

УДК 551.328

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ДИНАМИКА НАЛЕДЕЙ В СЕЛЕНГИНСКОМ СРЕДНЕГОРЬЕ

© 2024 г. В. Н. Черных

Байкальский институт природопользования СО РАН

E-mail: geosibir@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.02.2024 г.

После доработки 02.09.2024 г.

Принята к публикации 29.09.2024 г.

Приводятся результаты изучения наледей в пределах территории Селенгинского среднегорья (Западное Забайкалье). Составлены современные и ретроспективные карты их распространения, получены актуальные сведения по основным морфометрическим характеристикам, межгодовой пространственной динамике, изменчивости площадей. Сравнение векторных данных по расположению наледей в разные годы в совокупности с материалами, полученными в ходе полевых экспедиционных исследований, позволило сделать предварительные оценки по их принадлежности к разным генетическим типам. Установлено, что в Селенгинском среднегорье преобладают наледи, образование которых происходит в результате выхода на поверхность грунтовых вод при сезонном промерзании горных пород. Около 30% наледей связаны с источниками подземных вод, поступающих из глубоких водоносных горизонтов (ключевые наледи).

Межгодовая изменчивость размеров наледей синхронна циклам увлажнения, наряду с этим наблюдается направленность на увеличение общего количества наледей. При этом число очень крупных в настоящее время сократилось в 2 раза по отношению к 1990 г., возросло количество средних и малых наледей. Указанные тенденции являются следствием изменения состояния природной среды под воздействием климатических процессов (увеличение температуры воздуха) и антропогенных факторов, влияние которых на интенсивность наледных процессов в Селенгинском среднегорье существенно.

Ключевые слова: наледь, многолетняя мерзлота, Селенгинское среднегорье, климат, температура воздуха, осадки, сток

DOI: 10.31857/S0869607124020055, **EDN:** MOPXIJ

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдающиеся в настоящее время климатические изменения, выражающиеся, прежде всего, в увеличении температуры воздуха, негативно сказываются на состоянии природной среды районов с распространением многолетней мерзлоты. Влияют они и на наледи, которые как в северной, так и в южной геоэкологической зоне играют важное значение в перераспределении стока и являются неотъемлемой частью природных ландшафтов. Тренд в изменении состояния многих гигантских наледей-тарынов в районах со сплошным типом распространения многолетне-мерзлых пород (ММП) характеризуется сокращением площадей и объемов некоторых из них [7]. Для территории Селенгинского среднегорья современных сведений

о направленности пространственной динамики наледей, а также об изменении их площадей и объемов нет.

Наледи Забайкалья в разное время изучались в горных районах, прилегающих к оз. Байкал [8], в зоне проектирования и строительства БАМа в Северном [1, 9], на территории Читинской области (ныне — Забайкальского края) в Восточном Забайкалье [18]. Западное Забайкалье, большую часть которого занимает орографическая область Селенгинское среднегорье — наименее изученный район.

Особенностями территории, определяющими специфику формирования наледей, являются неоднородность в распространении ММП, горный, расчлененный рельеф, выраженные циклические и направленные климатические изменения.

Основная цель данного исследования — оценка современного распространения наледей с оценкой изменения интенсивности наледообразования под влиянием природных и антропогенных факторов. В задачи работы входило картографирование наледей по космическим снимкам, оценка их основных морфометрических характеристик, установление особенностей генезиса и развития в современных климатических условиях, выявление влияния различных факторов среды на интенсивность наледных процессов.

В работе наряду с результатами картографирования представлены фактические данные, полученные в процессе мониторинговых исследований наледей, проведенных в период с 2020 г. по настоящее время.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве территории исследования рассматривается Селенгинское среднегорье в границах, обозначенных в работе Н. Ф. Фадеевой [16], со склонами прилегающих горных хребтов, в пределах которых формируется часть стока, общей площадью 82.4 тыс. км².

Территория представляет собой сочетание средневисотных (до 1500–1800 м) горных хребтов с плоскими вершинами и межгорных впадин забайкальского типа, абсолютная высота днищ которых — 550–700 м. Складчатые структуры сложены в основном гранитоидами, в меньшей степени представлены метаморфическими породами, впадины межгорных котловин выполнены юрско-меловыми и неоген-четвертичными отложениями разного генезиса. Рельеф создан дифференцированными медленными движениями земной коры, которые выражались в формировании сложных антиклинальных складок (в рельефе соответствуют хребтам) и опусканием синклиналей, обусловившим образование котловин. Блоковое строение земной коры определяет наличие многочисленных тектонических разломов, которые хорошо выражены в рельефе [12].

Климат резко континентальный, с продолжительным (до 6 месяцев) холодным сезоном. Среднегодовые температуры воздуха на большей части территории отрицательны, в пределах -1.3°C (м/с Цакир) — -1.6°C (м/с Хилок). Положительны среднегодовые температуры воздуха в южной части территории (м/с Кяхта, 3.7°C). Наблюдается тренд на повышение температуры воздуха. С 2013 г., по данным м/с Улан-Удэ, среднегодовые значения положительны. В январе температура воздуха опускается до -40°C и ниже. В год выпадает от 230 до 500 мм осадков [6]. Как и для Забайкалья в целом, для Селенгинского среднегорья характерна климатическая цикличность, выражающаяся в смене маловодных и многоводных циклов.

Территория исследования относится к Западно-Забайкальской гидрогеологической складчатой области, в пределах которой выделено не менее 11 артезианских бассейнов межгорных котловин и 12 бассейнов трещинных вод в горных хребтах [4]. Последние по суммарной площади преобладают (около 65% территории). В Селенгинском среднегорье большая часть осадков (до 90%) выпадает в теплый период года, максимум (до 200–300 мм) приходится на вторую половину июля и август, поэтому, главным образом, за счет них осуществляется питание подземных вод.

