

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 551.328

doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179

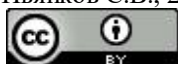
**КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НАЛЕДЕЙ
В ТРАНСГРАНИЧНОМ БАСЕЙНЕ Р. ЧИКОЙ****Владимир Николаевич Черных^{1✉}, Александр Андреевич Аюржанаев², Маргарита Андреевна Жарникова³, Батор Валерьевич Содномов⁴, Андрей Николаевич Шихов⁵, Баир Зугдырович Цыдыпов⁶, Ендон Жамьянович Гармаев⁷, Сергей Васильевич Пьянков⁸**^{1,2,3,4,6,7} Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия^{5,8} Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия¹ geosibir@yandex.ru ✉² aaayurzhanayev@yandex.ru³ rita_zharnikova@mail.ru⁴ sodnomov@binm.ru⁵ and3131@inbox.ru⁶ bz61@mail.ru⁷ garend1@yandex.ru⁸ pyankovsv@gmail.com

Аннотация. Бассейн трансграничной р. Чикой является крупнейшим по площади среди водосборных территорий основных притоков р. Селенга. Как и для бассейна р. Селенги в целом, для него характерно широкое распространение наледей. В работе приводятся результаты картографирования наледей и их распределение в зависимости от различных физико-географических характеристик. На основе данных космической съемки Landsat-8 за 2019 г. впервые для данной территории составлена картографическая база данных наледей, которая включает 6319 объектов на общей площади 140 км². Площадь крупнейшей наледи составляет 671,13 тыс. м². Среднее значение, медиана и мода равны 22,16, 12,86 и 10,24 тыс. м², соответственно. Большинство наледей расположены на высотах 900–1200 м и на склонах восточной экспозиции. При этом наледи не выявлены в западной части бассейна р. Чикой и в привершинном поясе хребтов. В районе исследования преимущественно распространены трещинные породы, что указывает на ведущую роль подземных вод в формировании наледей. Наибольшая наледность прослеживается на территориях с годовой суммой осадков в диапазоне 350–460 мм и со среднегодовой температурой –2,5...–3 °С. В ландшафтной структуре наледи распространены в низко- и среднегорных таежных лиственнично-темнохвойных ландшафтах. Около 80% наледей расположены на комплексах дерново-подбуров, подбуров, дерново-подзолов и других сопутствующих почв. Выявлено, что уровень наледности не пропорционален естественным ресурсам подземных вод, что может быть вызвано как несовершенством исходной карты подземных вод, так и нехарактерным проявлением наледей в 2019 г. Полученная база данных станет основой для ретроспективных и прогнозных оценок динамики наледей в бассейне рек Чикой и Селенга.

Ключевые слова: бассейн р. Чикой, р. Селенга, наледи, Landsat, ландшафты, почвы, подземные воды, температура, осадки, рельеф

Сведения о финансировании. Работа выполнена в рамках Государственного задания БИП СО РАН (АААА-А21-121011990023-1) и при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-17-00207) в части обработки спутниковой информации и картографирования.

Для цитирования: Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В. Картографирование наледей в трансграничном бассейне р. Чикой // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 3(62). С. 169–179. doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179.



CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179

ICING MAPPING IN THE CHIKOY RIVER TRANSBOUNDARY BASIN

Vladimir N. Chernykh^{1✉}, Alexander A. Ayurzhanayev², Margarita A. Zharnikova³, Bator V. Sodnomov⁴,
Andrey N. Shikhov⁵, Bair Z. Tsydypov⁶, Endon Zh. Garmaev⁷, Sergey V. Pyankov⁸^{1,2,3,4,6,7} Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia^{5,8} Perm State National Research University, Perm, Russia¹geosibir@yandex.ru✉²aaayurzhanayev@yandex.ru³rita_zharnikova@mail.ru⁴sodnomov@binm.ru⁵and3131@inbox.ru⁶bz61@mail.ru⁷garend1@yandex.ru⁸pyankovsv@gmail.com

Abstract. The basin of the transboundary Chikoy River is the largest in terms of area among the catchment areas of the main tributaries of the Selenga River. The Selenga basin as a whole is characterized by a wide distribution of icing. The paper presents the results of mapping icings and their distribution according to various physical and geographical characteristics. Based on the Landsat-8 satellite imagery for 2019, a cartographic database of icings was compiled for the first time for this territory. The database includes 6,319 objects on a total area of 140 km². The largest icing is 671.13 thousand m² in area. The mean value, median, and mode are 22.16, 12.86, and 10.24 thousand m², respectively. Most of the icings are located at altitudes of 900–1,200 m and on the slopes of the eastern exposure. Icings were not found in the western part of the Chikoy River basin and in the near-top belt of the ridges. Fissure rocks are predominant in the study area, which indicates the leading role of groundwater in the formation of icing. The greatest icing coverage is found in areas with annual precipitation in the range of 350–460 mm and with an average annual temperature of –2.5 ... –3°C. In the landscape structure, icing is common in low- and mid-mountain taiga larch-dark coniferous landscapes. About 80% of the icings are located on the complexes of soddy podburs, podburs, soddy podzols, and other associated soils. The level of icing coverage was found to be not proportional to the natural resources of groundwater, which can be caused by both the imperfection of the original groundwater map and the uncharacteristic manifestation of icing in 2019. The resulting database will become the basis for retrospective and predictive assessments of the icing dynamics in the Chikoy and Selenga River basins.

