

УДК 552.328

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Наледи в бассейне р. Уды (Западное Забайкалье): особенности современного распространения и возможности использования

В.Н. Черных[✉], Б.З. Цыдыпов, Б.В. Содномов, А.А. Аюржанаев,
М.А. Жарникова, Б.О. Гуржапов, Е.Ж. Гармаев

Байкальский институт природопользования СО РАН, Россия, г. Улан-Удэ

[✉]geosibir@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования определяется увеличением интенсивности наледных процессов на территории Западного Забайкалья с 2019 г. по настоящее время в связи с наступлением многоводного климатического цикла. Объемы наледей ежегодно увеличиваются, наблюдаются случаи подтопления населенных пунктов и объектов инфраструктуры, что делает целесообразным современное детальное изучение наледей с применением новых технологий и подходов. В бассейне р. Уды, который выбран в качестве территории исследования, наледи изучены недостаточно полно, сведений о них в литературе мало. Вместе с тем они являются ценным ресурсом, поскольку в массивных ледяных полях аккумулируется значительная часть зимнего стока как поверхностных, так и подземных вод, поэтому наледи можно использовать в хозяйственных целях в качестве источника водоснабжения сельскохозяйственного производства при их таянии в теплое время года. *Целью* работы является оценка интенсивности проявления наледных процессов в пределах бассейна р. Уды с выявлением общих закономерностей современного распространения наледей, влияния различных факторов среды на их динамику, а также возможностей использования. *Объекты:* наледи, формирующиеся в холодный сезон года в бассейне р. Уды в условиях расчлененного среднегорного рельефа и широкого распространения многолетнемерзлых пород. *Методы:* дистанционные и полевые экспедиционные методы научного исследования. В качестве источника информации при дистанционном изучении применялись космические снимки Landsat-4-5, Landsat-8, Sentinel-2, а также данные Ресурс-П. Полевыми методами в процессе проведения наледомерных съемок получены сведения о мощности наледей, с использованием БПЛА составлены локальные цифровые модели местности ключевых участков в районах развития наледей. Обработка данных производилась с использованием ГИС-методов. *Результаты.* Получены оперативные (текущая ситуация) и ретроспективные карты расположения наледей. На территории общей площадью около 35 тыс. км² в зимний период, в зависимости от природно-климатической обстановки, формируется до 3,2 тыс. наледей. В маловодные климатические циклы число наледей сокращается в 1,5 раза. Большое количество наледей при их сравнительно небольших размерах является следствием прерывистости криолитозоны в районе исследования. Преобладают наледи подземных вод, в ледяных полях которых в холодный период года заключается большая часть дебета их источников. Наледи бассейна р. Уды характеризуют запасы подземных вод территории, они могут быть использованы в качестве источников водоснабжения сельскохозяйственного производства в засушливый период с апреля по июнь, когда осадков практически не выпадает.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, подземные воды, наледи, космические снимки, река Уда, Западное Забайкалье

Благодарности: Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 23-27-00402 «Наледи северной (российской) части бассейна р. Селенга».

Для цитирования: Наледи в бассейне р. Уды (Западное Забайкалье): особенности современного распространения и возможности использования / В.Н. Черных, Б.З. Цыдыпов, Б.В. Содномов, А.А. Аюржанаев, М.А. Жарникова, Б.О. Гуржапов, Е.Ж. Гармаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 161–173. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432

UDC 552.328

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432

Icings in the Uda river basin (Western Transbaikalia): peculiarities of modern distribution and possibilities of use

V.N. Chernykh[✉], B.Z. Tsydypov, B.V. Sodnomov, A.A. Ayurzhanayev,
M.A. Zharnikova, B.O. Gurzhapov, E.Z. Garmaev

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation

[✉]geosibir@yandex.ru

Abstract. Relevance. The increase in the intensity of icing formation in the territory of the Western Transbaikalia from 2019 to the present due to the beginning of the high-water climatic cycle. The volumes of icings increase annually, cases of flooding of settlements and infrastructure facilities are observed. This makes it advisable to conduct a modern detailed study of the icings using new technologies and approaches. In the Uda River basin, which was selected as the study area, icings have not been studied sufficiently, and there is little information about them in literature. At the same time, they are a valuable resource, since massive ice fields accumulate a significant part of the winter runoff of both surface and groundwater. Therefore, icings can be used for economic purposes as a source of water supply for agricultural production when they melt in the warm season. **Aim.** To assess the intensity of manifestation of icing formation within the Uda River basin with the identification of general patterns of modern distribution of the icings, the impact of various environmental factors on their dynamics, as well as the possibilities of their utilization. **Subjects.** Icings formed in the cold season in the Uda River basin in the conditions of dissected mid-mountainous relief and wide distribution of permafrost rocks (permafrost). **Methods.** Remote and field expeditionary methods of scientific research. Landsat-4-5, Landsat-8, Sentinel-2 space images and Resurs-P data were used as a source of information for remote sensing. Data on icings thickness were obtained using field methods in the course of icings surveys, and local digital terrain models of key sites in the areas of icings development were compiled using UAVs. Data processing was carried out using GIS methods. **Results.** Current and retrospective maps of icings location were obtained. On the territory with the total area of about 35 thousand km² up to 3.2 thousand icings are formed in winter depending on the natural and climatic conditions. During low-water climatic cycles, the number of icings decreases by 1.5 times. The large number of icings with their relatively small size is a consequence of the discontinuity of the cryolithozone in the study area. Groundwater icings prevail, where ice fields contain most of their runoff during the cold period of the year. The Uda River basin icings characterize the groundwater reserves of the territory and can be used as sources of water supply for agricultural production in the dry period from April to June, when there is practically no precipitation.

Keywords: permafrost, groundwater, icings, satellite images, Uda river, Western Transbaikalia

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the Russian Science Foundation project No. 23-27-00402 «Icings in the Northern (Russian) Part of the Selenga River Basin».

For citation: Chernykh V.N., Tsydypov B.Z., Sodnomov B.V., Ayurzhanayev A.A., Zharnikova M.A., Gurzhapov B.O., Garmaev E.Z. Icings in the Uda river basin (Western Transbaikalia): peculiarities of modern distribution and possibilities of use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 161–173. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432

Введение

Территория Западного Забайкалья отличается суровым резко континентальным климатом и широким распространением многолетнемерзлых пород (ММП), поэтому здесь активно проявляются криогенные процессы. Из всего их многообразия (морозобойное растрескивание, пучение и др.) по масштабам и частоте проявления выделяется наледообразование. Наледи образуются в холодный сезон года в местах выхода на поверхность подземных вод в виде родников в руслах и долинах рек, вдоль ручьев, в узких распадках отрогов горных хребтов, у подножий их склонов. Несмотря на длительную историю исследования мерзлотных про-

цессов, специальных работ по наледям данной территории мало [1–3].

Наледи возникают тогда, когда скорость промерзания поверхностных водотоков и водовмещающих горизонтов горных пород превышает интенсивность сработки запасов воды, накопленных в предшествующий теплый период года [4]. Интенсивность наледообразования зависит от множества условий, включая геологические, гидрогеологические и геоморфологические особенности территории, метеорологические факторы среды, в том числе сплошность и строение криолитозоны. Поэтому, изучение наледей, в т. ч. особенностей их распространения и пространственно-временной изменчивости, позволяет выяв-

лять закономерности динамики подземных вод и оценить состояние криолитозоны территории в условиях постоянно меняющегося климата.