Формирование и распределение подземных вод определяется суммой физико-географических и геолого-гидрогеологических факторов, из которых первостепенное значение имеют атмосферные осадки и наличие ММП [4]. Для 26.8% (около 22.1 тыс. км²) рассматриваемой территории Селенгинского среднегорья характерен редкоостровной тип распространения ММП, массивно-островной — 35.6% (около 29.2 тыс. км²), прерывистый — 12.9% (около 10.7 тыс. км²), сплошной — 24.7% (20.4 тыс. км²) [21]. Температура многолетнемерзлых толщ колеблется от -0.9°C на юге до -3°C на севере и в горах. Глубина залегания кровли ММП также различна, от 1.5 м, чаще всего значительно глубже. Мощность слоя сезонного промерзания-оттаивания составляет 2–2.2 м [15]. Так как многолетняя мерзлота имеет в большей степени островное распространение, то подземные воды разных водоносных горизонтов чаще всего гидравлически связаны. Вместе с тем в местах сплошного распространения ММП в горах выделяются надмерзлотные и подмерзлотные водоносные горизонты. Разгрузка последних происходит, в частности, по зонам разломов.

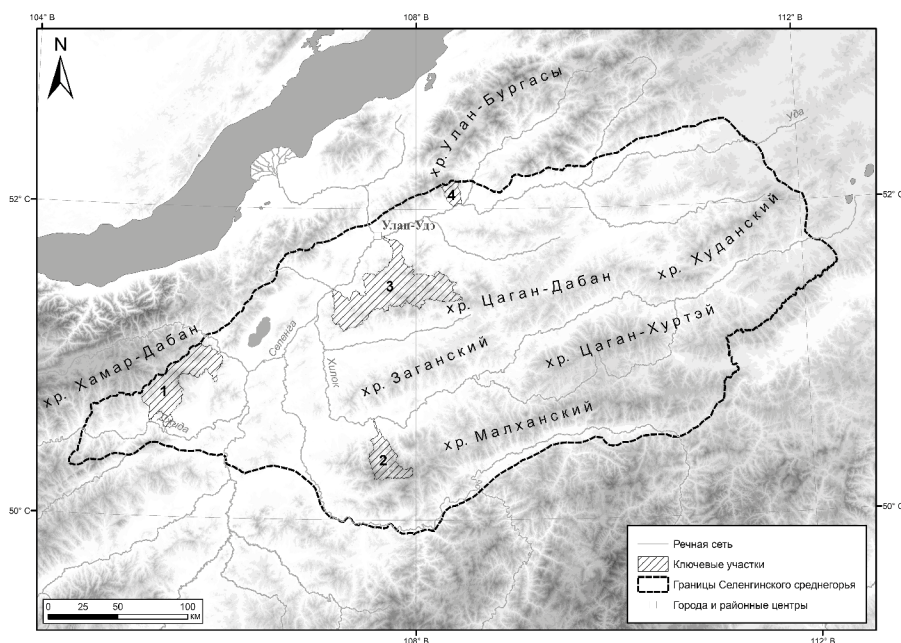


Рис. 1. Территория исследования. Цифрами обозначены ключевые участки исследования, смежные бассейны малых рек в отрогах горных хребтов: 1 — Хамар-Дабан; 2 — Малханский, 3 — Цаган-Дабан, 4 — Улан-Бургасы.

Fig. 1. Study area. Numbers indicate key study sites, neighboring basins of small rivers in the spurs of mountain ranges: 1 — Khamar-Daban; 2 — Malkhansky, 3 — Tsagan-Daban, 4 — Ulan-Burgasy.

Основу гидрографической сети составляют р. Селенга с притоками, средними (площадь водосбора до 50 тыс. км²) реками Чикой, Хилок, Джида и др. Густота речной сети 0.6–0.8 км/км² [19]. Территория дренируется множеством малых рек и ручьев [10]. Ледостав на реках начинается во второй половине ноября, вскрытие ото льда — в середине апреля. Малые реки территории зимой перемерзают.

Для выявления особенностей динамики наледей составлены карты их распространения в Селенгинском среднегорье. Картографирование выполнено на основе данных космической съемки Landsat-4–5 и Landsat-8 (пространственное разрешение 30 м). При составлении карты современного распространения наледей использовано 10 сцен Landsat-8 (2022 г.), по снимкам 1990, 2000 и 2018 гг. (33 сцены Landsat-4–5) получена серия ретроспективных карт. Автоматизированная обработка данных космической съемки проведена на основе анализа пороговых значений NDSI (нормализованный снежно-ледовый индекс) [24] по технологии, описанной в работах [22, 20, 23]. Для определения границ буферных зон, в пределах которых проводились расчеты, потребовалась дополнительная детализация гидрографической сети. Тальвеги с руслами водотоков (до I-го порядка по методу Стралера–Философова), вдоль которых формируются наледы, выделены при помощи цифровой модели рельефа SRTM с помощью модуля «Гидрология» программного обеспечения ArcGIS. Вдоль них ширина буферов устанавливалась в зависимости от порядка водотоков, от 100 (I-й порядок) до 500 м (малые реки V–VI-го порядка). После вычисления NDSI полученные растровые изображения конвертированы в векторный формат (полигоны). Расчлененный рельеф территории, преобладание лесной, древесной и древесно-кустарниковой растительности, под пологом которой неравномерно тает и длительное время сохраняется снег, затрудняет автоматизированное распознавание наледей небольших размеров по NDSI, поэтому в процессе работы применялись также визуальное дешифрирование и ручная оцифровка.