Key words: Chikoy River, Selenga River, icing, Landsat, landscapes, soils, groundwater, temperature, precipitation, relief

Financial support. the research was performed as part of state assignment of the Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (AAAA-A21-121011990023-1) and with the support of the Russian Science Foundation (project No. 20-17-00207) provided for satellite data processing and mapping.

For citation: Chernykh V.N., Ayurzhanayev A.A., Zharnikova M.A., Sodnomov B.V., Shikhov A.N., Tsydypov B.Z., Garmaev E.Zh., Pyankov S.V. (2022). Icing mapping in the Chikoy river transboundary basin. *Geographical Bulletin*. No. 3(62). Pp. 169–179. doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-169-179.

Введение

Вопросы картографирования наледей являются актуальными для Забайкалья и, в особенности, для бассейна р. Селенги, поскольку данный район мало изучен в этом отношении. Несмотря на то, что наледи Сибири и Дальнего Востока являются объектами всесторонних исследований уже больше века, начиная с работы [3; 11], Селенгинское среднегорье и сопредельные территории, занимающие северную, пограничную часть бассейна р. Селенга, практически не упоминаются в литературе. Связано это, прежде всего, с тем, что здесь в условиях ограниченного распространения сплошной многолетней мерзлоты редко

Картография и геоинформатика

*Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З.,
Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В.*

формируются крупные (гигантские) наледы, которые представляют наибольший интерес для исследователей, а основные объекты относятся скорее к средним, реже к большим (площадью от 1 до 100 тыс. м², по Н.Н. Романовскому) [12]. Кроме того, подавляющее большинство наледей образуются в горных лесных районах, поэтому не представляют большого интереса с точки зрения изучения наледных рисков для хозяйства территории. Возможно поэтому, а также по ряду других причин (незначительному охвату территории полевыми исследованиями, стационарным и полустационарными наблюдениями и т.д.) до сих пор не создана карта распространения наледей в бассейне р. Селенга, отсутствуют достаточные представления об их пространственно-временной динамике, а также о рисках, возникающих при интенсивном развитии наледей вблизи населенных пунктов и объектов инфраструктуры.

Если рассматривать обширный водосбор р. Селенга по бассейнам крупных притоков, то наименее всего, с точки зрения наледеведения, изучен бассейн р. Чикой. На наш взгляд, это обусловлено несколькими факторами:

1. Территория отличается значительной площадью и труднодоступностью. Бассейн р. Чикой, занимая 46200 км², является самым крупным из притоков первого порядка р. Селенга.

2. Бассейн р. Чикой трансграничный, что затрудняет изучение, поскольку треть водосбора находится на территории Монголии.

3. Для большей части территории исследования характерны среднегорный среднерасчлененный рельеф, практически повсеместное преобладание лесной растительности, относительно низкая освоенность и заселенность.

Таким образом, данный район интересен с точки зрения исследования наледей по данным дистанционного зондирования, прежде всего, создания картографической базы данных наледей. Следует отметить, что бассейновый подход при изучении наледей характеризуется рядом преимуществ, раскрытых в [1; 13].

Материалы и методы

Район исследования

Бассейн р. Чикой является трансграничным объектом и располагается на территории России в пределах Республики Бурятия и Забайкальского края и на территории Монголии – в аймаках Сэлэнгэ, Тув, Хэнтий (рис. 1). Площадь бассейна составляет 46200 км². Рельеф территории преимущественно горный, сильно расчлененный, с высотами от 500 до 2600 м. Наиболее крупные орографические единицы представлены Малханским, Асинским, Мензинским, Чикоконским и Хэнтийским хребтами. Климат суровый, резко континентальный.

Характерной особенностью территории является преобладание сплошной многолетней мерзлоты в пределах большей части водосборного бассейна [4; 5]. Этот тип многолетнемерзлых пород (ММП) выделяется в горных районах юга и юго-востока вплоть до нижнего течения р. Чикой, где он сменяется островной мерзлотой. Следует отметить, что в последние годы наблюдаются процессы, указывающие на таяние ММП. Увеличиваются мощность деятельного слоя, глубина протаивания грунтов [16]. Отмечается деградация мерзлоты, что может повлиять на динамику наледных процессов.

Спутниковые данные и выделение наледей

Основой для картографирования распространения наледей послужили безоблачные снимки спутника Landsat-8 (пространственное разрешение 30 м), полученные в период с 03.04.2019 по 28.04.2019, когда уже отсутствует снежный покров, но площадь наледей еще близка к максимальной. В этот период обеспечиваются наилучшие условия для выявления наледей. Контуры наледей выделены методом ручной оцифровки спутниковых изображений, представленных в спектральном синтезе: средний ИК – ближний ИК – красный. Предварительное выделение границ наледных полей осуществлено с помощью

Картография и геоинформатика

Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З.,
Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В.

нормализованного разностного индекса снега NDSI [18]. Значения индекса, превышающие 0,4, соответствуют снежному или ледовому покрову. Применение ручной векторизации наледей обусловлено особенностями района, в частности, небольшим размером ледяных полей, и позволило получить более достоверные результаты.

