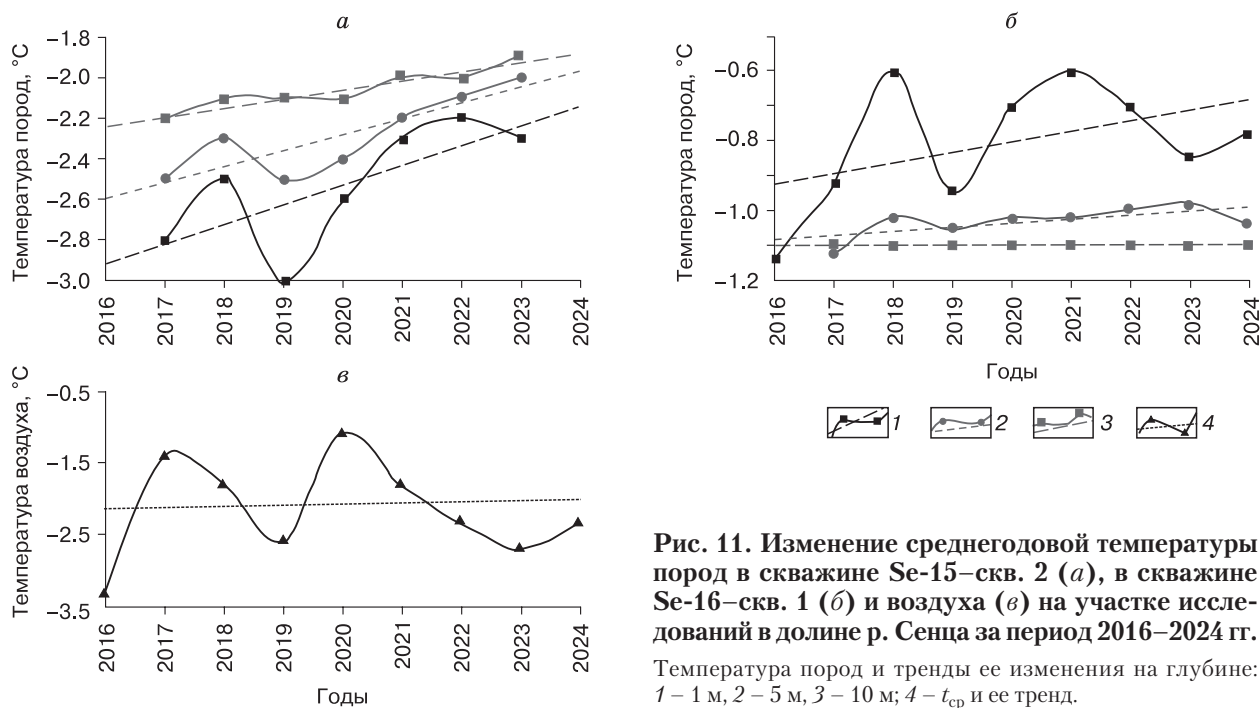
В скважине Se-20–скв. 5 – за период 2021–2023 гг.

Среднегодовая температура воздуха, которая измерялась непосредственно на участке исследований, изменялась от минимального значения -3.3°C (2016 г.) до максимального -1.1°C (2020 г.), оказывая заметное влияние главным образом на температуру пород на глубине 1 м, которое постепенно затухает вниз по разрезу.

Общая динамика теплового состояния верхних горизонтов мерзлой супесчано-суглинистой толщи в долине р. Сенца прослеживается по изменению формы и положения термоизоплет (Se-15–скв. 2, рис. 12). Конфигурация термоизоплет -2°C изменяется по форме с увеличением глубины распространения от 6.5 м (2016 г.) до более 10 м (2023 г.), а поле положительной температуры проникает с глубины 1 м (2016 г.) до 1.8 м (2023 г.).

Оттаивание мерзлых пород в долине р. Сенца начинается с середины апреля. Во второй половине сентября на участках развития туфуров мощность сезонноталого слоя достигает 1.2 м. На открытых пространствах (незалесенных вершинах бугров пучения) за восемь лет геотермических наблюдений в скважинах глубина протаивания отложений изменилась от 1.1 до 1.8 м.

