

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОЩАДИ НАЛЕДЕЙ В БАССЕЙНЕ Р. СЕЛЕНГИ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕЁ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

© 2025 г. Е. Ж. Гармаев¹, В. Н. Черных¹, С. В. Пьянков²,
А. Н. Шихов^{2,3,*}, А. А. Аюржанаев¹, Д. А. Богатырев²

¹Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*e-mail: and3131@inbox.ru

Поступила в редакцию 23.01.2025 г.

После доработки 20.02.2025 г.

Принята к публикации 18.04.2025 г.

По спутниковым снимкам Landsat и Sentinel-2 получены оценки многолетней изменчивости площади наледей в различных частях бассейна р. Селенги в 1990–2024 гг. Выявлен тренд снижения площади наледей (3.5% за 10 лет). Выявлены статистически значимые зависимости площади наледей от температуры воздуха в декабре, марте и апреле и с количеством осадков в предшествующий тёплый период.

Ключевые слова: наледи, многолетние изменения, спутниковые снимки Landsat и Sentinel-2, ре-анализ ERA5, осадки, температура воздуха, расход воды, корреляции

DOI: 10.31857/S2076673425020114, EDN: FOGKPK

ВВЕДЕНИЕ

Наледи – это форма наземного сезонного (а иногда и многолетнего) оледенения земной поверхности, возникающая в результате намораживания излившихся на поверхность подземных или речных вод (Ensom et al., 2020; Алексеев и др., 2022). Наледи широко распространены в зоне многолетней мерзлоты как в арктическом и субарктическом поясах (Соколов, 1975; Yoshikawa et al., 2007; Morse, Wolfe, 2015), так и в горных регионах умеренного пояса с резко континентальным климатом, таких как Центральная Азия (Brombierstäudl et al., 2021, 2023; Gagarin et al., 2022), Алтае-Саянская горная область и юг Восточной Сибири (Марков и др., 2016), а также Монголия (Froehlich, Slupik, 1982; Chernykh et al., 2024). Наледи существенно трансформируют внутригодовое распределение речного стока (Makarieva et al., 2022), а также могут рассматриваться как индикаторы динамических запасов подземных вод и интенсивности водообмена (Алексеев, 2015; Ensom et al., 2020; Алексеев и др.,

2022). Наледи регулярно наносят ущерб дорожной сети и другим объектам инфраструктуры, в связи с чем они рассматриваются как опасное природное явление (Алексеев и др., 2022; Черных, Гармаев, 2023). Поэтому закономерности их пространственного распределения и многолетней изменчивости привлекают внимание исследователей в разных регионах мира.

В последние годы ключевую роль в изучении наледей играют спутниковые снимки, поскольку наледи расположены в основном в труднодоступных горных районах. На основе снимков со спутников Landsat и Sentinel-2 созданы картографические базы данных наледей для северной части Канады (Morse, Wolfe, 2015), Северо-Востока России (Makarieva et al., 2019, 2022; Алексеев и др., 2022), высокогорных районов Центральной Азии (Brombierstäudl et al., 2021, 2022; Gagarin et al., 2022), и бассейна р. Селенги (Chernykh et al., 2024). В основном базы данных включают в себя информацию о местоположении и площади наледей по состоянию на

конкретный год, и лишь в некоторых из них (Morse, Wolfe, 2015; Brombierstäudl et al., 2022) учитывается межгодовая изменчивость площади.

Интерес к изучению многолетней динамики площадей наледей обусловлен тем, что этот показатель может быть индикатором как изменений мерзлотно-геологических условий, так и изменений климата, но конкретные механизмы их влияния на наледи имеют региональную специфику и остаются не до конца изученными (Алексеев, 2016; Zemlianskova et al., 2023). Межгодовую изменчивость локализации наледей чаще связывают с изменением геокриологических условий и источников подмерзлотных вод, питающих наледи, а изменчивость площади наледей – с метеорологическими условиями (Morse, Wolfe, 2015; Ensom et al., 2020), что подтверждается как данными наблюдений на стационарах, так и многолетними рядами спутниковой съёмки. Среди метеорологических факторов, влияющих на площадь наледей, выделяют накопленные осадки в осенний период (Hall, Roswell, 1981; Morse, Wolfe, 2015), снегонакопление в начале зимы (Zemlianskova et al., 2023) и температурный режим в осенне-зимний период (Алексеев и др., 2011; Алексеев, 2016). На большинстве изученных наледей в мире за последние 50–60 лет динамические запасы наледного льда уменьшились в соответствии с трендом повышения температуры воздуха (Yoshikawa et al., 2007; Алексеев, 2016; Zemlianskova et al., 2023). Однако для многих наледей, на которых велись режимные наблюдения, статистически значимая зависимость объёма и площади льда от годового количества атмосферных осадков и средней годовой температуры воздуха не выявлена (Алексеев и др., 2016).

В работе рассматривается многолетняя изменчивость и тренды площади наледей в бассейне р. Селенги, который расположен вблизи южной границы криолитозоны. В последние годы опубликовано несколько исследований наледей на данной территории. В частности, была создана картографическая база данных наледей для всей площади бассейна (Chernykh et al., 2024). Многолетняя изменчивость наледей изучалась на отдельных участках бассейна, в частности на восточных отрогах хребта Цаган-Дабан в Селенгинском среднегорье (Черных, Гармаев, 2023), и в долине Улистай к северо-востоку от г. Улан-Батор (Temuujin et al., 2019). В обоих случаях было выявлено существенное уменьшение площади наледей и значительная межгодовая изменчивость на фоне этого тренда. Колебания площади имеет признаки цикличности и могут

быть связаны с изменениями количества осадков (Черных, Гармаев, 2023). Однако оба этих участка нерепрезентативны для всего бассейна р. Селенги. Они расположены в зоне островного распределения многолетнемёрзлых пород (далее – ММП) согласно данным (Obu et al., 2019), тогда как крупнейшие наледи расположены в зоне сплошного распространения ММП в юго-западной части бассейна.