На основе полученных векторных данных по расположению наледей проведен пространственный анализ. Полигоны сравнивались между собой методом пересечения для выявления наледей, которые ежегодно формируются в одних и тех же местах, с данными SRTM для оценки доли наледей, формирующихся в горных районах и межгорных котловинах, а также с векторными данными баз из [5] (дороги, населенные пункты).

Полевые экспедиционные исследования проводились на ключевых участках (см. рис. 1). В целях получения актуальных сведений о мощности и объемах наледей в 2021–2023 гг. проведены наледемерные съемки. В лесном поясе, где на наледных полях произрастает древесная растительность, мощность льда определялась по заранее установленным вешкам в период максимального развития наледей (конец марта–начало апреля), а также по меткам, оставленным в этот период на деревьях, но уже после таяния льда. В лесостепном и степном поясе (долины рек в межгорных котловинах) для расчетов мощности наледей использованы данные съемки с борта БПЛА с дополнительной наземной привязкой опознаками, координаты которых (включая высотные отметки) определялись GNSS-приемником EFT M1. В марте–апреле получены цифровые модели рельефа (ЦМР) с поверхностями наледей, в июне — ЦМР наледных полей. На небольших наледях, площадью до 50 тыс. м², располагающихся в местах выходов источников подземных вод, толщина льда устанавливалась с помощью бурения лунок. Бурение льда проводилось профилями по всей площади наледи.

Для наблюдения за температурой воздуха в период формирования и разрушения наледей использованы автоматические термометрические датчики НОВО UA-002-08. Датчики устанавливались вблизи наледных полей на высоте 1.5 м над землей на период с сентября по июль в 2020–2023 гг. Тот же тип датчиков использован для выявления температурных характеристик горных пород. Для этого они устанавливались в рыхлые отложения пойм малых рек в районах формирования наледей (ключевой участок «Цаган-Дабан») методом шурфовки на глубину до 1.5 м с интервалом 0.5 м.

Данные по количеству осадков и динамике температуры воздуха получены с метеостанции «Улан-Удэ» (координаты 51°50' с.ш. 107°37' в.д., абс. выс. 530 м). Дополнительно, по отдельным наледным бассейнам, слой осадков теплого сезона года (за период с 2020 по 2023 гг.) установлен с помощью автоматических регистраторов осадков НОВО RG3-M.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе данных космической съемки составлены карты распространения наледей в Селенгинском среднегорье. На них представлены все объекты с размером в плане более 3.6 тыс. м² (4 пикселя снимка Landsat). Наледи подразделены по площадям, исходя из классификации В.Г. Петрова [11]. В современных климатических условиях (2022 г.) в пределах района исследования формируется 7.7 тыс. наледей суммарной площадью 206.4 км² (рис. 2).

Преобладают наледи, которые по размерам относятся к большим и средним (площади от 0.001 до 0.1 км²). Гигантских, с площадями более 1 км², по снимкам 2022 г. выделено 2. Относительная наледность территории составляет 0.24%. Максимальные значения (до 0.39%) характерны для горных территорий бассейнов рек Джиды (Нижне-Джидинский геоморфологический район), Чикой и Уда. Минималь-

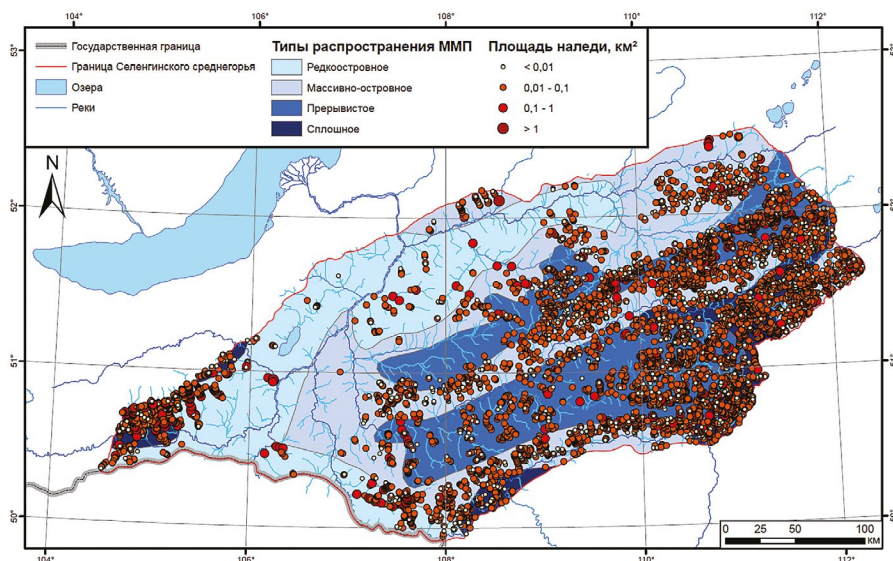


Рис. 2. Современное распространение наледей в Селенгинском среднегорье (схема многолетней мерзлоты по [21]).

Fig. 2. Current distribution of icings in the Selenga Middle Mountains (permafrost pattern according to [21]).

ное количество наледей фиксируется в центральной части Селенгинского среднего-рья. Наледность здесь не превышает 0.01%.

Средняя мощность наледей варьирует от 0.4 м у тех, что формируются вдоль водотоков I-го порядка в межгорных распадках, до 2.2 м у наледей в долинах малых рек. Наибольшая зафиксированная мощность наледи составляет 3.5 м.

Сведения по количеству наледей и их площадям в маловодные и многоводные климатические циклы представлены в таблице 1. В данной таблице период мало-водья характеризует 2018 г. (в 2015–2017 гг. в теплый сезон года выдало не более 70 мм осадков), многоводный цикл наблюдался в конце 1990-х — начале 2000 гг. и фикси-руется в настоящее время.

В табл. 2 представлено распределение наледей в межгорных котловинах и в гор-ных районах. Большая часть из них формируются в горах (бассейны трещинных вод), где преобладают лесные ландшафты.