Наледи являются потенциальным ресурсом для водоснабжения сельскохозяйственного производства, так как в холодный период года они аккумулируют значительные запасы подземных вод, которые в теплое время можно успешно использовать для орошения. Они активно использовались в хозяйстве как источник водоснабжения в прошлом [5], такая необходимость возникла и в настоящее время в связи с увеличением объемов производства в животноводстве и растениеводстве.

Объекты и методы исследования

Бассейн р. Уды (площадь 34,9 тыс. км²) расположен в центральной части Западного Забайкалья (рис. 1). Около 2/3 бассейна относится к Селенгинскому среднегорью. Районы верхнего течения рек Уды и Кудун, а также прилегающие к Еравнинским озерам, являются южной частью Витимского плоскогорья. На севере часть стока формируется в пределах горной системы Улан-Бургасы. Длина р. Уды

составляет 467 км, средний многолетний расход воды в 5 км от устья равен 69,8 м³/с.

В тектоническом отношении территория представляет собой систему складчатых структур, вытянутых в северо-восточном направлении. Горст-антиклинальные поднятия в рельефе выражены хребтами, грабен-синклинали – впадинами забайкальского типа [7]. Зоны разломов выражены по границам структур и в их пределах. Разломы разного ранга многочисленны [8].

Горные хребты территории (Цаган-Дабан, Улан-Бургасы, Курбинский, Худанский и др.) средневысотные (1500–1800 м), с плоскими вершинами и холмисто-увалистыми предгорьями, переходят в террасированные равнины впадин забайкальского типа. Складчатые структуры сложены в основном гранитоидами, в меньшей степени представлены метаморфические породы, впадины межгорных котловин выполнены юрско-меловыми и неоген-четвертичными отложениями разного генезиса [9]. Около 60 % территории занимают горные хребты, остальные 40 % – межгорные котловины, расчлененные русловой сетью рек и временных водотоков.

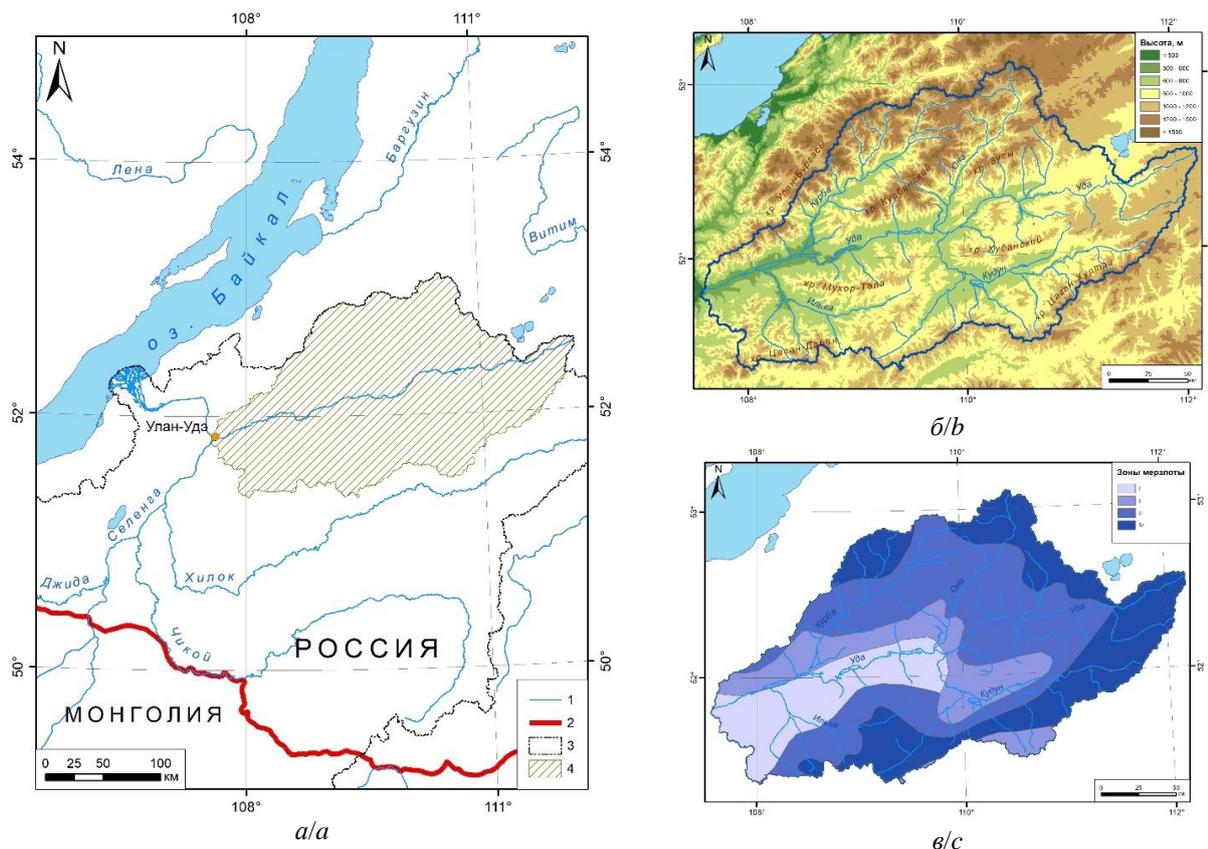


Рис. 1. Территория исследования: а) обзорная схема: 1 – речная сеть, 2 – государственная граница РФ, 3 – граница бассейна р. Селенги, 4 – бассейн р. Уды; б) орографическая схема; в) типы распространения ММП по [6]: I – талые породы, II – редко-островной, III – массивно-островной, IV – сплошной
Fig. 1. Study area: а) overview diagram: 1 – river network, 2 – state border of the Russian Federation, 3 – boundary of the Selenge River basin, 4 – Uda River basin; б) orographic scheme; в) types of permafrost distribution according to [6]: I – thawed rocks, II – sparsely insular, III – massively insular, IV – continuous

В гидрогеологическом отношении район исследования относится к западно-забайкальской гидрогеологической складчатой области с артезианскими бассейнами забайкальского типа и бассейнами трещинных вод [7]. Подземные воды артезианских бассейнов межгорных котловин, в зависимости от принадлежности к водоносному комплексу, залегают на глубинах от 0,5 до 150 м и более. Их питание происходит за счет инфильтрации с поверхности и притока с горных массивов по зонам трещиноватости, разгрузка происходит в руслах рек или через источники в зонах разломов. Значительную часть территории занимают бассейны трещинных вод, которые связаны с горными хребтами. Они отличаются разнообразием условий питания и разгрузки.

Расчлененный рельеф и суровый резко континентальный климат обуславливают широкое распространение в пределах бассейна р. Уды ММП. Геокриологические условия при этом достаточно разнообразны. В пределах Иволгино-Удинской впадины ММП имеют преимущественно редкоостровное распространение, массивно-островной тип распространения ММП характерен для южной и центральной частей территории, включая горные хребты Цаган-Дабан, Худанский и др., а также расположенные между ними межгорные котловины с долинами рек Куйтунка, Брянка, Илька, Кижинга и др. (рис. 1, в). На севере и северо-востоке территории исследования (хр. Улан-Бургасы, бассейн р. Курбы в нижнем течении, Кижингино-Кудунская впадина и др.) выделены ММП прерывистого типа распространения [7]. Преимущественно сплошной тип распространения ММП выделяется в пределах южной части Витимского плоскогорья, относящейся к бассейну р. Уды [10].