Цель работы – анализ многолетней изменчивости площади наледей, расположенных в разных частях бассейна р. Селенги, и выявление основных гидрометеорологических факторов, определяющих эту изменчивость. Результаты исследования имеют значение для прогнозирования наледной опасности, поскольку не менее 80 населённых пунктов на данной территории находятся в зоне возможного подтопления наледными водами (Гармаев и др., 2023).

Характеристика бассейна р. Селенги. Бассейн р. Селенги находится в центре Азиатского материка, занимает 461 тыс. км². Территория характеризуется преимущественно горным рельефом с высотами до 3000 м и более (в юго-западной части бассейна) и значительным разнообразием физико-географических условий (Миллионщикова, 2019). Бассейн расположен в зоне резко континентального климата с большой амплитудой среднесуточных и сезонных температур воздуха и неравномерным выпадением осадков в течение года. Согласно современным климатическим нормам, рассчитанным за период 1991–2020 гг., среднегодовая температура воздуха на большей части бассейна р. Селенги отрицательная (от 0 до –8 °С), за исключением долины р. Селенги и юга монгольской части бассейна. Самый холодный месяц – январь, а самый тёплый – июль. Средняя температура воздуха в январе составляет –15...–16 °С на юге монгольской части бассейна и –31 °С на северо-западе, а в июле – +11...+12 °С в высокогорьях на юго-западе и на северо-западе и +20...+21 °С в долинах Селенги и её притоков. Весенний переход температуры воздуха через 0 °С в долинах начинается в середине марта, в горных частях бассейна – в апреле, осенний – в октябре и сентябре соответственно. Наиболее интенсивное потепление в бассейне р. Селенга в последние десятилетия наблюдалось в весенний период. Средняя температура воздуха в апреле в 1961–2022 гг. повышалась со скоростью от 0.5 °С за 10 лет на востоке и от 0.8 °С за 10 лет на западе бассейна (Гармаев и др., 2023).

Осадки распределяются по территории бассейна неравномерно. Наименьшее их количество приходится на низменные участки (в долинах рек Орхон, Туул и Селенга выпадает 200–250 мм/год), а наибольшее – на наветренные склоны и водораздельные части хребтов (от 400 до 650 мм/год в высокогорьях Хангайско-Хэнтэйской горной области и на южных склонах хр. Хамар-Дабан). До 80–90% годовой суммы осадков выпадает в жидком виде. Лишь в самой северной части бассейна 30–50% годовой суммы осадков выпадает в виде снега. Снежный покров в бассейне р. Селенги маломощный, средняя величина влагозапаса снега на конец февраля за период 1991–2020 гг., согласно данным реанализа ERA5-Land, составляет 24 мм (Гармаев и др., 2023). Сочетание низких температур и малого количества осадков в зимний период способствует развитию наледных процессов.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве исходной информации была использована картографическая база данных наледей в бассейне р. Селенги, созданная на основе спутниковых снимков Landsat-8 и Sentinel-2 за 2021 г. (Chernykh et al., 2024). Она включает свыше 29 тыс. участков наледей общей площадью 1154.2 км² (0.25% от общей площади бассейна), в том числе 56 гигантских наледей площадью свыше 1 км². Наибольшая наледность отмечается в юго-западной части бассейна – в горном массиве Хангай, где находится большинство гигантских наледей (рис. 1). Из базы данных были выбраны 12 наледей или их групп, расположенных в различных частях бассейна (рис. 2, табл. 1). Выбранные наледы расположены в горных массивах Хангай и Хэнтэй, в районе озера Хубсугул, на южных склонах Хамар-Дабана и в Селенгинском среднегорье. Эти районы существенно различаются по климатическим и мерзлотно-геологическим условиям, характеризуются разным распространением ММП – от сплошного до островного, согласно данным (Obu et al., 2019). В выборку включены две крупнейшие наледы в бассейне (см. рис. 2, № 1 и 2), которые имеют максимальные площади 25.1 и 13.5 км² соответственно, а также три группы наледей (в том числе гигантских) в юго-западной части бассейна (см. рис. 2, № 7; 11–12). Координаты групп наледей (см. табл. 1) определены по положению центра группы. Выбранные наледы в других частях бассейна имеют значительно меньшую площадь и формируются в условиях островного или спорадического распространения ММП.

Оценка многолетней изменчивости площади наледей выполнена по спутниковым снимкам, полученным в период сразу после схода снежного покрова, аналогично (Morse, Wolfe, 2015). За период 1986–1998 гг. использованы снимки со спутника Landsat-5 (сенсор TM), за 1999–2012 гг. – снимки Landsat-5 и Landsat-7 (сенсор ETM+), с 2013 г. – Landsat-8 (сенсор OLI), а в 2018–2024 гг. большинство наледей выделены по снимкам Sentinel-2 (сенсор MSI). В итоге для каждой наледы или группы наледей получено от 26 до 35 снимков. В период 1986–1989 гг. снимки были доступны менее чем для половины наледей, поэтому весь последующий анализ выполнен за период с 1990 по 2024 г.