Наледные процессы начинаются во второй половине ноября с переходом сред-несуточной температуры воздуха ниже значения -15°C . Интенсивность их возрас-тает в начале января, по всей территории исследования наблюдается постоянный прирост площадей и объемов наледей. В конце февраля горные породы промерзают на максимальную глубину до 1.4 м, температура в них опускается до -5°C . С этого момента и до начала марта образование наледей идет наиболее интенсивно. Таяние, по данным наблюдений 2021–2023 гг., начинается в конце марта–начале апреля,

Таблица 1. Количество и площади наледей в Селенгинском среднегорье (по данным карто-графирования)

Table 1. Number and areas of icings in the Selenga Middle Mountains (based on mapping data)

Годы	Кол-во, шт.	Суммарная площадь, км ²	Наледность, %	Кол-во наледей по интервалам площадей, км ²			
				<0.01	0.01–0.1	0.1–1	>1
1990	5689	269.3	0.32	590	4459	565	3
2000	6572	288.6	0.34	1068	4917	575	5
2018	3429	121.8	0.14	697	2523	208	1
2022	7747	206.4	0.24	2651	4827	267	2

Таблица 2. Наледи в межгорных котловинах / в горных хребтах

Table 2. Icings in intermountain hollows / in mountain ranges

Годы	Кол-во наледей, шт.	Суммарные площади наледей, км ²	Доля от общего количества наледей, %	Доля от общей площади наледей, %
1990	792/4897	61.8/207.5	13.9/86.1	22.9/77.1
2000	1147/5425	67.5/221.1	17.4/82.1	23.3/76.7
2018	474/2955	24.1/97.7	13.8/86.2	18.8/81.2
2022	863/6884	38.8/168.1	11.1/88.9	18.5/81.5

заканчивается на большей части территории в середине мая. Отдельные наледи в горных районах сохраняются под пологом лесной растительности до начала июня. Самые поздние сроки таяния наледей — 15 июня. Многолетних или перелетывающих наледей в Селенгинском среднегорье нет.

ОБСУЖДЕНИЕ

В Селенгинском среднегорье наледи образуются в поймах малых рек, реже — в руслах и поймах средних рек, вдоль ручьев в распадках горных хребтов, в местах выхода на поверхность источников. Они характеризуются интенсивной межгодовой динамикой площадей и объемов (см. табл. 1). В маловодные годы наблюдается сокращение в 2.2–3 раза по сравнению с многоводными, часть наледей в этот период не формируются вообще. Расположение наледей из года в год также сильно варьирует. Отдельные наледи мигрируют вдоль русел водотоков на расстояния до 500 м. Средняя мощность наледей редко превышает 2 м. Все это, а также большое количество наледей свидетельствует о том, что образование значительной части из них связано с сезонным промерзанием горных пород с последующей разгрузкой грунтовых вод под действием криогенного напора. Такие относятся к грунтовым. Формирование их происходит по южному варианту (наледи южного типа) [13].

Сравнением векторных данных по расположению наледей в разные годы установлено, что 2.5 тыс. из них вне зависимости от температуры воздуха и количества осадков предшествующего наледообразованию теплого сезона ежегодно образуются в одних и тех же местах. Такое постоянство может быть связано с особенностями геологии и рельефа, определяющими выход на поверхность грунтовых вод, либо с участием в питании наледей подземных вод глубоких водоносных горизонтов, разгрузка которых происходит в зонах разломов (ключевые, или родниковые, наледи). Поэтому, основываясь на результатах ретроспективного картографирования и данных по морфометрическим характеристикам наледей Селенгинского среднегорья, можно сделать вывод (применительно к текущей природно-климатической обстановке), что как минимум $2/3$ из них относятся к грунтовым наледям подземных вод, $1/3$ — к родниковым наледям подземных вод глубоких водоносных горизонтов.

Вместе с тем с подземными водами глубоких водоносных горизонтов, поступающими по разломам, связаны наледи в местах выходов источников на склонах и у подножий горных хребтов. Таких много вдоль склонов хребтов Малый Хамар-Дабан, Улан-Бургасы и др., где проходят крупные региональные разломы [5]. Наледи, образующиеся в таких местах, обычно имеют небольшие площади (в пределах 50 тыс. м²), мощность до 1.5 м. На некоторых средних реках формируются наледи речных вод. Ежегодно они наблюдаются на р. Илька, иногда на р. Курба, Эгита, Тугнуй. Их формирование происходит при промерзании воды в руслах до дна на мелких участках и перекатах. Часть стока при этом поступает на поверхность с образованием наледи, часть через подрусловые талики продолжает пополнять русло ниже по течению. Наледи речных вод распространяются за пределы русел, затапливают поймы. На одном водотоке может быть несколько таких наледей. В их питании участвуют не только речные, но подземные воды, разгрузка которых происходит через источники в руслах, и считать их наледями исключительно речных вод нельзя. В связи с этим, вопрос определения принадлежности наледей Селенгинского среднегорья к разным генетическим типам, в зависимости от источников питания, является достаточно сложным и до настоящего времени не решенным.

Интересна многолетняя динамика наледей. Картографированием установлена цикличность и направленность в динамике их площадей. Цикличность изменения интенсивности наледообразования синхронна динамике количества осадков теплого сезона года (рис. 3). Это вполне закономерно, учитывая высокую долю наледей грунтовых вод.

Кроме того, за период с 1990 г. по настоящее время наблюдается увеличение количества наледей. За рассматриваемый период стало в 4 раза больше средних, и в 2 раза меньше очень больших наледей (см. табл. 2). Рост числа средних по размерам не связан с простым «дроблением» очень больших. Часто это наледи, которые в рассматриваемом хронологическом отрезке не формировались ранее в тех местах, где они есть сейчас. Наблюдаемый тренд, вероятнее всего, связан с изменением особенностей циркуляции подземных вод в результате смены мерзлотных условий. Измерение температуры в слое сезонного промерзания показывает, что его мощность в настоящее время не превышает 1.4 м (рис. 4а, 4б).