Перечисленные особенности природы территории определяют интенсивность развития наледных процессов. Их изучение проводилось дистанционными и полевыми экспедиционными методами с применением полустационарных наблюдений. Данные космической съемки Landsat-4-5, Landsat-8 (пространственное разрешение 30 м) и Sentinel-2 (10 м) использовались при картографировании наледей, которое проведено на основе анализа значений NDSI (нормализованный снежно-ледовый индекс) [11] по применяемому для этих целей алгоритму, описанному в работах [12–14], с последующей ручной оцифровкой (комбинированный метод дешифрирования). На основе снимков Sentinel-2 составлена карта текущего расположения наледей (по состоянию на 2023 г.), с использованием снимков Landsat-4-5, Landsat-8 ретроспективные карты, за период с 1997 по 2022 гг. Также на предварительном этапе с использованием данных цифровой модели рельефа SRTM составлена детальная карта

гидрографической сети и выделены наледные бассейны III–VI порядков (VI – бассейн р. Уды). Для определения особенностей распределения наледей с использованием данных SRTM проведен детальный ГИС-анализ рельефа территории.

На ключевых участках, охватывающих отдельные наледные бассейны (II порядка), для расчета объемов и выявления закономерностей в изменении мощности наледей в зависимости от расположения в рельефе и ландшафтных условий в 2021–2023 гг. проведены наледные съемки на 25 объектах. Выполнена съемка наледей при их максимальном развитии (март) и наледных полей (сентябрь) с борта БПЛА с дополнительной наземной привязкой. Расчет суммарного объема наледей производился путем интегрального анализа с применением данных по площадям (получены при картографировании) и средней мощности наледей (получены в процессе наледных съемок).

В задачи полустационарных наблюдений (2021–2023 гг.) входило установление основных метеорологических параметров среды в районах расположения наледей. При помощи автоматических термометрических датчиков фиксировались температура воздуха в период формирования и разрушения наледей (с сентября по июль), особенности сезонного промерзания горных пород. Расчетными методами, а также с применением автоматической фотофиксации (фотоловушки) устанавливалась скорость таяния наледей.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время в пределах территории бассейна р. Уды в холодный период года формируется 2,2 тыс. наледей (рис. 2). В это число входят все наледи, площадь которых больше 3600 м^2 (4 пиксела снимка Landsat с разрешением 30 м). Суммарная площадь наледей в 2023 г. составила $101,7 \text{ км}^2$, относительная наледность – 0,29 %. По размерам 1643 наледи относятся к большим, 321 – к средним и 239 – к очень большим [15]. Гигантских, площадью более 1 км^2 , в настоящее время не выявлено. Подавляющее большинство наледей (1800, или 84 %) образуются в горных районах территории (бассейны трещинных вод).

Мощность наледей различается в зависимости от природных особенностей районов их формирования. В отрогах средневысотных горных хребтов, в узких лощинах с небольшими ручьями, в условиях преобладания природных комплексов горной тайги средняя мощность наледей составляет около 0,7 м, максимальная достигает 1,5 м. У подножий склонов хребтов, занятых лесными подтаежными ландшафтами, в долинах малых рек в их верхнем течении накапливаются наледи со средней толщиной льда до 0,9 м, максимальная составляет 1,8 м.

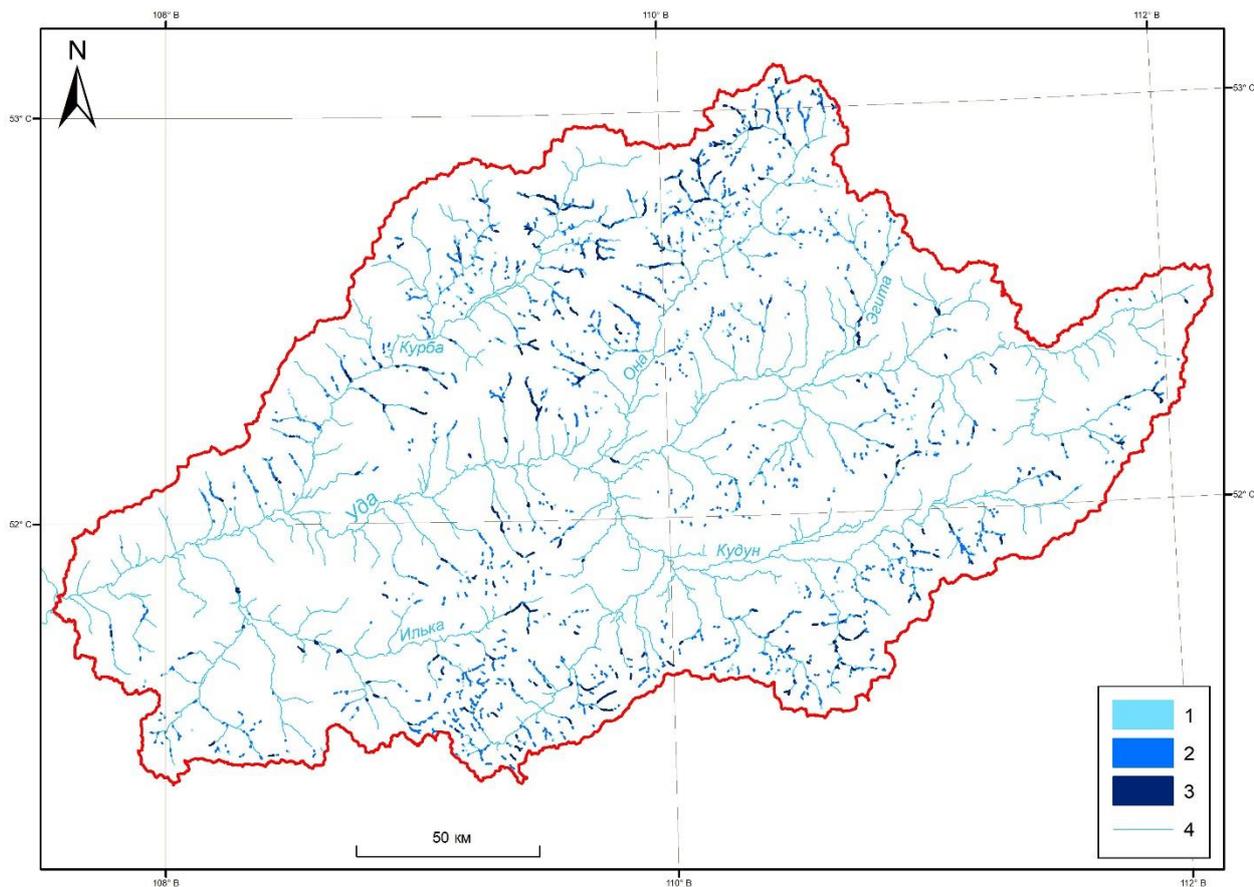


Рис. 2. Распространение наледей в бассейне р. Уды весной 2023 г.: 1 – средние, 2 – большие, 3 – очень большие, 4 – речная сеть

Fig. 2. Distribution of icings in the Uda river basin in spring of 2023: 1 – medium, 2 – large, 3 – very large, 4 – river network

Наибольшая средняя мощность наледей характерна для участков долин в среднем течении малых рек (1,5–1,7 м), в нижнем течении в устьевых частях речных долин средняя мощность наледей составляет 1,3 м (лесостепь и степь). Наледи со средней мощностью более 2 м редкость, хотя и встречаются во всех перечисленных условиях. Исходя из распределения наледей по указанным природным комплексам, их суммарный объем в период максимального развития составляет около 0,8 км³.