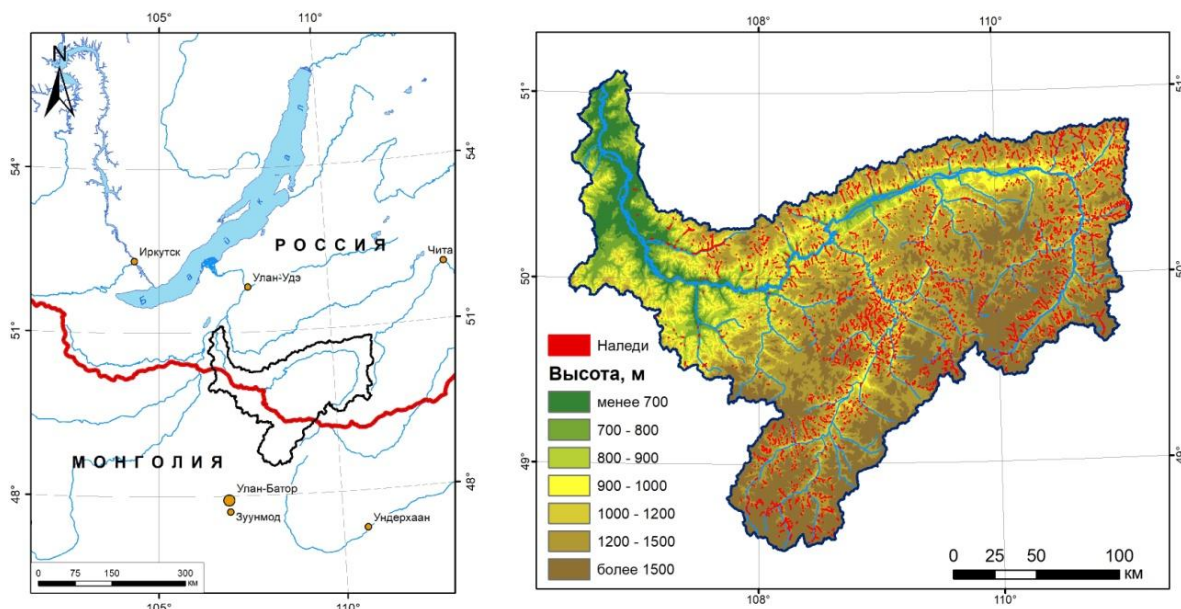


Рис. 1. Бассейн р. Чикой: *а* – географическое положение бассейна;
б – пространственное распределение наледей в его пределах

Fig. 1. The Chikoi River basin: *a* – geographic location of the Chikoi River basin
b – spatial distribution of icings within it

Картографические материалы и рельеф

Для выявления закономерностей распространения наледей в зависимости от физико-географических характеристик района исследования использована серия карт из атласа [15], в частности, геоморфологическая карта, карта лесистости, почвенная карта и карта почвенно-экологического районирования, ландшафтная карта, мерзлотное районирование и карта природных ресурсов подземных вод. Исходные данные для этих карт были доступны в векторном виде.

Поскольку климатический раздел атласа имеет мелкий масштаб, нами привлечена база данных климатических параметров WorldClim [17], а именно, значения среднегодовых температур и сумм осадков, усредненных за период 1970–2000 гг. с пространственным разрешением 30" (около 1 км). Ранее было показано, что для бассейна р. Селенга систематические расхождения значений температуры воздуха и осадков по метеостанциям сети Росгидромета и по данным WorldClim оказались близкими к нулю, что позволяет использовать последние для климатического анализа [7].

Для выделения границ водосбора р. Чикой, а также анализа распределения наледей в зависимости от высоты местности, экспозиции и крутизны склонов использована цифровая модель рельефа (ЦМР) HydroSHEDS (продукт Void-filled DEM 3s), созданная на базе SRTM [19]. Выбор HydroSHEDS обусловлен тем, что для данной ЦМР, в отличие от исходной модели SRTM, выполнена гидрологическая корректировка, что обеспечивает повышение точности выделения водоразделов и тальвегов. Для оценки распределения наледей в зависимости от экспозиции склона использовался растр направления стока по 8 румбам, полученный средствами ArcGIS Spatial Analyst. Поскольку большинство наледей попадали на склоны с разной экспозицией, то в качестве основного направления принималось то,

Картография и геоинформатика

*Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З.,
Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В.*

которому соответствовало наибольшее число пикселей. Если число пикселей для двух разных экспозиций было равным, производился повторный расчет с уменьшением размера анализируемой ячейки. Это позволило снизить долю таких наледей с 15 до 1 %.

Наледность (относительная наледность, коэффициент наледности территории) рассчитывается как отношение площади наледей к площади изучаемого района/зоны [10]. В данной работе наледность вычислена для каждой анализируемой физико-географической характеристики.

Результаты и обсуждение

В результате анализа спутниковых снимков получено, что в бассейне р. Чикой расположены 6319 наледей общей площадью около 140000 тыс. м² (рис. 1). Площадь крупнейшей выделенной наледи составляет 671 тыс. м², наименьшей – 1,8 тыс. м². Средняя и медианная площадь – 22,16 и 12,86 тыс. м² соответственно, асимметрия равна 7,2, эксцесс – 90,8, стандартное отклонение – 32,9 тыс. м². Согласно классификации наледей по размерам [12] более 97% объектов относятся к средним и большим наледям. Оставшаяся доля приходится на малые и очень большие (таблица). Скопления крупнейших из них нами зафиксированы в бассейнах притоков р. Чикой – рек Кудара, Большая, Менза (в ее монгольской части). Отсутствуют очень малые и гигантские наледи.