Все это свидетельствует о постепенном повышении температуры рыхлых отложений в слое годовых теплооборотов, что соответствует постепенному многолетнему росту среднегодовой температуры воздуха на Окинском плоскогорье, зафиксированному на метеостанции Орлик (см. рис. 9). При дальнейшем потеплении климата возможно повышение среднегодовой температуры



горных пород, увеличение глубины сезонного протаивания и сокращение мощности многолетнемерзлых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексные исследования в долине р. Сенца, прорезающей Окинское плоскогорье, за последние три года позволили выявить количественные

(мощность мерзлых пород, их температуры, мощность сезонноталого слоя) и качественные (криогенная текстура осадков и структурно-текстурные особенности льда) ключевые параметры криолитозоны, а также выявить их реакцию на современное изменение климата. Установленные базовые параметры свидетельствуют о наличии высокотемпературной мерзлоты незначительной мощности.

Бурением параметрической скважины в пределах надпойменной террасы р. Сенца впервые определена мощность ММП (44 м). Разрез сложен переслаивающимися льдистыми суглинками, глинами, песками и супесями. На глубине 44 м под подошвой мерзлоты вскрыт напорный водоносный горизонт, водовмещающими породами для которого являются пески. Напор над кровлей горизонта составил 16.7 м, а уровень подземных вод установился на глубине 27.3 м. На террасе и пойме реки широко распространены туфуры и бугры пучения. Генезис подземных льдов в буграх, ранее предполагаемый как сегрегационно-инъекционный, дополнительно подтвержден исследованием структурно-текстурных особенностей ледяных линз и текстурообразующего льда вмещающих отложений.

За период мониторинга теплового состояния ММП (2016–2024 гг.) в долине р. Сенца среднегодовая температура пород на глубине 1 и 5 м колебалась от -3.0 до -0.6 °C и от -2.5 до -1.0 °C соответственно, в целом демонстрируя положительный тренд (до $+0.7$ °C) и коррелируя с изменениями среднегодовой температуры воздуха. На глубине немногим более 10 м среднегодовая температура пород сохранялась постоянной и равной -1.1 °C, маркируя нижнюю границу слоя годовых теплооборотов. Конфигурация термоизоплет -2.0 °C в толще ММП свидетельствует о постепенном повышении температуры рыхлых отложений в слое годовых теплооборотов, что соответствует устойчивому многолетнему росту среднегодовой температуры воздуха на Окинском плоскогорье. Мощность сезонноталого слоя увеличилась с 1.1 до 1.8 м на открытых пространствах и до 1.2 м в пониженных заболоченных участках (на участках развития туфуров).

Благодарности. Авторы выражают благодарность д.г.-м.н. Е.А. Слагоде за изготовление шлифов подземных льдов, д.г.-м.н., профессору В.В. Рогову и к.г.-м.н. А.Н. Курчатовой за существенную помощь при изучении шлифов подземных льдов, к.г.-м.н. А.С. Гладкову и студентам Н. Ракше, А. Шубину, Ч. Айсуеву, Т. Гапфарову за активное участие в полевых работах. Исследования д.г.-м.н. Ю.К. Васильчука поддержаны грантом РНФ (№ 23-17-00082). Особая признательность ООО «ИНГЕО» за оперативное и качественное бурение параметрической скважины.

Авторы благодарны рецензентам за замечания, которые помогли исправить неизбежные ошибки в тексте статьи и способствовали лучшему представлению и восприятию полученных результатов.