Наледи речных вод немногочисленны. В 2023 г. они формировались на реках Брянке, Ильке, Эгите (Поперечная), в верховьях р. Курбы. Руслу этих рек (за исключением р. Курбы) неглубокие (до 2 м), высота берегов между урезом воды и поймой не достигает и 1 м, поэтому налееди распространяются за пределы русел, затапливая поймы, и таким образом успешно дешифрируются. На территории преобладают налееди подземных вод, накапливающиеся в долинах малых рек, вдоль русел ручьев, у родников. Некоторые из них достигают площади 1 км². Отличительной особенностью является межгодовая изменчивость в расположении многих наледей, т. е. по зональным признакам они относятся к южному

типу [16]. Питание происходит в основном за счет грунтовых вод. Часть наледей сохраняет свое местоположение ежегодно, хотя площади и объемы их постоянно меняются. Они относятся к умеренному типу. Сравнение разновременных карт, построенных по ретроспективным снимкам Landsat, показывает, что в пределах территории исследования насчитывается до 1100 таких наледей. В их питании кроме грунтовых вод участвуют подземные воды глубокой циркуляции. Налей северного типа на территории не выявлено.

Наблюдения с использованием температурных датчиков, анализ данных метеостанций показывают, что в современных природно-климатических условиях формирование первых наледей начинается в начале–середине декабря с установлением среднесуточной температуры воздуха –15 °С и ниже. С момента перехода среднесуточной температуры через 0 °С до этого времени русла небольших водотоков постепенно перемерзают, речной сток пополняет запасы воды подруслового и пойменного аллювия. При промерзании горных пород в пойме подземные воды выходят на дневную поверхность, образуя налееди. Увеличение интенсивности

наледных процессов начинается в январе, максимум приходится на середину февраля. Связано это с промерзанием горных пород в слое сезонного промерзания–оттаивания на максимальную глубину и сужением водопрпускной способности водоносных горизонтов, в которых происходит циркуляция подземных вод. Таяние наледей начинается в конце марта. Скорость таяния зависит от метеорологических условий и в среднем составляет от 9 см/сут в степном и лесостепном поясах до 1,2 см/сут в лесном. В горных районах, в условиях таежных ландшафтов, таяние наледей заканчивается в начале июля. Таким образом, многолетних наледей на территории нет.

Разновременные карты расположения наледей, составленные на основе данных космической съемки, позволили выявить пространственно-временные различия в относительной наледности бассейна р. Уды (рис. 3).

Количество, площади и объемы наледей меняются из года в год. В рассматриваемом временном отрезке максимум интенсивности наледных процессов приходился на 2000 г. Общее количество наледей в пределах территории исследования тогда составляло 3221, суммарная площадь – 168 км², относительная наледность – 0,48 %. Минимальная интенсивность наледных процессов наблюдалась в 2017 г. В бассейне р. Уды насчитывалось 1887 наледей суммарной площадью 78 км². Относительная наледность составляла 0,22 %. Результаты ретроспективного картографирования подтверждают, что в многоводные климатические циклы общая относительная наледность территории увеличивается, в маловодные – сокращается (рис. 3). Наличие запасов подземных вод, накопление которых зависит от осадков теплого сезона года, в значительной степени предопределяет потенциальные объемы наледей (рис. 4, а).

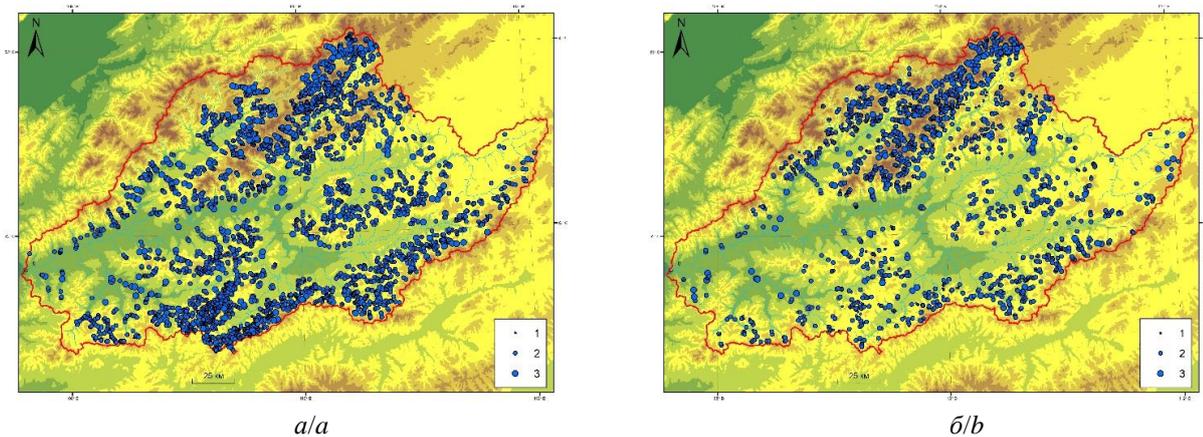


Рис. 3. Динамика наледей: а) 2000 г.; б) 2017 г. Наледи: 1 – средние, 2 – большие, 3 – очень большие
Fig. 3. Dynamics of icings: а) 2000; б) 2017. Icings: 1 – medium, 2 – large, 3 – very large

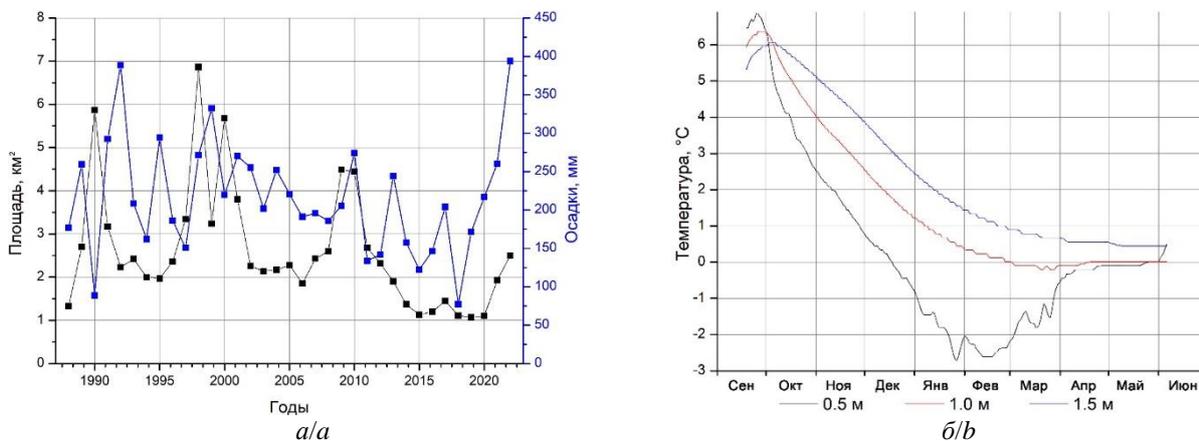


Рис. 4. Динамика площадей наледей (на ключевом участке) в сравнении с количеством осадков предшествующего теплого периода года (а) и динамика температуры в слое сезонного промерзания на ключевом участке исследования (б) в период развития наледей в 2022–2023 гг.