В литературных источниках глубина промерзания горных пород для данной территории в середине XX века составляла 2 м [2]. Уменьшение мощности слоя сезонного промерзания, а там, где ММП имеют сплошное распространение, — рост глубины протаивания, связаны с наблюдающимся повышением температуры воздуха, которое фиксируется по всей России, а в Забайкалье происходит почти в 2 раза быстрее, чем в среднем по стране [3]. Это приводит к увеличению площади сечения и объемов водоносных горизонтов, в которых циркулируют грунтовые воды, что, как правило, вызывает изменение скорости их стока со склонов к межгорным кот-

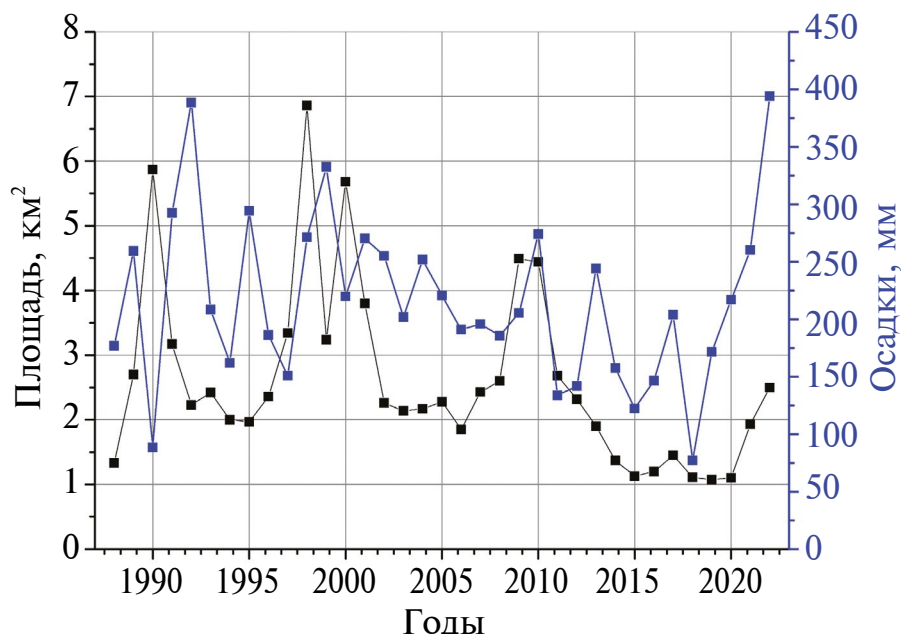


Рис. 3. Динамика площадей наледей на ключевом участке в сравнении с изменением количества осадков теплого сезона года, предшествующего наледообразованию.

Fig. 3. Dynamics of the icings areas at the key site in comparison with the change in precipitation of the warm season of the year preceding the icings formation.

ловицам и росту числа наледей в их пределах, но, как показывают данные табл. 2, этого не наблюдается.

Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что, несмотря на увеличение количества наледей за последние 30 лет, доля тех, что формируются в межгорных котловинах, сократилась с 22.9 до 18.5%, т.е. в горных районах рост их количества составил 4.4%. На такой же процент увеличилась и общая площадь наледей в горах. Это свидетельствует о том, что наиболее значительные изменения наблюдаются не в межгорных котловинах, освоенных и заселенных, а в лесах горных районов. За счет высотной поясности и расчлененности рельефа близкая к сплошному распространению многолетняя мерзлота имеется как раз в горных хребтах, в особенности на склонах северной экспозиции (см. рис. 2). Поэтому описанная динамика, вероятнее всего, связана не только с изменением состояния сезонной мерзлоты, но и с более глубокой трансформации криолитозоны, затрагивающей ММП. Рост числа наледей может быть связан с формированием сквозных таликов, по которым подмерзлотные подземные воды разгружаются на поверхность, а также с формированием новых надмерзлотных водоносных горизонтов там, где раньше была мерзлота.

Увеличение общего количества наледей при понижении с течением времени температуры воздуха в регионе (в частности, в холодный сезон года) было бы закономерным, так как интенсивность наледеобразования во многом зависит от криогенного напора. В Селенгинском среднегорье это происходит на фоне роста температур. Указанные изменения, вероятнее всего, являются следствием антропогенного воздействия на природные комплексы. Горные хребты территории покрыты тайгой. В пределах района исследования площадь лесных насаждений составляет не менее 53 тыс. км² (около 65% территории). По данным [14], в пределах Селенгинского среднегорья только на территории Бурятии потери лесного покрова в результате пожаров и рубок составили 3.5 тыс. км². При этом наиболее значительные площади, где лесной покров пострадал в результате антропогенной деятельности — это подножья и доступные для освоения склоны горных хребтов, т.е. районы активного формирования наледей. Пожары, в большинстве своем спровоцированные человеком, а также рубки приводят к изменению мерзлотно-

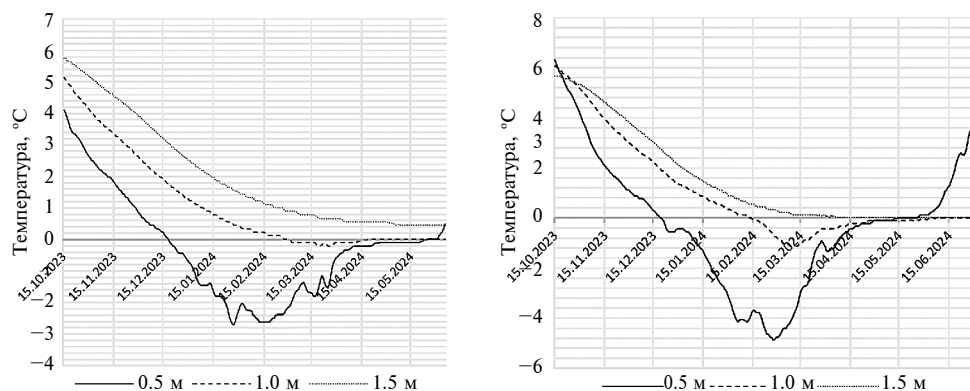


Рис. 4. Динамика температуры слоя сезонного промерзания в 2022–2023 гг. (а) и 2023–2024 гг. (б).