Классификация наледей бассейна р. Чикой по площади
Classification of icing in the Chikoy River basin by area

<i>Классификация</i>	<i>Площадь, тыс. м²</i>	<i>Количество</i>
Очень малые	< 0,1	0
Малые	0,1–1	0
Средние	1–10	2477
Большие	10–100	3644
Очень большие	100–1000	155
Гигантские	> 1000	0

На наш взгляд, представленная в таблице классификационная принадлежность не дает представления о существующем положении в полной мере – значительная величина коэффициента эксцесса указывает на островершинность распределения наледей по площади, пик которого приходится на 10,24 тыс. м² (значение моды), т.е. основное количество наледей сосредоточено вблизи границы разделения на средние и большие наледи. Таким образом, наряду с использованием тех или иных морфологических классификационных схем, нелишне приводить основные параметры распределения количества наледей по их площади или объему.

Следует отметить, что в некоторых областях возможен недоучет небольших наледей вследствие высокого проективного покрытия леса (лесистость восточной части бассейна р. Чикой составляет 80 % и является наибольшей в бассейне оз. Байкал), а также сравнительно низкого пространственного разрешения снимков. В данной работе выбор снимков Landsat, несмотря на возможность использования изображений более высокого разрешения Sentinel-2, обусловлен их продолжительным временным охватом, что дает возможность в дальнейшем исследовать долговременную динамику наледных полей.

На рис. 2, а представлено высотное распределение показателей наледности и относительной площади местности между высотами. В целом можно отметить, что характер распределения симметричный с несколько большим перевесом в сторону возвышенных местностей. Наибольшее распространение наледей наблюдается на высотах 900–1200 м, при этом территории в диапазоне 1200–1500 м занимают почти 40% площади бассейна р. Чикой.

Орография района исследования определяет доминирование северных (18,1%) и южных склонов (16,5%). Доли остальных экспозиций распределены равномерно и составляют около

Картография и геоинформатика

Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З.,
Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В.

10% площади бассейна. Преобладание наледей отмечено на склонах восточной экспозиции (0,84%), а также северной и западной – 0,40 и 0,36%, соответственно (рис. 2, б). Большая часть наледей занимает склоны по всему диапазону крутизны от 0 до 22°, однако 15 самых крупных объектов, площадью более 300 тыс. м², располагаются в пологих местностях с крутизной не более 2,3°, тогда как площади 20 наледей на самых крутых склонах (более 15°) не превышают 27 тыс. м², при этом их средняя площадь составляет 8,2 тыс. м².

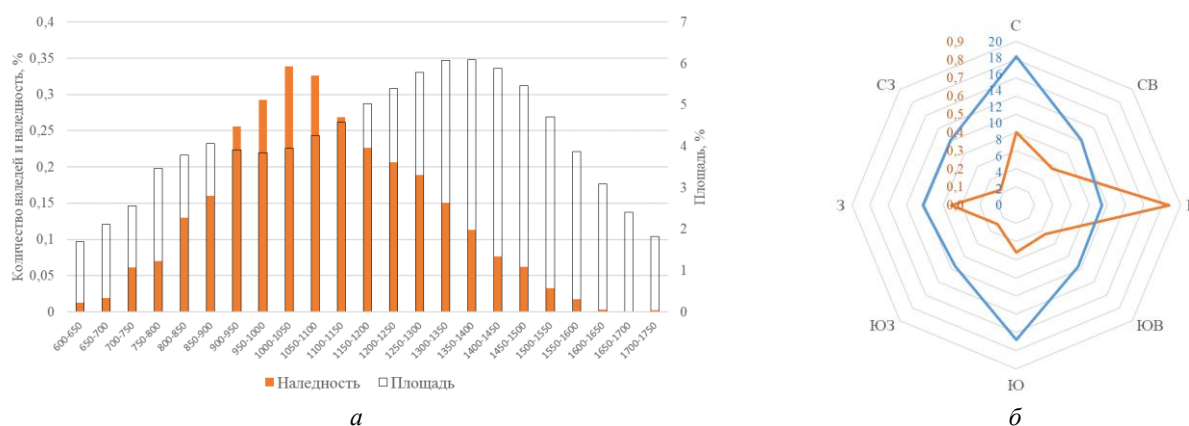


Рис. 2. Показатели наледности: а – распределение наледности и площади бассейна по высотам местности, %
б – экспозиции склонов, %

Fig. 2. Indicators of icing coverage: а – of ice cover and the basin area by terrain elevation, %
б – slope exposures, %

Распределение наледей в зависимости от климатических характеристик территории проанализировано по данным WorldClim 2.0. Следует отметить, что взаимосвязь наледности с климатическими переменными выражена через высоту местности над уровнем моря. Так, наименьшей наледностью характеризуются районы с минимальной годовой суммой осадков (так, в наиболее сухой западной части бассейна находится всего 3% наледей). С другой стороны, мало наледей в привершинных зонах хребтов, где выпадает наибольшее количество осадков, но наледность составляет всего 0,008%. В высотной зоне 900–1200 м, которая характеризуется наибольшей наледностью, годовое количество осадков составляет 380 мм. Среднегодовая температура воздуха в высотном поясе 900–1200 м, который характеризуется наибольшей наледностью, составляет $-2,5^{\circ}\dots-3,0^{\circ}\text{C}$. Наиболее холодные привершинные зоны хребтов, в которых среднегодовая температура воздуха составляет ниже -5°C , а также наиболее теплая западная часть бассейна (среднегодовая температура воздуха выше $-0,5^{\circ}\text{C}$), отличаются минимальной наледностью (менее 0,01%).