По всем типам данных наледей выделены одинаковым способом, на основе расчёта, нормализованного разностного снежного индекса NDSI (Hall et al., 1995). Пороговое значение NDSI для выделения снежно-ледовых объектов принято равным 0.4. В отдельных случаях при таком пороге не выделялись участки льда, покрытые слоем воды в период таяния (они имеют значение NDSI в пределах 0.3–0.4), либо выделялись прилегающие к рассматриваемым наледям участки нерастаявшего снега. Такого рода ошибки исправлены в интерактивном режиме. Для отсека границ рассматриваемой области были предварительно выделены маскирующие полигоны, а выделение снежно-ледовых объектов производилось строго в их границах. Пример результатов выделения групп наледей (см. рис. 2, № 11–12) по снимкам за 2024 г. приведен на рис. 3.

Для объективности последующего анализа важны даты использованных снимков, поскольку выделение наледей по более поздним снимкам приводит к занижению их площади вследствие таяния (Makarieva et al., 2022). Даты снимков в основном приходятся на конец марта и апрель (средняя дата для всех наледей – 12 апреля). Самые ранние весенние снимки (средняя дата 22 марта) использованы для группы наледей № 5, расположенной в южной части бассейна на западе горного массива Хэнтэй (см. рис. 2), где таяние начинается раньше, чем на других участках. Наледь № 3, расположенная в крайней северной части бассейна, где более длительное время сохраняется снежный покров, выделена по самым поздним снимкам (в среднем 25 апреля). За счёт увеличения частоты получения снимков со временем (в частности, после запуска спутников Sentinel-2), средняя дата использованных снимков смещается на более ранние сроки – от

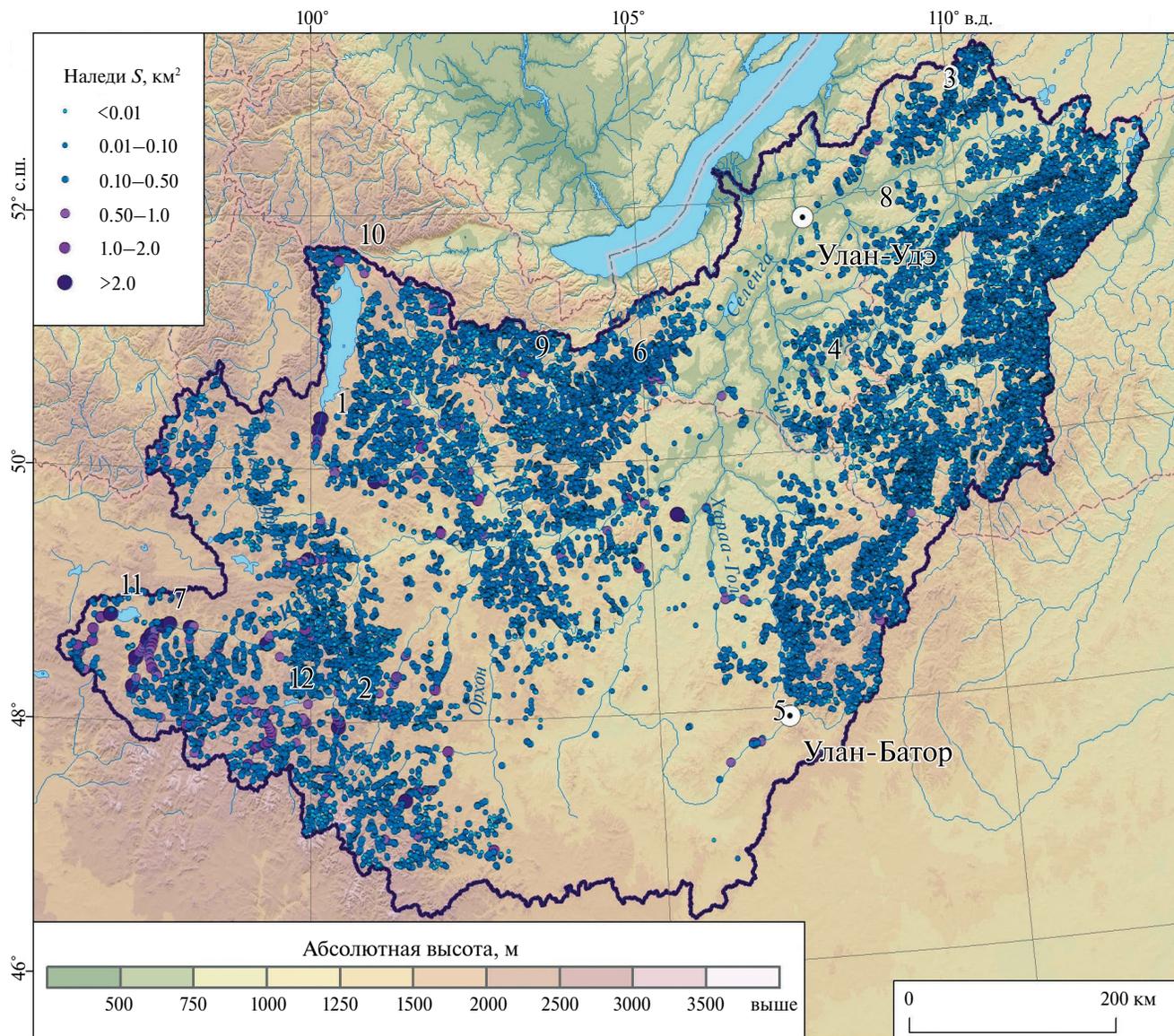


Рис. 1. Пространственное распределение наледей с разными площадными размерами в бассейне р. Селенги по данным (Chernykh et al., 2024). Номера на карте соответствуют ID номерам групп наледей в табл. 1

Fig. 1. Spatial distribution of aufeis with different area sizes in the Selenga River basin according to (Chernykh et al., 2024). Numbers on the map correspond to the numbers of aufeis groups in Table 1

17 апреля в период 1990–1994 гг. до 7 апреля в период 2020–2024 гг.