Fig. 4. Dynamics of seasonal freezing layer temperature during the 2022–2023 (a) and 2023–2024 (b) seasons.



Рис. 5. Зарастание прирусловых участков пойм р. Куйтунка ивой на снимках Google Earth): а — 2004, б — 2024 г.

Fig. 5. Overgrowing of the near channel areas of the floodplains of the Kuitunka River with willow on Google Earth images: а — 2004, б — 2024.

гидрогеологических условий и описанному увеличению интенсивности наледообразования.

В межгорных котловинах, где расположены большинство населенных пунктов, развито хозяйство, антропогенное влияние на интенсивность развития наледей также проявляется. Сравнение векторных данных по распространению наледей с расположением населенных пунктов, автомобильных и железных дорог показывает, что в настоящее время из 863 наледей, фиксирующихся в межгорных котловинах, 61 формируется в непосредственной близости или в черте населенных пунктов, а 255 — рядом с автодорогами. Таким образом, более 36% всех наледей районов интенсивного хозяйственного освоения так или иначе связаны с изменением природной среды деятельностью человека. Активное строительство, ремонт и модернизация транспортной и другой инфраструктуры наблюдаются как на территории Бурятии, так и в Забайкальском крае. Зачастую проекты мостов и других водопропускных сооружений не учитывают мерзлотно-гидрогеологических особенностей территории. Как следствие — увеличение интенсивности формирования наледей вблизи линейно-дорожных объектов.

Неправильная эксплуатация гидротехнических сооружений также приводит к формированию наледей. На космических снимках наледи фиксируются рядом с водохранилищами, которые были построены для обеспечения водой оросительных систем. В долинах рек выше водохранилищ наледи формируются тогда, когда перед ледоставом не обеспечен достаточный сброс воды через шлюзы в дамбе, ниже — когда сброс больше, чем расход водотока, наполняющего водохранилище. Такие примеры в пределах территории исследования есть.

Другим фактором, определяющим перераспределение стока грунтовых вод и увеличение количества наледей, являются процессы зарастания прирусловых участков пойм ивняками. За длительный маловодный период, который продолжался с начала 2000-х годов [17] и продолжался до 2018 г., в Селенгинском среднегорье произошла смена системы хозяйствования. По экономическим причинам и в связи с отсутстви-

ем гидрологических угроз не проводились мероприятия по расчистке русел водотоков и прилегающих территорий от зарослей ивы, сократилось поголовье скота, который выступал естественным лимитирующим фактором обильного разрастания кустарников. Результатом стало зарастание пойм. На снимке Google Earth (рис. 5а) 2004 г. хорошо просматривается русло р. Куйтунка, в 2024 г. (рис. 5б) оно неразличимо среди зарослей кустарника. Такое наблюдается в долинах малых рек практически повсеместно.

Корни растений замедляют сток грунтовых вод, что приводит к сохранению их запасов в пойменном аллювии к моменту начала формирования наледей, и, как следствие, увеличивается вероятность их развития.

Оценка влияния природных и антропогенных факторов на динамику наледей рассматриваемого района позволяет сделать выводы о том, что роль последних в изменении интенсивности наледных процессов очень велика. Проявляется это как в местах расположения населенных пунктов, объектов инфраструктуры, так и на незастроенных лесопокрытых территориях. Это одна из главных особенностей развития наледей в Селенгинском среднегорье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимости от природно-климатической обстановки в Селенгинском среднегорье в холодный сезон года формируется от 3.4 до 7.7 тыс. наледей, большинство из которых имеют площади до 0.1 км², характеризуются межгодовой изменчивостью размеров и местоположения.

Большинство наледей территории образуются в результате выхода на поверхность грунтовых вод под действием криогенного напора, возникающего при сезонном промерзании горных пород. Они относятся к наледям грунтовых вод. Примерно 1/3 наледей получают питание из глубоких (в т.ч. — подмерзлотных) водоносных горизонтов (ключевые наледи). Наледи речных вод немногочисленны. Они формируются на средних реках.

В многолетней динамике наледей выделяются циклические и направленные изменения. Циклические связаны с увеличением площадей и объемов наледей в многоводные годы (в 3 раза по сравнению с маловодными), направленные выражаются в росте общего количества наледей за период с 1990 г. по настоящее время с сокращением доли очень больших и увеличением больших, средних и малых.

Происходящие изменения в распределении наледей в большей степени проявляются в горных районах, где преобладают лесные ландшафты, чем в межгорных котловинах, являющихся районами проживания населения и развития хозяйства.