Fig. 4. Dynamics of the areas of icings in the key study area in comparison with the amount of precipitation of the previous warm period of the year (а) and the dynamics of temperature in the layer of seasonal freezing in the key study area (б) during the period of icings development in 2022–2023

Важным фактором, влияющим на интенсивность образования наледей, является температура воздуха, так как она определяет время начала наледных процессов, глубину и интенсивность промерзания горных пород. Наблюдения с использованием автоматических регистраторов показывают, что в условиях относительно теплой зимы, когда температура воздуха в пределах территории исследования не опускается ниже -35°C , глубина слоя сезонного промерзания составляет не более 1,4 м, при температуре пород $-2,8^{\circ}\text{C}$ (рис. 4, б). В холодные зимы, когда температура воздуха опускается ниже -40°C , а значения от -35 до -40°C наблюдаются в течении нескольких дней, горные породы промерзают на глубину 2,3–2,5 м, температура горных пород составляет $-6,5^{\circ}\text{C}$. При глубоком промерзании горных пород выше вероятность смыкания сезонной и многолетней мерзлоты, увеличиваются объемы грунтовых вод, выходящих на дневную поверхность. Важную роль при этом играет ход температуры воздуха. Чередование похолоданий и оттепелей в зимний период приводит к увеличению интенсивности наледообразования. Эта закономерность, проявляющаяся во многих районах формирования наледей [17, 18], характерна и для бассейна р. Уды.

Таким образом, межгодовые различия в наледности бассейна р. Уды объясняются разностью в количестве осадков и ходом температуры воздуха в период формирования наледей, что согласуется с имеющимися представлениями о влиянии метеорологических факторов среды на интенсивность наледных процессов в Забайкалье [1].

Разновременные карты дают представления о пространственных различиях в распространении наледей. В северной части территории, где формируется сток рек Курбы и Оны (около 9 тыс. км²), преобладает горный рельеф (хр. Улан-Бургасы, Зусы и др.), а ММП имеют массивно-островное

распространение (с переходом к сплошному), наледность в разные годы варьирует от 0,47 до 0,72 %, т. е. изменяется в 1,5 раза и остается стабильно высокой (рис. 3). В южной части территории исследования относительная наледность меняется в более широких пределах. Для бассейна р. Кудун (IV порядка) площадью около 8 тыс. км² в годы с малым количеством осадков этот показатель составляет 0,16 %, в многоводные возрастает до 0,53 %, т. е. изменяется более чем в 3 раза. Горные хребты здесь ниже, чем в северной части (рис. 2), преобладают межгорные котловины, ММП имеют преимущественно островное распространение. Практически не меняется и остается достаточно низкой (около 0,10 %) относительная наледность восточной части территории исследования, которая располагается в пределах Витимского плоскогорья и для которой характерен сплошной тип распространения ММП.

Картографирование позволяет оценить роль рельефа (и тектоники), а также ММП в распределении наледей. Сопряженный анализ с использованием высотных данных SRTM и векторного слоя, содержащего сведения о наледях, показал, что в пределах районов с абсолютными высотами до 600 м отношение суммарной площади наледей к площади территории (относительная наледность) составляет 0,11 %, сравнительно небольшое значение. Также минимальная наледность характерна для приводораздельных частей склонов горных хребтов, с высотами более 1100 м. Здесь наледи практически не формируются из-за того, что подземные воды перемещаются по водоносным горизонтам в более пониженные элементы рельефа. В бассейне р. Уды максимальное количество наледей сосредоточено в высотном поясе 800–1000 м (наледность до 0,51 %), что вполне закономерно, так как здесь, в узких горных речных долинах у подножий склонов хребтов, происходит разгрузка подземных вод (рис. 5, а).

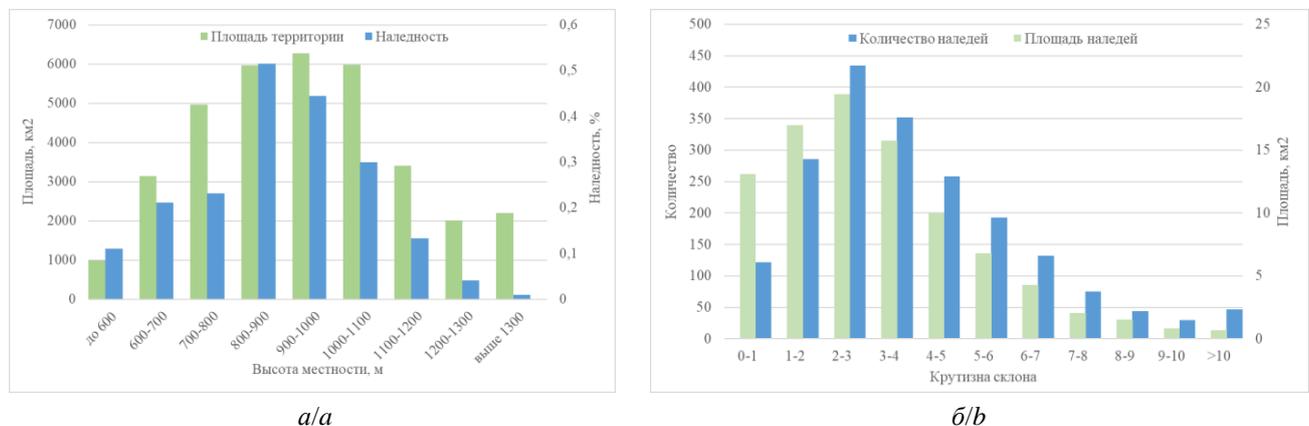


Рис. 5. Распределение наледей в рельефе в зависимости от: а) абсолютной высоты; б) крутизны склонов
Fig. 5. Icing distribution in the relief depending on: a) absolute height; b) slope steepness

Наибольшее число наледей формируется на склонах крутизной 2–3° в днищах впадин, по долинам малых рек. С увеличением крутизны склонов количество наледей и их площадь закономерно сокращается (рис. 5, б). С точки зрения экспозиции большинство наледей относится к восточным, юго-восточным и южным склонам. Здесь наледность изменяется от 0,4 до 0,5 %. Интересной особенностью является минимальная наледность на северных склонах (0,02 %), даже несмотря на то, что площадь склонов с такой экспозицией в бассейне р. Уды больше других на 350–750 км². Это связано с недостаточным притоком солнечной радиации, особенно в холодный период года, из-за чего горные породы промерзают сильнее, чем на освещенных склонах, а потому возможности выхода на поверхность подземных вод ограничены.

Сравнение ретроспективных карт распределения наледей с картой распространения ММП (рис.1) показывает, что низкая относительная наледность характерна для районов с редкоостровным (межгорные котловины и низкогорные хребты на западе) и преимущественно сплошными типами распространения ММП (Витимское плоскогорье). В южной части территории наледность изменяется в широких пределах – это районы островного распространения ММП, всегда высокой наледностью отличаются горные районы севера бассейна, где преобладают ММП массивно-островного типа распространения.

Геоинформационный анализ с использованием данных [9], полевых экспедиционных исследований и результатов картографирования позволил выделить на территории бассейна р. Уды наледи, различающиеся по генезису, источникам питания, связанные с некоторыми типами таликов (рис. 6).