Поскольку рассматриваемые наледы существенно различаются по размерам, их площади были нормированы на максимальное значение для данной наледи за период наблюдений. С помощью коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена оценивалась согласованность межгодовых изменений площади наледей. Многолетние тренды площади наледей оценивались с помощью непараметрического метода Тейла–Сена, нечувствительного к выбросам.

Уровень значимости (α) для коэффициентов корреляции и коэффициентов наклона линии тренда (далее – КНЛТ) принят равным 0.05.

Рассмотрены метеорологические условия, которые могут влиять на межгодовую изменчивость площади наледей. На основе анализа ранее опубликованных работ (Алексеев и др., 2011; Алексеев, 2016; Morse, Wolfe, 2015; Zemlianskova et al., 2023) выбраны следующие переменные: количество осадков как в тёплый период предшествующего года, так и в период формирования наледи, температура воздуха в период формирования

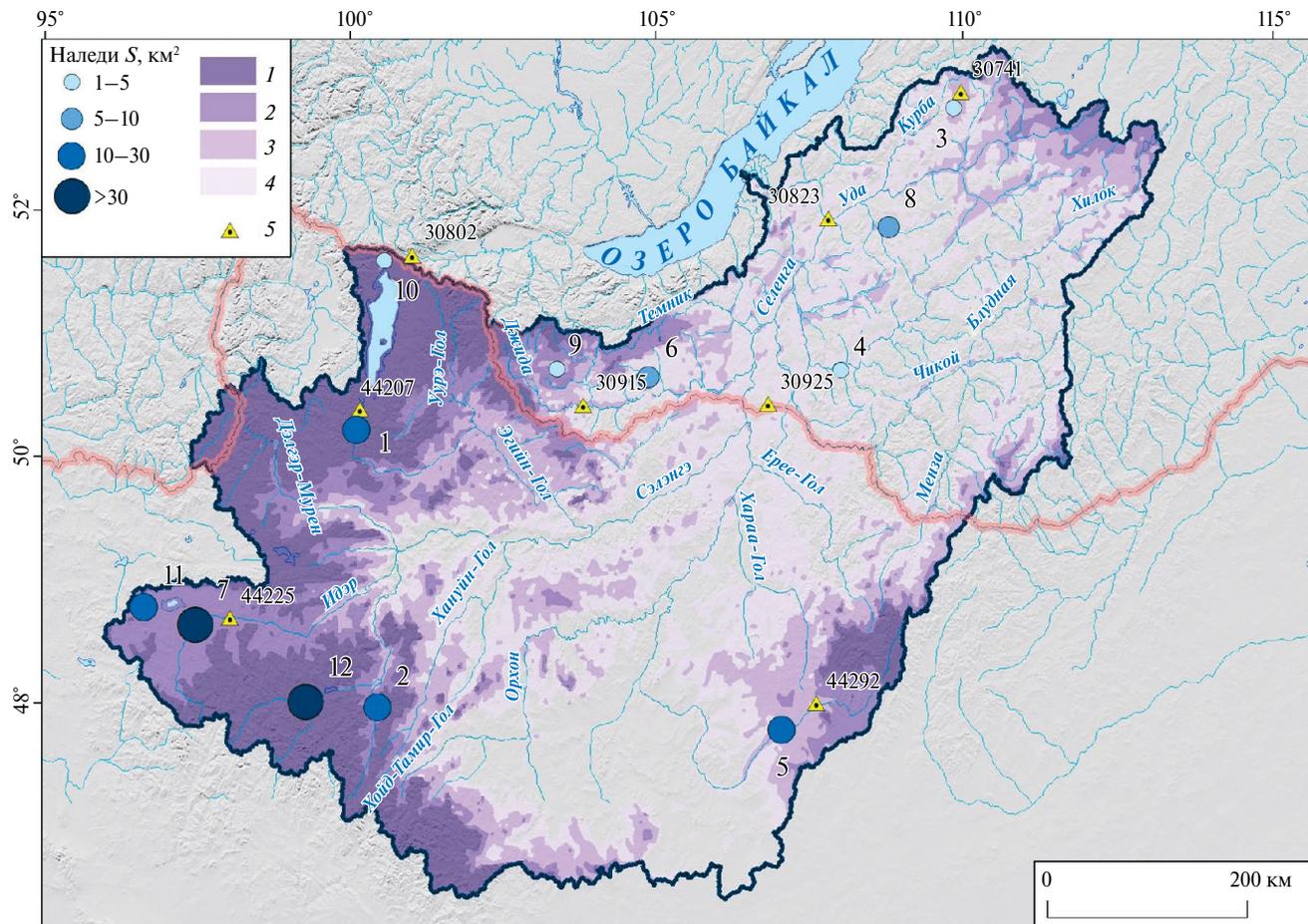


Рис. 2. Расположение изучаемых наледей или их групп и распространение ММП в бассейне р. Селенги. Номера 1–12 на карте соответствуют ID номерам групп наледей в табл. 1.

В легенде карты наледь или их группы, классифицированные по максимальной за 1990–2024 гг. площади, км², показаны кружками разного диаметра; 1–4 – распространение ММП в бассейне р. Селенга по данным (Obu et al., 2019): 1 – сплошное (>90% покрытия), 2 – прерывистое (50–90% покрытия), 3 – спорадическое (10–50% покрытия), 4 – островное (менее 10% покрытия); 5 – метеостанции, с которых получены данные. На карте рядом с метеостанциями указаны их номера

Fig. 2. Location of the augeis or groups of them, and distribution of the permafrost in the Selenga River basin. The numbers 1–12 on the map correspond to the ID numbers of augeis groups in Table 1.