Картографирование показало, что наибольшим количеством наледей отличаются районы с горным расчлененным рельефом, занимающие 2/3 водосборного бассейна. Так, наледность территорий с сильнорасчлененным рельефом может достигать 0,39%, со среднерасчлененным – 0,22%. Максимальная концентрация характерна для небольших межгорных котловин, в которых заложены долины малых рек притоков р. Чикой. В устьевых частях таких долин наледность составляет 0,23%. Несмотря на высокие показатели наледности, лишь 9% общего числа наледей образуются в устьях малых водотоков. Это количество меньше по сравнению с тем, которое отмечается в горах, но они отличаются морфометрией, большими площадями и мощностью. Относительно небольшая часть наледей зафиксирована в низкогорье на западе бассейна (наледность до 0,03%) и гольцах Чикоконского хребта (0,07%).

Наледи играют важную роль в функционировании ландшафтов территории. Анализ распределения наледей по природным комплексам в бассейне р. Чикой показывает, что наименьшая наледность (около 0,14%) наблюдается в районах распространения степных, горно-таежных светлохвойных ландшафтов (геосистем) подгорных шлейфов и межгорных

Картография и геоинформатика

*Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З.,
Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В.*

понижений. Нижнегорные и среднегорные таежные лиственнично-темнохвойные ландшафты характеризуются наибольшим распространением наледей. Здесь формируется до 70% всех запасов льда, в котором аккумулируется практически весь зимний сток. При медленном таянии под пологом лесной растительности наледи обеспечивают питание многочисленных малых рек и ручьев территории в засушливый период конца весны – начала лета.

Преобладание таежных ландшафтов определяет распространение в районе исследования почв, принадлежащих среднегорному Верхнечикойскому округу дерново-подбуров, подбуров, дерново-подзолов, подзолов и буроземов грубогумусовых почв. В совокупности в лесном поясе (светлохвойная и темнохвойная тайга) формируется 80% всех наледей, а относительная наледность достигает 0,37%. Это определяет значительную роль наледей во влагообмене между атмосферой, грунтами и почвой лесопокрываемых территории. Отметим, что самая высокая наледность (более 0,85%) приурочена к району распространения серых метаморфических почв в бассейне р. Кудара (приток I порядка р. Чикой), где выделены наиболее крупные наледи. Минимальное количество наледей формируются в районах распространения аллювиальных серогумусовых и темногоумусовых почв на западе бассейна (0,09%).

Многолетнемерзлые породы играют одну из ключевых ролей в образовании наледей. Так, в зоне сплошной и прерывистой мерзлоты наледность составляет 0,41%, в островной – 0,29%. Тем не менее проявление наледей во многом складывается из комбинации климатических и геокриологических условий, влияющих на режим подземных вод [1; 2]. Бассейн р. Чикой отличается широким распространением трещинных пород, способствующих выходу и намерзанию подземных вод на поверхности земли в результате напорной фильтрации. Наиболее часто наледи встречаются в зоне трещинных интрузивных и трещинно-пластовых метаморфических пород (рис. 2, а), что говорит об их генетической принадлежности к наледям подземных вод.

Зависимость наледности и ресурсов подземных вод не подчиняется логической закономерности, согласно которой она должна возрастать по мере увеличения модуля подземного стока. Максимальное значение наледности (0,41%) соответствует области с модулем стока в диапазоне 1,0–2,0 л/с·км², тогда как в самой обеспеченной подземным водами области (3,0–5,0 л/с·км²) наледность составляет лишь 0,15% (рис. 2, б). На наш взгляд, отмеченное несоответствие может быть объяснено особенностями создания карты «Естественные ресурсы подземных вод» [15]. В основу оценки величины модуля подземного стока положен метод расчленения гидрографа общего речного стока опорных бассейнов, располагающихся в пределах однородных водоносных комплексов и в одинаковых геолого-гидрогеологических условиях [13]. Вероятными причинами противоречий являются несовершенство привлеченных карт, в т.ч. их мелкий масштаб и генерализация, применение метода аналогий для территорий, где отсутствуют длительные ряды наблюдений за стоком, а также возможной погрешностью метода расчленения гидрографа. Не исключено, что в 2019 г., для которого был составлен слой наледей, наблюдалось их нехарактерное распределение по району исследования, поэтому привлечение многолетних данных даст более достоверную зависимость. На примере Северо-Востока России показана эффективность определения общих ресурсов подземных вод, учитывая ведущую роль наледей в регулировании подземного и речного стока [1]. Это дает основание полагать, что пространственная картина распространения наледей может стать основой для проведения такой оценки в бассейнах р. Чикой и основного водотока – р. Селенга.

Выявленное число наледей в бассейне р. Чикой почти в 20 раз больше их количества, охваченного стационарными и эпизодическими наблюдениями специалистами Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН в 2016 г [16]. Очевидно, что в данном

Картография и геоинформатика

Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З.,
Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В.

случае спутниковые снимки обеспечивают достаточно полный охват наледных полей, однако ряд их свойств (химический состав, роль речного и подземного стока, криогенные процессы и др.) можно определить только на основе полевых работ. В нашем исследовании не представлены объемные характеристики наледей, поскольку космическая съемка дает лишь плановое изображение объектов. Привлекательной выглядит идея бассейновой оценки их объема с помощью глобальных ЦМР, однако в настоящее время разрешение и вертикальная точность таковых не позволяют провести расчеты с удовлетворительной погрешностью. В последние годы переживающие бурное развитие гражданские беспилотные летательные аппараты могут быть оснащены прецизионным съемочным оборудованием и способны создавать высокоточные модели рельефа на больших площадях, что позволит существенно упростить и повысить точность наблюдений за наледями.