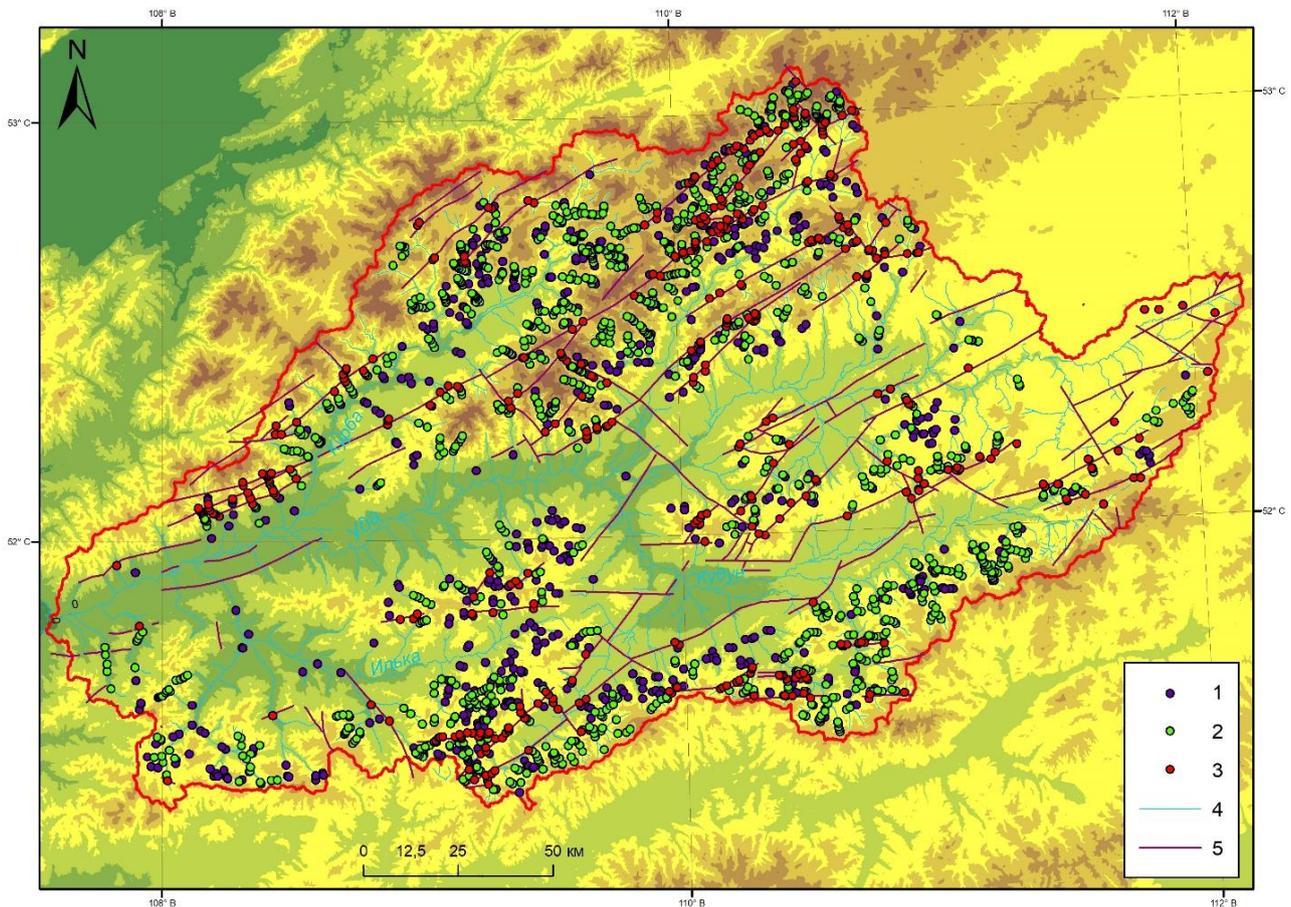


Рис. 6. Наледи бассейна р. Уды по источникам питания и взаимосвязи с таликовыми зонами: 1 – наледи грунтовых вод, связанные с надмерзлотными таликами, радиационными, прирусловыми или подрусловыми; 2 – наледи со смешанным питанием, с преобладанием доли грунтовых вод, связанные с грунтово-фильтрационными таликами; 3 – наледи с высокой долей питания за счет подземных вод глубокой циркуляции, трещинно-жилльных вод, связанные с гидрогеогенными напорно-фильтрационными таликами в зонах разломов

Fig. 6. Icings of the Uda River basin by sources of supply and interrelation with talik zones: 1 – groundwater icings connected with subpermafrost, radiation, near-channel or under-channel taliks; 2 – mixed-feeding icings with predominant groundwater share connected with groundwater-infiltration taliks; 3 – icings with high share of feeding due to groundwater of deep circulation, fracture vein water connected with hydrogeogenic pressure-infiltration taliks in fault zones

Для этого векторные данные по расположению наледей в разные годы сравнивались в ArcGIS Desktop, методом пересечения полигонов устанавливались наледи, ежегодно формирующиеся в одних и тех же местах (умеренный тип), а также мигрирующие вдоль русел (южный тип). Стабильность в расположении наледей вдоль тектонических нарушений позволяет говорить о разгрузке подземных вод глубокой циркуляции.

Преобладание несплошной криолитозоны в условиях расчлененного рельефа и сравнительно небольшая мощность слоя сезонного промерзания (оттаивания) определяют особенности питания наледей бассейна р. Уды. В большинстве случаев наледи формируются при разгрузке грунтовых вод первого от поверхности водоносного горизонта в процессе сезонного промерзания горных пород. Не менее 29 % наледей территории имеют такой генезис (рис. 6). В районах, где ММП преобладают над тальмами, они связаны с надмерзлотными таликами, радиационными, прирусловыми или подрусовыми.

В районах, где по геолого-геоморфологическим, гидрогеологическим и геокриологическим условиям в холодный период года происходит смыкание слоя сезонного промерзания и водоупорных пород (в т. ч. ММП), наблюдается формирование таких наледей. Чаще всего это долины малых рек. Наледи при этом имеют достаточно большие площади (более 100 тыс. м²) и объемы, меняют из года в года свое местоположение (наледи южного типа).

В районах с горным расчлененным рельефом, отличающихся сложной тектоникой, в местах расположения островов ММП, большую роль играет приток воды из зон трещиноватости в коренных породах, из подмерзлотных и межмерзлотных таликов [16]. В таких случаях наряду с грунтовыми водами долю в питание наледей вносят подземные воды глубоких водоносных горизонтов. О наличии источников глубинных подземных вод с дебитом до 20 л/с в хр. Улан-Бургасы, Зусы и др. упоминается в работе [19]. Смешанное питание с преобладанием доли грунтовых вод характерно не менее чем для 50 % наледей бассейна р. Уды (около 1150 по данным на 2023 г.). Они связаны с грунтово-фильтрационными таликами в среднегорьях с массивно-островным типом распространения ММП. Наледи располагаются в днищах узких речных долин, в распадках вдоль ручьев. Геологическое строение и морфология долин водотоков в среднегорных хребтах территории определяют особенности передвижения подземных вод в водоносных горизонтах под поверхностью. Сток осуществляется по крутым склонам к днищам V-образных или ящикообразных долин малых рек или ручьев. Рыхлые отложения таких долин представлены маломощным аллювием, зачастую днища заполнены грубообломочными, в т. ч. глыбовыми,

склоновыми отложениями, иногда селевыми. Водоупорными горизонтами в таких долинах выступают коренные кристаллические горные породы, весь сток со склонов сосредоточен в рыхлых отложениях, которые в холодный период года промерзают, но за счет многочисленных пустот вода выходит на поверхность. Отличительной особенностью описанных районов является расположение наледей цепочками вдоль русел водотоков, начиная от привершинных частей склонов до устьевых участков речных долин.