In the map legend, augeis or their groups, classified by maximum area observed in 1990–2024, km², are shown as circles of different diameters; 1–4 – distribution of the permafrost in the Selenga River basin according to (Obu et al., 2019): 1 – continuous permafrost (>90% coverage), 2 – intermittent permafrost (50–90% coverage), 3 – sporadic permafrost (10–50% coverage), 4 – island permafrost (< 10% coverage); 5 – weather stations. On the map next to the weather stations are their numbers

наледей и в период, за который были получены снимки (март–апрель), а также высота снежного покрова в начальный период формирования наледь (декабрь) и в период получения снимков (март–апрель). В рядах станционных наблюдений за осадками в монгольской части бассейна (National Center..., 2024) есть многочисленные пропуски, что затрудняет их использование. Кроме того, расстояние между изучаемыми наледями и метеостанциями в ряде случаев превышает 100 км (см. рис. 2). В связи с этим, помимо данных метеостанций о температуре воздуха, были

использованы реанализы ERA5 (Hersbash et al., 2020) для получения данных о температуре воздуха и осадках, и ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021) для получения данных о снежном покрове.

Данные реанализа получены в виде среднемесячных значений. Их обработка включала извлечение значений переменных из ячеек сетки, соответствующих положению изучаемых наледей, а также расчёт среднего значения по этим 12 ячейкам, для сравнения со средней площадью наледей. Степень связи между метеорологическими переменными и площадью наледей

Таблица 1. Основные характеристики изучаемых наледей и их групп в бассейне р. Селенги

Table 1. Main characteristics of the studied aufeis and their groups in the Selenga River basin

*ID	Число наледей	Распространение ММП	Широта	Долгота	Площадь за рассматриваемый период				Ближайшая метеостанция
					Максимум	Среднее	Медиана	Минимум	
1	1	Сплошное	50.27	100.09	25.15	15.65	16.74	3.90	44 207
2	1	Сплошное	48.01	100.40	13.50	9.17	9.38	3.69	44 229
3	1	Спорадическое	52.65	109.75	2.06	1.04	0.93	0.54	30 741
4	1	Островное	50.59	107.60	2.32	0.87	0.73	0.18	30 925
5	12	Спорадическое	47.72	106.34	19.59	12.44	12.58	4.75	44 292
6	9	Островное	50.63	104.63	6.30	2.10	1.94	0.75	30 915
7	14	Прерывистое	48.67	97.68	65.45	30.96	34.13	6.35	44 225
8	3	Островное	51.73	108.54	5.19	1.43	0.85	0.16	30 823
9	1	Прерывистое	50.73	103.21	2.79	1.14	1.14	0.28	30 915
10	2	Сплошное	51.64	100.53	4.21	3.00	3.09	1.21	30 802
11	11	Прерывистое	48.80	96.91	23.58	11.64	11.1	7.57	44 225
12	12	Сплошное	48.06	99.34	32.95	23.09	23.49	12.74	44 225

*ID – согласно рис. 2.

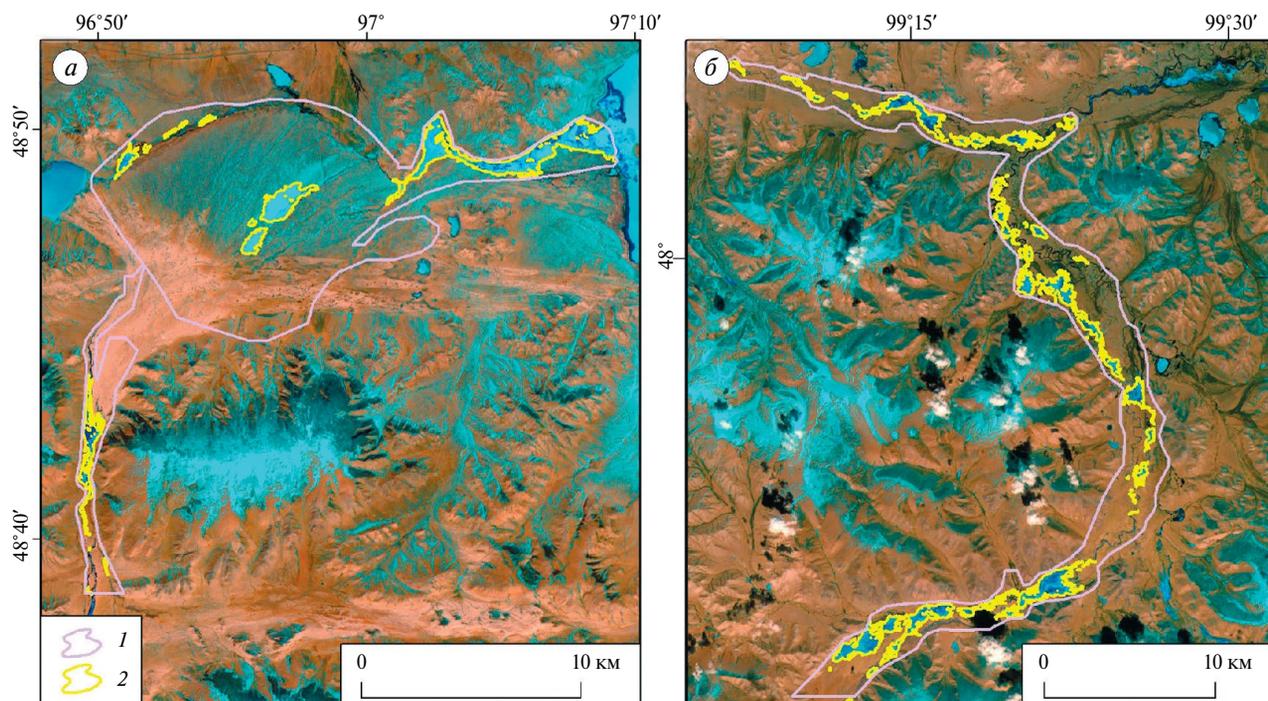


Рис. 3. Группы наледей № 11 (а) и № 12 (б), выделенные по снимкам Sentinel-2 за апрель 2024 г. 1 – граница области, в которой выделены наледь, 2 – границы наледей