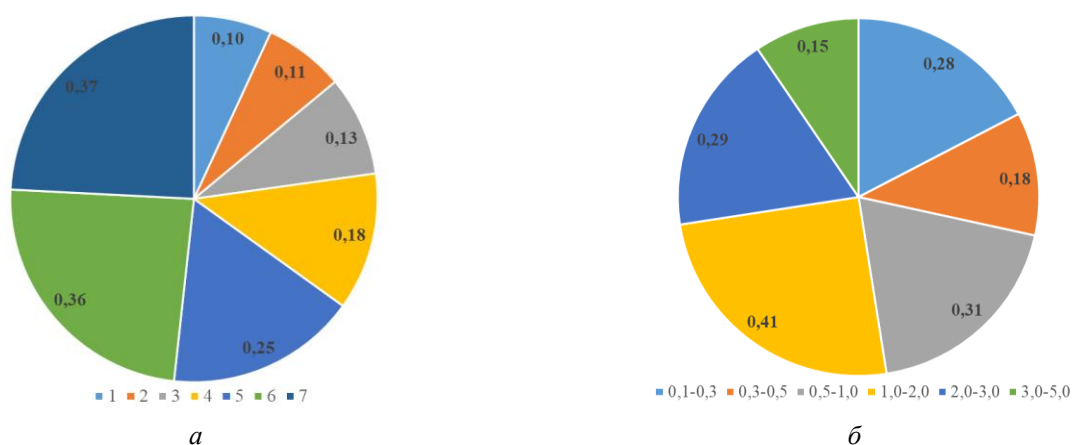


Рис. 3. Наледность в бассейне р. Чикой: *a* – по основным водоносным комплексам:

1 – трещинные кайнозойских базальтов, 2 – трещинные и трещинно-карстовые протерозойских пород, 3 – трещинные докайнозойских эффузивных пород, 4 – порово-пластовые и трещинно-пластовые мезозойских осадочных отложений, 5 – порово-пластовые рыхлых кайнозойских отложений, 6 – трещинные интрузивных пород, 7 – пластово-трещинные и трещинно-пластовые осадочно-метаморфических кембрийских пород;

б – по ресурсам подземных вод (в среднемноголетних модулях подземного стока, л/с км²)

Fig. 3. Icing coverage in the Chikoy River basin. *a* – by main water-bearing complexes: 1 – fractured Cenozoic basalts, 2 – fractured and fractured-karst Proterozoic rocks, 3 – fractured pre-Cenozoic effusive rocks, 4 – pore- and fractured-plate Mesozoic sediments, 5 – pore-plate fractured loose Cenozoic sediments, 6 – fractured intrusive rocks, 7 – fractured-fractured and fractured-plastic sedimentary-metamorphic Cambrian rocks;

b – by groundwater resources (in average annual modules of groundwater flow, l/s km²)

Заключение

Применение данных ДДЗ и ГИС-технологий позволило получить актуальную, наиболее достоверную на сегодняшний день карту распространения наледей в бассейне р. Чикой, а также выявить общие закономерности их распределения по элементам рельефа и природным комплексам во взаимосвязи с основными климатическими характеристиками. Вместе с тем неясными остаются вопросы пространственно-временной динамики наледей. Выявление общих закономерностей межгодовой динамики и миграции наледей при помощи долговременных серий спутниковых изображений и их анализа в сочетании с метеорологическими наблюдениями является дальнейшей задачей исследований. Поскольку для бассейна р. Чикой отсутствуют полноценные каталоги наледей, аналогичные созданным для зоны БАМа или Северо-Востока России [2; 6; 8; 9], то проведенная инвентаризация станет основой для ретроспективной оценки. Кроме того, будет продолжена работа по созданию базы данных наледей Забайкалья по снимкам Landsat – самым длительным рядам наблюдений Земли из космоса. Это особенно актуально в настоящий момент, так как карты расположения наледей для большей части Забайкалья не существуют,

Картография и геоинформатика

Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З.,
Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В.

а угрозы, связанные с активным развитием наледей, заключающиеся в подтоплении населенных пунктов и объектов инфраструктуры, становятся все более актуальными с наступлением очередного многоводного климатического цикла.

Картографирование наледей является первым и наиболее важным шагом в изучении этого явления на той части территории Забайкалья, которой в прошлом, в период рассвета геокриологических исследований, не уделили должного внимания. Современные методы позволяют детально оценить текущую обстановку, выполнить ретроспективный анализ, сделать прогнозы развития обстановки.