Часть наледей территории формируется в районах развития гидрогеогенных напорно-фильтрационных таликов в зонах разломов. В 2023 г. таких на территории насчитывалось 450 (или около 21 %). При анализе учитывались лишь достоверно установленные разломы из [9]. Около половины наледей, связанных с тектоническими нарушениями, расположены у подножий горных хребтов, где происходит разгрузка вод трещинных бассейнов, вторая половина формируется в горах у источников, которые дают начало постоянным водотокам. В питании таких наледей участвуют подмерзлотные подземные воды глубокой циркуляции.

Выделение источников питания и отнесение наледей бассейна р. Уды к зонам развития разных типов таликов отличается определенной условностью и требует дополнительных исследований, так как природные, в т. ч. мерзлотно-геологические, условия территории весьма разнообразны. Кроме того, использование геоинформационных методов ограничено объемами баз данных, имеющихся в распоряжении. Это касается, в частности, сведений о геологии, тектонике и геокриологии. На геологических картах обозначено значительно больше разрывных нарушений, чем есть в оцифрованных базах данных, распространение ММП не всегда совпадает с имеющимися данными, существуют разные схемы.

Наледи являются естественным хранилищем подземных вод на поверхности. В Забайкалье воду наледей традиционно использовали для орошения сенокосов [20]. Подобная необходимость возникала по причине нехватки воды поверхностных водотоков и ограниченного использования подземных вод [5]. Начало вегетационного периода растений приходится на наиболее засушливые месяцы (май – начало июня), когда осадков на территории выпадает не более 10–15 мм (по м/с Новая Курба), поэтому необходимость в воде крайне велика. Наледи, формирующиеся по долинам малых рек, при таянии фактически обеспечивают их сток [21], часть которого используется (забирается) оросительными системами. Отдельные наледи в разных частях бассейна р. Уды накапливаются искусственно, путем перекрытия русел небольших водотоков и отведения воды на сенокосы, и в настоящее время (рис. 7).



a/a

б/б

Рис. 7. Использование наледи как источника водоснабжения в сельском хозяйстве: а) оросительный канал для забора воды при таянии наледи у подножья хр. Улан-Бургасы; б) искусственно накопленная наледь на сенокосе в долине р. Воровки

Fig. 7. Using icings as a source of water supply in agriculture: a) an irrigation canal for collecting water when the icing melts at the foot of the Ulan-Burgasy ridge; b) artificially accumulated icing in hayfields in the Vorovka river valley

Учитывая современные тенденции развития сельского хозяйства, выражающиеся в увеличении поголовья скота, площадей сенокосов и пашни, данный опыт использования наледей в бассейне р. Уды в народно-хозяйственных целях целесообразно тиражировать.

Заключение

По результатам исследования выявлено, что в бассейне р. Уды в холодный сезон года образуется до 2,2 тыс. наледей, преимущественно подземных вод. Комплексными работами, включавшими картографирование и полевые наблюдения, установлено, что около 30 % из них формируется за счет выхода на поверхность грунтовых вод при сезонном промерзании горных пород. Об этом свидетельствуют сравнительно небольшие размеры таких наледей и их зависимость от метеорологических факторов среды, в частности от количества осадков теплого сезона года, предшествующего периоду образования наледей. До 1100 наледей ежегодно наблюдаются в одних и тех же местах, что связано с геолого-геоморфологическими и гидрогеологическими особенностями районов их формирования. В питании таких наледей участвуют подмерзлотные подземные воды глубоких водоносных горизонтов, разгрузка которых происходит по сквозным таликам, в т. ч. в зонах разломов. Питание большинства наледей комплексное, а изучение доли разных источников (грунтовые воды, межпластовые подмерзлотные и т. д.) – важная задача будущих исследований, так как они позволяют оценить запасы подземных вод, определить возможности их использования и предусмотреть ме-

роприятия по защите от наледей населенных пунктов и объектов инфраструктуры.

В многогодные климатические циклы площади и объемы наледей в бассейне р. Уды увеличиваются в 2 раза по сравнению с маловодными, т. е. наблюдается цикличность синхронная изменению общего увлажнения. Выявленных направленных трендов в динамике интенсивности развития наледей не выявлено, вместе с тем наблюдается увеличение количества средних наледей и сокращение числа очень крупных.

Согласно современным представлениям наледи, как объекты криосферы, являются маркерами изменения состояния криолитозоны. Это подтверждается многолетними исследованиями, проводимыми в районах со сплошным типом распространения ММП [3, 22]. Важным и не изученным до конца остается вопрос о том, как наблюдаемое на сегодняшний день по всему северному полушарию Земли увеличение температур воздуха влияет на сезонную и многолетнюю мерзлоту на южной границе криолитозоны [18]. Изучение наледей южной геокриологической зоны поможет найти ответ на данный вопрос. Вместе с тем требуется расширение территориальных границ исследования. Связано это с необходимостью более детального анализа влияния различных факторов на интенсивность наледных процессов. В частности, в бассейне р. Уды особенности тектоники определяют разгрузку подземных вод там, где высока концентрация разломных структур, а потому и наледей в таких районах больше. В этой связи интересно рассмотреть территории, отличающиеся по геолого-геоморфологическим и другим особенностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г. Наледи Забайкалья. – Чита: ЧитГУ, 2006. – 212 с.
2. The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions / Т. Epsom, О. Makarieva, Р. Morse, D. Kane, V. Alekseev, Р. Marsh // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2020. – № 31. – Р. 383–395.
3. Наледи-тарыны Северо-Востока России по историческим данным / В.Р. Алексеев, О.М. Макарьева, Н.В. Нестерова, А.А. Землянская, А.Н. Шихов, А.А. Осташов // *Арктика и Антарктика*. – 2021. – № 4. – С. 75–118.
4. Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. Наледи зоны БАМ: экспедиционные исследования. – СПб.: Нестор-История, 2016. – 320 с.
5. Кибанов Г.А., Хандалов В.И., Хараев П.Х. Использование грунтовых вод в земледелии Бурятии и проблемы строительной индустрии. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского статистического управления, 1980. – 40 с.
6. Circum-arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Version 2 / J. Brown, О. Ferrans, J.A. Heginbottom, E. Melnikov. – Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2002. URL: <https://nsidc.org/data/ggd318> (дата обращения 20.07.2023).
7. Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР / под ред. А.И. Ефимова. – М.: Недра, 1970. – 432 с.
8. Черемных А.В. Парагенезы разрывов в крупных разломных зонах Западного Забайкалья // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2018. – Т. 9. – № 3. – С. 889–908. DOI: 10.5800/GT- 2018- 9- 3- 0375
9. ГИС-пакеты оперативной геологической информации. URL: <http://atlaspacket.vsegei.ru/> (дата обращения: 25.09.2022).
10. Мельничук Н.Л. Геокриологические условия южной части Витимского плоскогорья / под. ред. И.А. Некрасова. – М.: Наука, 1967. – С. 70–78.
11. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // *Remote Sens. Environ.* – 1995. – Vol. 54. – P. 127–140. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00137-P
12. Наледи бассейна реки Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным / О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, А.А. Осташов, Н.В. Нестерова // *Лёд и снег*. – 2019. – Т. 59. – № 2. – С. 201–212.
13. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 780. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146604
14. The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, North-Central Mongolia / M. Walther, V. Batsaikhan, A. Dashtseren, Y. Jambaljav, K. Temujin, G. Ulanbayar, U. Kamp // *Erforschung biologischer resourcen der Mongolei*. – 2021. – Vol. 14. – P. 385–398.
15. Петров В.Г. Наледи на Амурско-Якутской магистрали, с альбомом планов наледей. – Л.: Изд-во АН СССР и НИАДИ НКИС СССР, 1930. – 177 с.
16. Романовский Н.Н. О геологической деятельности наледей // *Мерзлотные исследования*. Выпуск XIII. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – С. 66–89.
17. Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada // *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*. – 2015. – № 120. – P. 1670–1686. DOI: 10.1002/2015JF003534
18. Morse P.D., Wolfe S.A. Long-term river icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canadian shield // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2017. – № 28. – P. 580–586. DOI: 10.1002/PPP.1907
19. Вельмина Н.А. Особенности гидрогеологии мерзлотной зоны литосферы. – М.: Недра, 1970. – 328 с.
20. Орошение лугов Сибири с использованием воды, накопленной в наледи / А.Б. Бутуханов, С.Ч. Содбоева, Р.М. Бутуханов, Т.Д. Намдакова, Т.Б. Тодорхоева, Б. Ганчимэг // *Кормопроизводство*. – 2016. – № 12. – С. 21–24.
21. Reedyk S., Woo M., Prowse T. Contribution of icing ablation to stream flow in a discontinuous permafrost area // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1995. – № 32. – P. 3–20.
22. Pavelsky T.M., Zarnetske J.P. Rapid decline in river icings detected in Arctic Alaska: implications for a changing hydrologic cycle and river ecosystems // *Geophysical Research Letters*. – 2017. – № 44. – P. 3228–3235. URL: <https://doi.org/10.1002/2016GL072397> (дата обращения 15.10.2023).