Fig. 3. Groups of aufeis No 11 (a) and 12 (b), delineated from Sentinel-2 images for April 2024. 1 – mask area, 2 – aufeis areas

оценивалась по величине коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена при $\alpha = 0.05$. Выбор в качестве источника данных об осадках реанализа ERA5 с более грубым шагом сетки (0.25°), в сравнении с ERA5-Land (0.1°) обусловлен тем, что среднемесячные и годовые суммы осадков по реанализу ERA5 лучше соотносятся с наземными наблюдениями в целом для Монгольского плато, чем по данным ERA5-Land (Xin et al., 2022). Также для территории России особенности воспроизведения осадков реанализом ERA5 изучены лучше, чем для ERA5-Land (Григорьев и др., 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Межгодовая изменчивость и тренды максимальной площади наледей. В среднем для всех 12 рассматриваемых наледей выявлено статистически значимое сокращение площади (на 3.5% за 10 лет). Это согласуется с ранее опубликованными данными по отдельным участкам бассейна (Темущин et al., 2019; Гармаев, Черных, 2023). Для разных наледей тренды разнонаправленные. Так, для наледей № 2, 4 и 8 (см. рис. 2) выявлено статистически значимое снижение площади

на 8–13% за 10 лет, а для группы наледей № 5 – статистически значимый рост площади на 7% за 10 лет. Для остальных наледей тренды не значимы (табл. 2). Наледи, для которых выявлено значимое уменьшение площади, расположены в разных частях бассейна (наледи № 4 и 8 – на северо-востоке, наледь № 2 – на юго-западе), при этом наледи № 4 и 8 расположены в зоне островного распространения ММП, что также подтверждает ранее опубликованные выводы об общем уменьшении наледности в этой зоне (Гармаев, Черных, 2023). Группа наледей № 5 расположена в зоне спорадического распространения ММП.

Межгодовые изменения площади наледей в основном не коррелируют друг с другом (см. табл. 2). Согласованность межгодовых вариаций площади отдельных наледей со средним значением выше для крупных наледей (см. рис. 2, № 1, 2, 7, 11–12), которые находятся в западной части бассейна. Площадь группы наледей № 5 изменяется асинхронно средней для всех наледей. Для неё характерен положительный тренд, тогда как средняя площадь имеет отрицательный тренд. Слабая взаимная корреляция между площадями наледей указывает на существенный вклад локальных

Таблица 2. Корреляционная матрица межгодовой изменчивости площади наледей (приведены ранговые коэффициенты корреляции Спирмена, выделены статистически значимые при $\alpha = 0.05$), а также тренды площади наледей за 1990–2024 гг. (выделены значимые при $\alpha = 0.05$)

Table 2. Correlation matrix of inter-annual variability of aufeis area (Spearman rank correlation coefficients are given, statistically significant at $\alpha = 0.05$ are highlighted), and aufeis area trends for 1990–2024 (statistically significant at $\alpha = 0.05$ are highlighted)

Номер наледи на рис. 2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	КНЛТ (% за 10 лет)
1	0.19	−0.07	0.06	−0.14	0.01	0.55	0.16	0.24	−0.06	0.22	0.40	2.5
2	1.00	0.25	0.04	−0.29	0.21	0.12	−0.12	−0.09	0.11	0.44	0.53	−9.1
3		1.00	0.07	−0.27	0.13	−0.03	0.05	−0.04	0.19	0.31	0.15	0.8
4			1.00	−0.42	−0.18	−0.03	0.51	−0.19	−0.18	0.27	0.20	−11.9
5				1.00	−0.03	0.28	−0.69	0.14	0.08	−0.46	−0.16	6.9
6					1.00	0.06	−0.05	−0.12	0.34	−0.07	0.00	−0.6
7						1.00	−0.11	0.19	0.48	−0.03	0.27	2.9
8							1.00	0.35	−0.18	0.34	−0.33	−13.1
9								1.00	−0.04	0.27	−0.22	1.3
10									1.00	−0.05	−0.13	1.2
11										1.00	0.45	−2.6
12											1.00	3.1

гидрогеологических и мерзлотных условий в межгодовую изменчивость площади наледей.

Минимумы средней площади наледей приходятся на 2008, 2012 и 2016 гг., а максимумы – на 1995–1996, 2002 и 2004 гг. (рис. 4). Закономерности межгодовой изменчивости площади наледей, выявленные для территории Селенгинского среднегорья (Черных, Гармаев, 2023), частично подтверждаются и для всей площади бассейна. Так, низкие площади наледей в 2012–2018 гг. совпадают с самым маловодным периодом в бассейне р. Селенги, а рост площади наледей с 2019 г. – с увеличением количества осадков и водности рек (Черных, Гармаев, 2023). Основной максимум площади наледей в 1995–1996 гг. соответствует окончанию многоводного периода (Frolova et al., 2017). Он отмечался после 1994 г., когда количество осадков согласно данным реанализа ERA5 было наибольшим за весь рассматриваемый период.