Литература

- Алексеев С.В., Алексеева Л.П. Геохимия льдов бугров пучения в долине р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточный Саян) // Лед и снег, 2018, т. 58, № 4, с. 524–536.
- Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Васильчук Ю.К. и др. Строение, гранулометрический и минералогический состав рыхлых отложений в долине р. Сенца (Восточный Саян) // Арктика и Антарктика, 2024, № 3, с. 1–29.
- Безрукова Е.В., Решетова С.А., Волчатова Е.В., Кузьмин М.И. Первые реконструкции ландшафтно-климатических изменений в центральной части Окинского плато (Восточный Саян) в среднем–позднем голоцене // Докл. РАН. Науки о Земле, 2022, т. 506, № 1, с. 104–110.
- Васильчук Ю.К., Васильчук Дж.Ю., Алексеев С.В. и др. Циклитное строение изотопной диаграммы ледоминального бугра пучения и его радиоуглеродный возраст, долина реки Сенца, Восточный Саян // Докл. РАН, 2019, т. 489, № 5, с. 506–511.
- Втюрина Е.А. Ледообразование в горных породах / Е.А. Втюрина, Б.И. Втюрин. М., Наука, 1970, 279 с.
- Геокриологическая карта СССР / Под ред. В.А. Кудрявцева, Э.Д. Ершова. Винница, Изд-во ГКФ, 1996, 1 л.
- Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 360 с.
- ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., Стандартинформ, 2016, 23 с.
- Железняк М.Н., Шац М.М., Сериков С.И. и др. Многолетнемерзлые толщи Алтае-Саянской горной страны // Использование и охрана природных ресурсов в России, 2019, № 3 (159), с. 3–9.
- Иванов И.П. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: Учеб. пособие. М., Недра, 1990, 302 с.
- Константинов П.Я., Федоров А.Н., Аргунов Р.Н. и др. Изменение температуры многолетнемерзлых пород и ледникового льда в высокогорной части хребта Сунтар-Хаята за период 1957–2017 годов // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 1, с. 3–14.
- Кропоткин П.А. Поездка в Окинский караул // Зап. Сиб. отд-ния Рус. геогр. о-ва. Кн. 9–10. Иркутск, 1867, с. 31–76.
- Курчатова А.Н. Методы электронной микроскопии в геокриологии / А.Н. Курчатова, В.В. Рогов. М.; Тюмень, Изд-во Моск. ун-та, ТИУ, 2020, 134 с.
- Лоскин М.И., Готовцев С.П., Павлова С.А. Процессы, связанные с изменением климата, влияющие на устойчивость геосистем (на примере Центральной Якутии) // Природообустройство, 2021, № 1, с. 22–28.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Иркутская область и западная часть Бурятской АССР. Сер. 3. Многолетние данные. Л., Гидрометеиздат, 1991, ч. 1–6, вып. 22, 605 с.
- Носкова Е.В., Вахнина И.Л. Анализ современных пространственно-временных изменений температуры воздуха в Забайкальском крае // Геогр. вестн., 2023, № 1 (64), с. 116–126.
- Обручев С.В. Восточная часть Саяно-Тувинского нагорья в четвертичное время // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва, 1953, т. 85, вып. 5, с. 532–546.
- Олюнин В.Н. Неотектоника и оледенение Восточного Саяна. М., Наука, 1965, 127 с.
- Паспорт климатической безопасности Республики Алтай. Правительство алтайского края, г. Горно-Алтайск, 2022, 165 с.