Список источников

1. Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Землянскова А.А., Шихов А.Н., Осташов А.А. Наледи-тарыны Северо-Востока России по историческим данным // Арктика и Антарктика. 2021. № 4. С. 75–118.
2. Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Землянскова А.А. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-востока России. Новосибирск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2022. 302 с.
3. Алексеев В.Р. Наледи. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. 159 с.
4. Баженова О.И. Современная денудация предгорных степных равнин. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2018. 259 с.
5. Геокриология СССР: Горные страны юга Сибири. М.: Недра, 1989. Т. 3. 360 с.
6. Кадастр к карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1:2 000 000. Магадан: Центральная комплексная тематическая экспедиция Северо-Восточного геологического управления, 1958. 398 с.
7. Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В., Шихов А.Н., Аюржанаев А.А., Содномов Б.В., Абдуллин Р.К., Цыдыпов Б.З., Андреев С.Г., Черных В.Н. Картографирование современных изменений климата в бассейне реки Селенга // Метеорология и гидрология. 2022. № 2. С. 62–74. doi: 10.52002/0130-2906-2022-2-62-74.
8. Каталог наледей зоны БАМ: Наледи бассейна р. Муи. Л.: Гидрометеиздат, 1981. Вып. 2. 84 с.
9. Каталог наледей зоны БАМ: Наледи верхней части бассейна р. Чары. Л.: Гидрометеиздат, 1980. Вып. 1. 62 с.
10. Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2016. 320 с.
11. Подъяконов С.А. Наледи Восточной Сибири и причины их возникновения // Изв. РГО. 1903. Т. 39. С. 305–337.
12. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 336 с.
13. Шепелев В.В. О преимуществах бассейнового подхода при изучении закономерностей распространения наледей // Лёд и Снег. 2016. Вып. 56(3). С. 381–386.
14. Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г. Наледи Забайкалья. Чита: ЧитГУ, 2006. 212 с.
15. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2015. 145 с.
16. Badmaev N., Bazarov A., Kulikov A., Gyninova A., Sympilova D., Shakhmatova E., Badmaeva N., Gonchikov B.-M., Mangataev A. Global climate change: wild fires and permafrost degradation in the Republic of Buryatia (Eastern Siberia, Russia) // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 320. No. 012017. p. 1–7. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/320/1/012017/pdf> (дата обращения: 16.05.2022).
17. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2017. Vol. 37(12). P. 4302–4315.
18. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data // Remote Sens. Environ. 1995. Vol. 54. P. 127–140.
19. Lehner B., Verdin K., Jarvis A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data // Eos, Transactions, American Geophysical Union. 2019. Vol. 89(10). P. 93–94.
20. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia). Earth System Science Data. 2019. Vol. 11(1). P. 409–420.
21. Van der Sluijs J., Kokelj S.V., Fraser R.H., Tunnicliffe J., Lacelle D. Permafrost terrain dynamics and infrastructure impacts revealed by UAV photogrammetry and thermal imaging // Remote Sensing. 2016. Vol. 10. № 1734. doi: 10.3390/rs10111734.

References

1. Alekseev, V.R., Makar'eva, O.M., Nesterova, N.V., Zemljanskova, A.A., Shihov, A.N., Ostashov, A.A. (2021), Naledi-taryns of the North-East of Russia according to historical data, *Arktika i Antarktika*, no. 4, pp. 75–118.
2. Alekseev, V.R., Makar'eva, O.M., Shihov, A.N., Nesterova, N.V., Ostashov, A.A., Zemljanskova, A.A. (2022), *Atlas gigantских наледей-тарынов Северо-востока России* [Atlas of giant icing-taryns of the North-East of Russia], Novosibirsk, Russia.
3. Alekseev, V.R., (1987), *Naledi* [Icings]. Nauka, Novosibirsk, USSR.
4. Bazhenova, O.I. (2018), *Sovremennaja denudacija predgornykh stepnykh ravnin* [Modern denudation of foothill steppe plains], Izd. Geo, Novosibirsk, Russia.
5. Geokriologija SSSR: *Gornye strany juga Sibiri* [Geocryology of the USSR: Mountain countries of southern Siberia] (1989), Izd. Nedra, Moscow, USSR.

Картография и геоинформатика

Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З.,
Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В.

6. *Kadastr k karte naledej Severo-Vostoka SSSR masshtaba 1:2 000 000* [Cadastre to the map of icings of the North-East of the USSR, scale 1:2 000 000] (1958), Magadan, USSR.
7. Garmaev, E.Zh., P'jankov, S.V., Shihov, A.N., Ajurzhanayev, A.A., Sodnomov, B.V., Abdullin, R.K., Tsydyпов, B.Z., Andreev, S.G., Chernyh, V.N. (2022), Mapping of modern climate changes in the Selenga river basin. *Russian Meteorology and Hydrology*, no. 2, pp. 62–74. doi: 10.52002/0130-2906-2022-2-62-74.
8. *Katalog naledej zony BAM: Naledi bassejna r. Mui* [Catalog of icings of the BAM zone: Icings of the Mui river basin] (1981), Izd. Gidrometeoizdat. Leningrad, USSR.
9. *Katalog naledej zony BAM: Naledi verhnjej chasti bassejna r. Chary* [Catalog of icings of the BAM zone: Icings of the upper part of the Chara river basin] (1980), Izd. Gidrometeoizdat. Leningrad, USSR.
10. Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V. (2016), *Naledi zony BAM: Ekspedicionnye issledovaniya* [Icings of the BAM zone: Expeditionary research]. Izd. Nestor-Istorija, St. Petersburg, Russia.
11. Pod'jakonov, S.A. (1903), Glazes of Eastern Siberia and the causes of their occurrence. *Izv. RGO*, no. 39, pp. 305–337.
12. Romanovskij, N.N. (1993), *Osnovy kriogeneza litosfery* [Fundamentals of cryogenesis of the lithosphere], Moscow, Russia.
13. Shepelev, V.V. (2016), On the advantages of the basin approach in studying the patterns of icing distribution. *Ljud i Sneg*, no. 56, pp. 381–386.
14. Shesternev, D.M., Verhoturov, A.G. (2006), *Naledi Zabajkal'ja* [Icings of Transbaikalia], Izd. ChitGU, Chita, Russia.
15. *Ekologicheskij atlas bassejna ozera Bajkal* [Ecological Atlas of the Baikal Basin] (2015), Irkutsk, Russia.
16. Badmaev, N., Bazarov, A., Kulikov, A., Gyninova, A., Sympilova, D., Shakhmatova, E., Badmaeva, N., Gonchikov, B.-M., Mangataev, A. (2019), Global climate change: wild fires and permafrost degradation in the Republic of Buryatia (Eastern Siberia, Russia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 320, pp. 1–7, available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/320/1/012017/pdf> (Accessed 16 May 2022).
17. Fick, S.E., Hijmans, R.J. (2017), WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, vol. 37(12), pp. 4302–4315.
18. Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V.V. (1995), Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sens. Environ.*, vol. 54, pp. 127–140.
19. Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A. (2019), New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 89(10), pp. 93–94.
20. Makarieva, O.M., Shikhov, A.N., Ostashov, A.A., Nesterova, N.V. (2019), Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia). *Earth System Science Data*, vol. 11(1), pp. 409–420.
21. Van der Sluijs, J., Kokelj, S.V., Fraser, R.H., Tunnicliffe, J., Lacelle, D. (2016), Permafrost terrain dynamics and infrastructure impacts revealed by UAV photogrammetry and thermal imaging. *Remote Sensing*, vol. 10, no. 1734. doi: 10.3390/rs10111734.