Наблюдаемая динамика наледных процессов связана с изменением мерзлотно-гидрологических условий и особенностей стока грунтовых вод под воздействием природных и антропогенных факторов. В результате уменьшения глубины сезонного промерзания и увеличения мощности слоя сезонного оттаивания, вызванного наблюдающимся потеплением, интенсивность циркуляции подземных вод в приповерхностных водоносных горизонтах увеличивается, что приводит к росту общего количества наледей. На перераспределение стока и интенсивность наледных процессов влияют антропогенные факторы, такие как вырубка лесов, строительство и эксплуатация инженерно-технических сооружений.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-27-00402 «Наледи северной (российской) части бассейна р. Селенга».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В. Р., Макарьева О. М., Нестерова Н. В., Землянскова А. А., Шихов А. Н., Остахов А. А.* Наледи-тарыны Северо-Востока России по историческим данным // Арктика и Антарктика. 2021. № 4. С. 75–118.
2. *Галай Б. Ф.* Глубина промерзания и температурный режим грунтов района г. Улан-Удэ (предварительные результаты) // Материалы первой научной конференции молодых ученых Восточно-Сибирского технологического института. Улан-Удэ, 1969 г. с. 147–149
3. *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 // Метеорология и гидрология. 2022. №2. с. 62–74
4. Гидрогеология СССР. Том XXII. Бурятская АССР. Под ред. А. И. Ефимова. — М.: Недра, 1970. — 432 с.
5. ГИС—пакеты оперативной геологической информации / [Электронный ресурс] // www.karpinskyinstitute.ru: [сайт]. — URL: <http://atlaspacket.vsegei.ru> (дата обращения: 25.09.2021).
6. *Елаев Э. Н.* Организация биоты и динамика природной среды (Селенгинское среднегорье) / Е. Н. Елаев, С. Г. Андреев, А. А. Будаева, Е. Ж. Гармаев, Д. В. Кобылкин, С. Г. Рудых, А. В. Турунхаев. — М.: Изд-во Перо, 2013, — 126 с.
7. *Землянскова А. А., Алексеев В. Р., Шихов А. Н., Остахов А. А., Нестерова Н. В., Макарьева О. М.* Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.). Лед и Снег. 2023; 63(1):71–84
8. *Ковальчук О. А.* Наледи и русловые запасы льда центральной части Восточного Саяна. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Иркутск. 2005 г. 24 с.
9. *Марков М. Л., Василенко Н. Г., Гуревич Е. В.* Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования. — СПб.: Нестор-История. 2016. 320 с.
10. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / Шепелев В. В., Толстихин О. Н., Пигузова В. М. и др. — Новосибирск: Наука, 1984. 209 с.
11. *Петров В. Г.* Наледи на Амурско-Якутской магистрали, с альбомом планов наледей. Ленинград: Изд-во АН СССР и НИАДИ НКИС СССР. 1930. 177 с
12. *Преображенский В. С.* Типы местности и природное районирование Бурятской АССР / В. С. Преображенский, Н. В. Фадеева, Л. И. Мухина, Г. М. Томилов. - Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1959. — 218 с.
13. *Романовский Н. Н.* О геологической деятельности наледей // Мерзлотные исследования. Выпуск XIII. — М.: Изд-во МГУ, 1973. — С. 66–89.
14. *Содномов Б. В., Аюржанаев А. А., Черных В. Н., Жарникова М. А.* Потери лесного покрова Республики Бурятия в XXI веке // Успехи современного естествознания. 2020. № 10. С. 44–49.
15. *Соловьева Л. Н.* Морфология и температура криолитозоны Саяно-Байкальской горной области (на примере Бурятской АССР). Новосибирск: Наука, 1964. 152 с.
16. *Фадеева Н. В.* Селенгинское среднегорье: природные условия и районирование. Бурятское книжное издательство. 1961. 169 с.
17. *Фролова Н. Л., Зотов Л. В., Белякова П. А., Григорьев В. Ю., Сазонов А. А.* Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 243–255.
18. Шестернев Д. М., Верхотуров А. Г. Наледи Забайкалья. — Чита: ЧитГУ, 2006. — 212 с.
19. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук. Иркутск. 2015. 145 с.
20. *Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M.* Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin // Science of the Total Environment. — 2021. — V. 780. — P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146604>
21. *Brown J., Ferrians O., Heginbottom J., Melnikov E.* Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. 2002. <https://nsidc.org/data/ggd318>
22. *Ensom T., Makarieva O., Morse P., Kane D., Alekseev V., Marsh P.* The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions // Permafrost and Periglac Process. 2020. P. 1–13. doi: 10.1002/ppp.2051
23. *Gagarin L., Wu, Q., Cao W., Jiang G.* Icings of the Kunlun Mountains on the Northern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau, Western China: Origins, Hydrology and Distribution. Water 2022, 14, 2396. <https://doi.org/10.3390/w14152396>

24. 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. — V. 54. — P. 127–140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)

Distribution and Dynamics of Icings in the Selenga Middle Mountains

V. N. Chernykh

Baikal Institute of Nature Management SB RAS

E-mail: geosibir@yandex.ru

Abstract — The paper presents the results of the study on icings in the Selenga middle mountains (Western Transbaikalia). Current and retrospective maps of their distribution have been drawn up, relevant data on the main morphometric characteristics, interannual spatial dynamics, and area variability have been obtained. Comparison of vector data on the location of the icings in different years, together with the materials obtained during field expedition studies, allowed us to preliminarily assess their belonging to different genetic types. It has been established that in the Selenga Middle Mountains, the predominant icings are formed as a result of groundwater rise to the surface during the seasonal freezing of rocks. About 30% of the icings are associated with groundwater sources coming from deep aquifers (key icings), river water icings are very rare.

The interannual variability of the size of icings is in sync with the hydration cycles, at the same time, there is a tendency for an increase in the total number of icings. At the same time, the number of very large icings has decreased 2 times as compared to 1990, while the number of medium and small icings has increased. These trends are a consequence of changes in the state of the natural environment under the influence of climatic processes (increase in air temperature) and anthropogenic factors, which influence on the intensity of the icing formation processes in the Selenga Middle Mountains is significant.