- Перетолчин С.П.** Ледники хребта Мунку-Сардык // Изв. Том. технол. ин-та, 1908, т. 9, № 1, 54 с.
- Рогов В.В.** Основы криогенеза: Учеб.-метод. пособие. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2009, 201 с.
- Савельев Б.А.** Руководство по изучению свойств льда. М., Изд-во Моск. ун-та, 1963, 198 с.
- Соловьева Л.Н.** Морфология криолитозоны Саяно-Байкальской области (на примере Бурятской АССР). Новосибирск, Наука, 1976, 126 с.
- Соломатин В.И.** Петрогенез подземных льдов. Новосибирск, Наука, 1986, 216 с.
- Шумский П.А.** Основы структурного ледоведения. Петрография пресного льда как метод гляциологического исследования. М., Изд-во АН СССР, 1955, 492 с.
- Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vasil'chuk Yu.K. et al.** Permafrost of the Oka Plateau (Eastern Sayan Ridge) // Permafr. Periglac. Process., 2021, No. 1, p. 24.
- Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M. et al.** History of late Pleistocene glaciations in the central Sayan-Tuva Upland (Southern Siberia) // Quat. Sci. Rev., 2012, vol. 49, p. 16–32.
- Gurney S.D.** Aspects of the genesis, geomorphology and terminology of palsas: perennial cryogenic mounds // Progr. Phys. Geogr., 2001, No. 25 (2), p. 249–260.
- Nemchinov V.G., Budaev R.T., Rezanov I.N.** Pleistocene glaciations of the eastern Sayan Mountains // Antropozoikum, 1999, vol. 23, p. 11–15.
- Vasil'chuk Yu.K., Alexeev S.V., Arzhannikov S.G. et al.** Lithalsa in the Sentsa river valley, Eastern Sayan Mountains, Southern Russia // Permafr. Periglac. Process., 2016, vol. 27, iss. 3, p. 285–296.
- Alekseev S.V., Alekseeva L.P.** Geochemistry of ice in frost mounds in the valley of the Sentsa River (Oka plateau, East Sayan). *Led i sneg* [Ice and Snow], 2018, vol. 58 (4), p. 524–536 (in Russian). – <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-524-536>
- Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vasil'chuk Y.K. et al.** Structure, granulometric and mineralogical composition of loose sediments in the valley of the river. Sentsa (Eastern Sayan). *Arktika i Antarktika* [Arctic and Antarctic], 2024, No. 3, p. 1–29 (in Russian). – https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71536
- Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Volchatova E.V., Kuzmin M.I.** The first reconstructions of landscape and climatic changes in the central part of the Okinskoye Plateau (Eastern Sayan) in the middle-late Holocene. *Doklady Rossiiskoi Akademii nauk. Nauki o Zemle* [Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences], 2022, vol. 506, No. 1, p. 104–110.
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk J.Yu., Alexeev S.V. et al.** The cyclical structure of the isotope diagram of a lithalsa and its radiocarbon age, Sentsa river valley, Eastern Sayan. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sci.], 2019, No. 489, p. 1456–1460. – <https://doi.org/10.31857/S0869-56524895506-511>
- Vtyurina E.A., Vtyurin B.I.** Ldoobrazovanie v gornykh porodakh [Ice formation in rocks]. Moscow, Nauka, 1970 (in Russian).
- Geokriologicheskaya karta SSSR** [Geocryological map of USSR]. V.A. Kudryavtsev, E.D. Ershov (eds.). Vinnitsa, Izd-vo GKF, 1996, 1 p.
- Geokriologiya SSSR. Gornye strany uga SSSR** [Geocryology of the USSR. Mountain countries of the south of the USSR]. E.D. Ershov (ed.). Moscow, Nedra, 1989, 360 p. (in Russian).
- GOST 5180-2015.** Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics. Moscow, Standartinform, 2016, 23 p. (in Russian).
- Zheleznyak M.N., Shats M.M., Serikov S.I. et al.** Permafrost strata of the Altai-Sayan highland. *Ispol'zovanie i ohrana prirodnnykh resursov v Rossii* [Use and protection of natural resources in Russia], 2019, No. 3, p. 3–9 (in Russian).
- Ivanov I.P.** Inzhenernaya geologiya mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Engineering geology of mineral deposits: a tutorial]. Moscow, Nedra, 1990, 302 p. (in Russian).
- Konstantinov P.Ya., Fedorov A.N., Argunov R.N. et al.** Temperature changes in permafrost and glacier ice in the high-mountain part of the Suntar-Khayata ridge for the period 1957–2017. *Earth's Cryosphere*, 2024, vol. XXVIII, No. 1, p. 3–13.
- Kropotkin P.A.** A trip to the Oka post. In: Proc. Siberian Division of Russian Geographic Society. Irkutsk, 1867, No. 9 (10), p. 1–94 (in Russian). – <https://elibr.go.ru/handle/123456789/213522>
- Kurchatova A.N., Rogov V.V.** Elektronnyi mikroskop v geokriologii [Electron microscopy in geocryology]. Moscow; Tyumen, MGU, TIU, 2020, 106 p. (in Russian).
- Loskin M.I., Gotovtsev S.P., Pavlova S.A.** Climate change processes that affect the sustainability of geosystems (in the example of Central Yakutia). *Prirodoobustroystvo* [Nature management], 2021, No. 1, p. 22–28 (in Russian). – <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-1-22-28>
- Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Irkutskaya oblast' i zapadnaya chast' Buryatskoi ASSR** [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Irkutsk region and the western part of the Buryat ASSR]. Series 3. Long-term data. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991, parts 1–6, iss. 22, 605 p. (in Russian).
- Noskova E.V., Vakhnina I.L.** Analysis of modern spatiotemporal changes in air temperature in the Trans-Baikal Territory. *Geograficheskii vestnik* [Geographical Bulletin], 2023, No. 1 (64), p. 116–126 (in Russian).
- Obruchev S.V.** Eastern part of the Sayano-Tuva highlands in the Quaternary. *News of the All-Union Geographical Society*, 1953, No. 85 (5), p. 532–546 (in Russian). – <https://elibr.go.ru/handle/123456789/219247>
- Olyunin V.N.** Neotektonika i oledenenie Vostochnogo Sayana [Neotectonics and Glaciation of the Eastern Sayan]. Moscow, Nauka, 1965, 127 p. (in Russian).
- Passport klimaticheskoi bezopasnosti Altaiskoi Respubliki** [Climate safety passport of the Altai Republic]. Gorno-Altaysk, 2022, 165 p. (in Russian). – <https://disk.yandex.ru/i/r4M1DAC30iZNEQ>
- Peretolchin S.P.** Glaciers of the Munku-Sardyk Ridge. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo instituta* [Bulletin of the Tomsk Technological Institute], 1908, vol. 9, No. 1, 54 p. (in Russian). – <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/7385>
- Rogov V.V.** Osnovy kriogeneza [The Foundations of Cryogenesis]. Novosibirsk, Acad. izd-vo "Geo", 2009, 203 p. (in Russian).
- Solovieva L.N.** Morfologiya kriolitozony Sayano-Baikal'skoi oblasti (na primere Buryatskoi ASSR) [Morphology of the cryolithozone of the Sayano-Baikal region (on the example of the Buryat ASSR)]. Novosibirsk, Nauka, 1976, 126 p. (in Russian).
- Savel'ev B.A.** Rukovodstvo po izucheniu svoistv l'da [A guide to studying the properties of ice]. Moscow, Izd-vo MGU, 1963, 198 p. (in Russian).