Статья поступила в редакцию: 17.05.22; одобрена после рецензирования: 25.05.22; принята к опубликованию: 19.09.22.

The article was submitted: 17 May 2022; approved after review: 25 May 2022; accepted for publication: 19 September 2022.

Информация об авторах

Information about the authors

Владимир Николаевич Черных

Младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии,
Байкальский институт природопользования СО РАН;

670047, Россия, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ,
ул. Сахьяновой 6

e-mail: geosibir@yandex.ru

Vladimir N. Chernykh

Junior Researcher, Laboratory of Geoecology, Baikal
Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the
Russian Academy of Sciences;

6, st. Sakhyanovoy, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047,
Russia

Александр Андреевич Аюржанаев

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
лаборатории геоэкологии, Байкальский институт
природопользования СО РАН;

670047, Россия, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ,
ул. Сахьяновой 6

e-mail: aaayurzhanayev@yandex.ru

Alexander A. Ayurzhanayev

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory
of Geoecology, Baikal Institute of Nature Management of the
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

6, st. Sakhyanovoy, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047,
Russia

Маргарита Андреевна Жарникова

Кандидат географических наук, научный сотрудник
лаборатории геоэкологии, Байкальский институт
природопользования СО РАН;

670047, Россия, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ,
ул. Сахьяновой 6

e-mail: rita_zharnikova@mail.ru

Margarita A. Zharnikova

Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Laboratory
of Geoecology, Baikal Institute of Nature Management of the
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

6, st. Sakhyanovoy, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047,
Russia

Картография и геоинформатика

*Черных В.Н., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Содномов Б.В., Шихов А.Н., Цыдыпов Б.З.,
Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В.*

Батор Валерьевич Содномов

Младший научный сотрудник лаборатории геоэкологии, Байкальский институт природопользования СО РАН;

670047, Россия, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой 6

e-mail: sodnomov@binm.ru

Андрей Николаевич Шихов

Кандидат географических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики, инженер ГИС-центра ПГНИУ;

614990, Россия, Пермь, ул. Букирева 15

e-mail: and3131@inbox.ru

Баир Зугдырович Цыдыпов

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологии, Байкальский институт природопользования СО РАН;

670047, Россия, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой 6.

e-mail: bz61@mail.ru

Эндон Жамьянович Гармаев

чл.-корр. РАН, директор Байкальского института природопользования СО РАН;

670047, Россия, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой 6.

e-mail: garend1@yandex.ru

Сергей Васильевич Пьянков

Доктор географических наук, профессор, проректор по научной работе и инновациям ПГНИУ, заведующий кафедрой картографии и геоинформатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет;

614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: pyankovsv@gmail.com

Bator V. Sodnomov

Junior Researcher, Laboratory of Geoecology, Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

6, st. Sakhyanovoy, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russia

e-mail: sodnomov@binm.ru

Andrey N. Shikhov

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, Engineer of the GIS Center of Perm State National Research University;

15, st. Bukireva, Perm, 614990, Russia

e-mail: and3131@inbox.ru

Bair Z. Tsydyrov

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Geoecology, Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

6, st. Sakhyanovoy, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russia

e-mail: bz61@mail.ru

Endon Zh. Garmayev

Corr. member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

6, st. Sakhyanovoy, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russia

e-mail: garend1@yandex.ru

Sergey V. Piankov

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation of PSU, Head of the Department of Cartography and Geoinformatics, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Вклад авторов

Черных В.Н. – идея статьи, сбор и обработка данных, написание статьи.

Аюржанаев А.А. – идея статьи, обработка и анализ данных, написание статьи.

Жарникова М.А. – обработка и анализ данных, редактирование статьи.

Содномов Б.В. – обработка и анализ данных.

Шихов А.Н. – редактирование статьи.

Цыдыпов Б.З. – редактирование статьи.

Гармаев Е.Ж. – организация работ, редактирование статьи.

Пьянков С.В. – редактирование статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Chernykh V.N. – the idea of the article; collection and processing of data; writing the article.

Ayurzhanayev A.A. – the idea of the article; data processing and analysis; writing the article.

Zharnikova M.A. – data processing and analysis; editing the article.

Sodnomov B.V. – data processing and analysis.

Shikhov A.N. – editing the article.

Tsydyrov B.Z. – editing the article.

Garmayev E.Zh. – organization of work; editing the article.

Pyanokov S.V. – editing the article.

The authors declare no conflict of interest.