Информация об авторах

Владимир Николаевич Черных, младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. geosibir@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7340>

Баир Зугдырович Цыдыпов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. bz61@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8340-7268>

Батор Валерьевич Содномов, младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. sodnomov@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4099-7226>

Александр Андреевич Аюржанаев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. aaayurzhanayev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2282-7848>

Маргарита Андреевна Жарникова, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. zharnikova@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3428-6724>

Баир Олегович Гуржапов, ведущий инженер лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. bair.gurzhapov@yandex.ru

Ендон Жамьянович Гармаев, доктор географических наук, член-корреспондент РАН, директор Байкальского института природопользования СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. garmaev@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8524-4930>

Поступила в редакцию: 20.10.2023

Поступила после рецензирования: 26.04.2024

Принята к публикации: 19.06.2024

REFERENCES

1. Shesternev D.M., Verkhoturov A.G. *Icings of Transbaikalia*. Chita, ChitGU, 2006. 212 p. (In Russ.)
2. Epsom T., Makarieva O., Morse P., Kane D., Alekseev V., Marsh P. The distribution and dynamics of icings in permafrost regions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, no. 31, pp. 383–395.
3. Alekseev V.R., Makarieva O.M., Nesterova N.V., Zemlyanskova A.A., Shikhov A.N., Ostashov A.A. Icings-taryns of the North-East of Russia according to historical data. *Arctic and Antarctic*, 2021, no. 4, pp. 75–118. (In Russ.)
4. Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V. *Icings of the BAM zone: expeditionary research*. St. Petersburg, Nestor-History Publ., 2016. 320 p. (In Russ.)
5. Kibanov G.A., Khandalov V.I., Kharaev P.Kh. *The use of groundwater in agriculture in Buryatia and the problems of the construction industry*. Ulan-Ude, Buryat statistical department Publ. house, 1980. 40 p. (In Russ.)
6. Brown J., Ferrians O., Heginbottom J.A., Melnikov E. *Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions. Version 2*. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, 2002. Available at: <https://nsidc.org/data/ggd318> (accessed 20 July 2023).
7. *Hydrogeology of the USSR. Vol. XXII. Buryat ASSR*. Ed. by A.I. Efimov. Moscow, Nedra Publ., 1970. 432 p. (In Russ.)
8. Cheremnykh A.V. Parageneses of fractures in large fault zones of west Transbaikalia. *Geodynamics and tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 889–908. DOI: 10.5800/GT-2018-9-3-0375 (In Russ.)
9. *GIS packages of operational geological information*. (In Russ.) Available at: <http://atlaspacket.vsegei.ru/> (accessed: 25 September 2022)
10. Melnichuk N.L. *Geocryological conditions of the southern part of the Vitim Plateau*. Ed. by I.A. Nekrasov. Moscow, Nauka Publ., 1967. pp. 70–78. (In Russ.)
11. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 1995, vol. 54, pp. 127–140. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00137-P
12. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Ice deposits in the Indigirka River basin based on modern Landsat images and historical data. *Ice and snow*, 2019, vol. 59, no. 2, pp. 201–212. (In Russ.)
13. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 780, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146604.
14. Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A., Jambaljav Y., Temujin K., Ulanbayar G., Kamp U. The formation of aufeis and its impact on infrastructure around Ulaanbaatar, North-Central Mongolia. *Erforschung biologischer resourcen der Mongolei*, 2021, vol. 14, pp. 385–398.
15. Petrov V.G. *Aufeis on the Amur-Yakutsk highway, with an album of plans for aufeis*. Leningrad, AN SSSR I NIADI NKIS SSSR Pub., 1930. 177 p. (In Russ.)
16. Romanovsky N.N. On the geological activity of icings. *Permafrost studies*. Moscow, Moscow State University Publ. house, 1973. Iss. XIII, pp. 66–89. (In Russ.)
17. Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, 2015, 120, 1670–1686. DOI: 10.1002/2015JF003534
18. Morse P.D., Wolfe S.A. Long-term river icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canadian shield. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, vol. 28, pp. 580–586. DOI: 10.1002/PPP.1907.
19. Velmina N.A. *Features of the hydrogeology of the permafrost zone of the lithosphere*. Moscow, Nedra Publ., 1970. 328 p. (In Russ.)
20. Butukhanov A.B., Sodboeva S.Ch., Butukhanov R.M., Namdakova T.D., Todorkhoeva T.B., Ganchimeg B. Irrigation of Siberian meadows using water accumulated in ice. *Fodder production*, 2016, no. 12, pp. 21–24. (In Russ.)
21. Reedyk S., Woo M., Prowse T. Contribution of icing ablation to stream flow in a discontinuous permafrost area. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1995, no. 32, pp. 13–20.
22. Pavelsky T.M., Zarnetske J.P. Rapid decline in river icings detected in Arctic Alaska: implications for a changing hydrologic cycle and river ecosystems. *Geophysical Research Letters*, 2017, no. 44, pp. 3228–3235. Available at: <https://doi.org/10.1002/2016GL072397> (accessed 15 October 2023).

Information about the authors

Vladimir N. Chernykh, Junior Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. geosibir@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9365-7340>

Bair Z. Tsydyпов, Cand. Sc., Senior Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. bz61@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8340-7268>

Bator V. Sodnomov, Junior Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. sodnomov@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4099-7226>

Alexander A. Ayurzhanayev, Cand. Sc., Senior Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. aaayurzhanayev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2282-7848>

Margarita A. Zharnikova, Cand. Sc., Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. zharnikova@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3428-6724>

Bair O. Gurzhapov, Leading Engineer, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. bair.gurzhapov@yandex.ru

Endon Z. Garmayev, Dr. Sc., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 8, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. garmayev@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8524-4930>

Received: 20.10.2023

Revised: 26.04.2024

Accepted: 19.06.2024