Solomatin V.I. Petrogenez podzemnykh l'dov [Petrogenesis of ground ice]. Novosibirsk, Nauka, 1986, 216 p. (in Russian).

Shumsky P.A. Osnovy strukturnogo ledovedeniya. Petrografiya presnogo l'da kak metod glyatciologicheskogo issledovaniya [Fundamentals of structural ice science. Petrography of fresh ice as a method of glaciological research]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1995, 492 p. (in Russian).

Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vasil'chuk Yu.K., Svetlakov A.A., Kulagina N.V. Permafrost of the Oka Plateau (Eastern Sayan Ridge). Permafr. Periglac. Process., 2021, No. 1, p. 24. – <https://doi.org/10.1002/ppp.2103>

Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M. et al. History of late Pleistocene glaciations in the central Sayan-Tuva Upland

(Southern Siberia). Quat. Sci. Rev., 2012, vol. 49, p. 16–32. – <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.06.005>

Gurney S.D. Aspects of the genesis, geomorphology and terminology of palsas: perennial cryogenic mounds. Progr. Phys. Geogr., 2001, No. 25 (2), p. 249–260. – <https://doi.org/10.1177/030913330102500205>

Nemchinov V.G., Budaev R.T., Rezanov I.N. Pleistocene glaciations of the eastern Sayan Mountains. Antropozoikum, 1999, vol. 23, p. 11–15.

Vasil'chuk Yu.K., Alexeev S.V., Arzhannikov S.G. et al. Lithals in the Sentsa river valley, Eastern Sayan Mountains, Southern Russia. Permafr. Periglac. Process., 2016, vol. 27, iss. 3, p. 285–296. – <https://doi.org/10.1002/ppp.1876>

*Поступила в редакцию 13 декабря 2024 г.,
после доработки – 25 марта 2025 г.,
принята к публикации 8 июня 2025 г.*