При анализе межгодовой изменчивости необходимо учитывать также изменения в доступности спутниковых данных и в датах съемки. В частности, после ввода в эксплуатацию спутников Sentinel-2 в 2015 и 2018 гг. повторяемость съемки значительно увеличилась, что позволяет более

точно определять максимальную площадь наледей. Также со временем даты получения снимков сместились на более ранние сроки (хотя этот тренд не значим), и существенно уменьшился межгодовой разброс дат (см. рис. 4). Для большинства наледей есть слабая отрицательная корреляция между датой съемки и площадью (чем раньше получен снимок, тем больше площадь льда), а для наледей № 3, 4 и 12 она статистически значима.

Зависимости между площадью наледей и метеорологическими параметрами. Средняя площадь рассматриваемых наледей имеет статистически значимую отрицательную корреляцию с температурой воздуха в декабре, в марте и особенно в апреле по данным реанализа ERA5 (табл. 3). По данным метеостанций подтверждена значимая корреляция площади наледей с температурой воздуха в декабре и в апреле, для марта корреляция оказалась незначимой. Зависимость площади наледей от температуры воздуха в первой половине зимы, когда при маломощном снежном покрове происходит быстрый рост площади льда, ранее была выявлена для Анмангындинской наледи (Zemlianskova et al., 2023) и для других наледей северо-востока России (Алексеев и др., 2011; Алексеев, 2016). В свою очередь, холодная погода

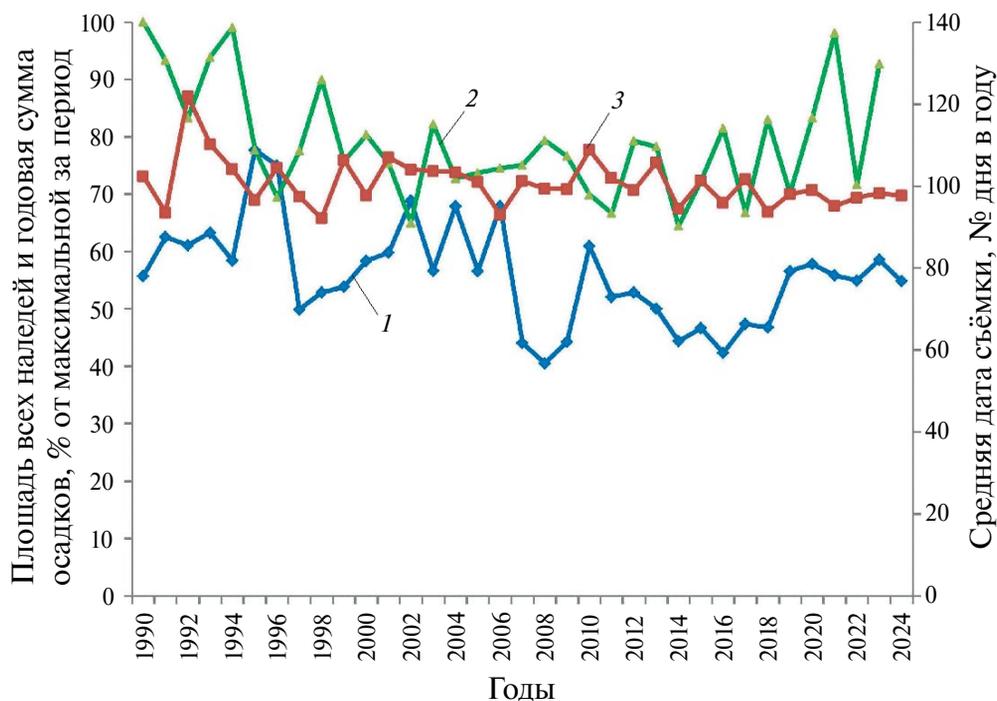


Рис. 4. Межгодовая изменчивость средней площади рассматриваемых наледей (1), средней даты получения снимков (2) и средней годовой суммы осадков по данным реанализа ERA5 в бассейне р. Селенги (3)

Fig. 4. Inter-annual variability of the average aufeis areas (1), average date of image acquisition (2) and annual precipitation according to the ERA5 reanalysis data in the Selenga river basin (3)

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена и Пирсона между осреднёнными нормированными значениями площади наледей (по годам) и значениями метеорологических переменных для соответствующих ячеек сетки реанализа. Период расчёта — 1990–2024 гг. Выделены статистически значимые корреляции при $\alpha = 0.05$

Table 3. Spearman (rank) and Pearson (linear) correlation coefficients between the averaged normalized values of the aufeis area (by years) and the values of meteorological variables extracted from the corresponding grid cells of the reanalysis. The period of calculation is 1990–2024. Statistically significant correlations are highlighted

Метеорологическая переменная	Период расчёта	<i>R</i> Спирмена	<i>R</i> Пирсона
<i>По данным реанализа</i>			
Количество осадков	Июнь	0.28	0.33
	Июль	0.24	0.25
	Август	0.37	0.33
	Сентябрь	0.08	0.05
	Июнь–сентябрь	0.38	0.38
	Декабрь	–0.23	–0.28
	Предыдущий год	0.39	0.41
Высота снежного покрова	Ноябрь	–0.08	–0.05
	Декабрь	–0.09	–0.10
	Март	–0.08	–0.04
	Апрель	–0.01	0.11
Температура воздуха	Ноябрь	–0.07	0.02
	Декабрь	–0.37	–0.41
	Январь	0.02	0.02
	Февраль	0.09	0.00
	Март	–0.40	–0.37
	Апрель	–0.63	–0.62
<i>По данным метеостанций</i>			
Температура воздуха	Ноябрь	0.06	0.14
	Декабрь	–0.48	–0.44
	Март	–0.29	–0.27
	Апрель	–0.67	–0.63

в марте и апреле способствует увеличению продолжительности накопления льда и позднему началу его таяния, вследствие чего площадь наледей, определённая по весенним снимкам, также растёт. В частности, рост площади наледей в 2006

и особенно в 2010 г. совпадает с отрицательными аномалиями температуры воздуха в апреле, а минимум площади в 2014 г. совпадает с аномально тёплым апрелем. Важно отметить, что в апреле средняя температура воздуха в бассейне р. Селенги повышается на 0.75°C каждые 10 лет — быстрее, чем в любой месяц холодного периода года (Гармаев и др., 2023). Таким образом, потепление в апреле может быть одной из причин общего сокращения площади наледей в бассейне р. Селенги в период после 1990 г.