Keywords: icing, permafrost, Selenga Middle Mountains, climate, air temperature, precipitation, runoff

REFERENCES

1. Alekseev V. R., Makareva O. M., Nesterova N. V., Zemlyanskova A. A., Shihov A. N., Ostashov A. A. Naledi-taryny Severo-Vostoka Rossii po istoricheskim dannym // *Arktika i Antarktika*. 2021. № 4. S. 75–118.
2. Galaj B. F. Glubina promerzaniya i temperaturnyj rezhim gruntov rajona g. Ulan-Ude (predvaritelnye rezultaty) // *Materialy pervoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh Vostochno-Sibirskogo tekhnologicheskogo instituta*. Ulan-Ude. 1969. s. 147–149
3. Garmayev E. Zh., Pyankov S. V., Shihov A. N., Ayurzhanayev A. A., Sodnomov B. V., Abdullin R. K., Cydyrov B. Z., Andreev S. G., Chernykh V. N. Kartografirovaniye sovremennykh izmeneniy klimata // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2022. №2. s. 62–74
4. *Gidrogeologiya SSSR*. Tom XXII. Buryatskaya ASSR. Pod red. A. I. Efimova. — M.: Nedra, 1970. 432 s.
5. GIS—pakety operativnoj geologicheskoy informacii / [Elektronnyj resurs] // [www.karpinsky-institute.ru: \[sajt\]](http://www.karpinsky-institute.ru: [sajt]). — URL: <http://atlaspacket.vsegei.ru/> (data obrashcheniya: 25.09.2021).
6. Elaev E. N. Organizaciya bioty i dinamika prirodnoj sredy (Selenginskoe srednegor'e) / E. N. Elaev, S. G. Andreev, A. A. Budaeva, E. Zh. Garmayev, D. V. Kobylkin, S. G. Rudykh, A. V. Turunhaev. — M.: Izd-vo Pero, 2013. — 126 s.
7. Zemlyanskova A. A., Alekseev V. R., Shihov A. N., Ostashov A. A., Nesterova N. V., Makar'eva O. M. Mnogoletnyaya dinamika gigantskoj Anmangyndinskoj naledi na Severo-Vostoke Rossii (1962–2021 gg.). *Lyod i Sneg*. 2023; 63(1): 71–84. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010167>

8. Kovalchuk O. A. Naledi i ruslovye zapasy l'da centralnoj chasti Vostochnogo Sayana. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskikh nauk. Irkutsk. 2005 g. 24 s.
9. Markov M. L., Vasilenko N. G., Gurevich E. V. Naledi zony BAM: Ekspedicionnye issledovaniya. — SPb.: Nestor-Istoriya, 2016. — 320 s.
10. Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya Vostochnoj Sibiri / Shepelev V. V., Tolstih O. N., Piguzova V. M. i dr. — Novosibirsk: Nauka, 1984. — 209 s.
11. Petrov V. G. Naledi na Amursko-Yakutskoj magistrali, s al'bomom planov naledej. Leningrad: Izd-vo AN SSSR i NIADI NKIS SSSR, 1930. 177 s.
12. Preobrazhenskij V. S. Tipy mestnosti i prirodnoe rajonirovanie Buryatskoj ASSR / V. S. Preobrazhenskij, N. V. Fadeeva, L. I. Muhina, G. M. Tomilov. — Moskva: Izd-vo Akad. nauk SSSR, 1959. — 218 s.
13. Romanovskij N. N. O geologicheskoy deyatel'nosti naledej // Merzlotnye issledovaniya. Vypusk XIII. — M.: Izd-vo MGU, 1973. — S. 66–89.
14. Sodnomov B. V., Ayurzhanayev A. A., Chernyh V. N., Zharnikova M. A. Poteri lesnogo pokrova Respubliki Buryatiya v XXI veke // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2020. № 10. S. 44–49.
15. Soloveva L. N. Morfologiya i temperatura kriolitozony Sayano-Bajkal'skoj gornoj oblasti (na primere Buryatskoj ASSR). Novosibirsk: Nauka, 1964. 152 s.
16. Fadeeva N. V. Selenginskoe srednegor'e: prirodnye usloviya i rajonirovanie. Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo. 1961. 169 s.
17. Frolova N. L., Zotov L. V., Belyakova P. A., Grigorev V. YU., Sazonov A. A. Mnogoletnie kolebaniya stoka rek v bassejne Selengi // Vod. resursy. 2017. T. 44. № 3. S. 243–255.
18. Shesternev D. M., Verhoturov A. G. Naledi Zabajkalya. — Chita: CHitGU, 2006. — 212 s.
19. Ekologicheskij atlas bassejna ozera Bajkal. Izd-vo Instituta geografii im. V. B. Sochavy Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. Irkutsk. 2015. 145 s.
20. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin // Science of the Total Environment. — 2021. — V. 780. — P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146604>
21. Brown J., Ferrians O., Heginbottom J., Melnikov E. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. 2002. <https://nsidc.org/data/ggd318>
22. Ensom T., Makarieva O., Morse P., Kane D., Alekseev V., Marsh P. The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions // Permafrost and Periglacial Process. 2020. P. 1–13. <https://doi.org/10.1002/ppp.2051>
23. Gagarin L., Wu, Q., Cao W., Jiang G. Icings of the Kunlun Mountains on the Northern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau, Western China: Origins, Hydrology and Distribution. Water 2022, 14, 2396. <https://doi.org/10.3390/w14152396>
24. 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. — V. 54. — P. 127–140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Владимир Николаевич Черных, м.н.с. лаборатории геоэкологии Байкальского института природопользования СО РАН, geosibir@yandex.ru.

Vladimir Nikolaevich Chernykh, junior researcher Laboratory of Geoecology, Baikal Institute of Nature Management SB RAS, geosibir@yandex.ru.