Осадки, накопленные за предшествующий тёплый период, имеют положительную связь со средней площадью наледей. Эта связь статистически значима для годовой суммы осадков, для суммы осадков за июнь–сентябрь (на эти месяцы приходится свыше 70% годового количества осадков) и для суммы осадков за август. Значения *R* Спирмена и *R* Пирсона близки к 0.4, что близко к ранее опубликованным оценкам для Селенгинского среднегорья (Черных, Гармаев, 2023). Суммы осадков в июне, июле и сентябре не имеют значимой корреляции с площадью наледей. Существенное влияние осадков, выпадающих в конце лета и начале осени, на формирование наледей было известно и ранее как для бассейна Селенги (Черных, Гармаев, 2023), так и для других регионов мира (Hall, Roswell, 1981; Morse, Wolfe, 2015). Однако судя по значениям коэффициентов корреляции, для рассматриваемых наледей оно менее значимо, чем температурный режим. Также важно отметить, что несмотря на рост увлажнения в бассейне р. Селенги, который начался с 2018 г., в целом за период 1990–2024 гг. тренд годовой суммы осадков остаётся отрицательным, и может быть одной из причин сокращения площади наледей за этот период.

В отличие от ранее опубликованных результатов (Harden et al., 1977; Zemlianskova et al., 2023), не выявлена зависимость между площадью наледей и толщиной снежного покрова в ноябре–декабре (табл. 3 и 4). Это может объясняться маломощностью снежного покрова в бассейне р. Селенги в сравнении с северо-востоком России или Аляской. Норма суммы осадков в ноябре–декабре в разных частях бассейна Селенги составляет всего 8–20 мм, вследствие чего снежный покров слабо влияет на формирование наледей.

Коэффициенты корреляции между метеорологическими переменными и площадью отдельных наледей приведены в табл. 4. Как и для средней площади наледей по бассейну, в основном корреляции статистически незначимы.

Таблица 4. Ранговые коэффициенты корреляции Спирмена между площадью наледей и метеорологическими переменными. Выделены статистически значимые при $\alpha = 0.05$ **Table 4.** Spearman's rank correlation coefficients between aufeis area and meteorological variables. Statistically significant correlations are highlighted at $\alpha = 0.05$

Номер наледи на рис. 2	Температура воздуха					Снежный покров			Осадки			Дата снимка
	Декабрь	Январь	Март	Апрель	Март– апрель	Декабрь	Март	Апрель	Июль	Август	Июнь– сентябрь	
1	-0.47	0.11	-0.18	-0.30	-0.35	-0.28	-0.06	-0.14	0.13	0.40	0.44	-0.21
2	-0.29	-0.11	-0.22	-0.19	-0.38	0.08	-0.04	0.03	0.16	-0.28	0.13	-0.24
3	-0.12	-0.12	0.16	0.06	0.10	0.02	-0.01	-0.03	0.09	0.05	0.05	-0.54
4	-0.07	0.14	-0.16	-0.28	-0.33	0.16	0.11	0.19	0.20	0.38	0.35	-0.41
5	-0.11	-0.16	0.19	0.15	0.25	0.03	-0.21	-0.11	-0.38	-0.23	-0.54	-0.20
6	-0.18	-0.20	-0.33	-0.19	-0.29	-0.14	-0.15	0.02	0.34	0.43	0.37	-0.07
7	-0.09	-0.16	-0.34	-0.37	-0.44	0.11	0.04	0.20	-0.12	0.21	-0.25	-0.13
8	-0.04	0.07	-0.31	-0.42	-0.37	0.17	0.00	0.26	0.36	0.39	0.39	-0.27
9	-0.04	0.25	-0.11	-0.19	-0.18	-0.32	-0.35	-0.33	0.02	0.0	0.09	-0.17
10	-0.09	0.01	-0.24	-0.20	-0.18	0.14	0.03	0.07	0.16	-0.08	0.19	-0.28
11	-0.16	0.14	0.17	-0.23	-0.08	-0.22	-0.17	-0.04	0.02	0.03	0.06	-0.21
12	-0.32	0.22	0.01	-0.04	-0.11	-0.20	-0.28	-0.24	0.33	-0.03	0.18	-0.42

Для отдельных наледей выявлены значимые корреляции их площади с температурой воздуха в декабре, в апреле и в среднем за март–апрель, а также с количеством осадков в июле, августе и в сумме за июнь–сентябрь. Также в табл. 4 приведены коэффициенты корреляции между площадью наледи и датой получения снимков, по которым оценивалась площадь. Для всех наледей эта корреляция отрицательная (чем раньше получен снимок, тем больше площадь льда), но статистически значима она только для наледей № 3, 4 и 12.

Чтобы оценить, какая доля межгодовых вариаций площади наледей определяется изменчивостью метеорологических условий и водности рек за предшествующий год, была использована множественная линейная регрессия. Выбраны независимые переменные, которые имеют значимую корреляцию либо со средней площадью наледей (см. табл. 3; рис. 5), либо с площадью отдельных наледей (см. табл. 4). Это средняя температура воздуха в декабре и количество осадков в июле, августе и в целом за период июнь–сентябрь. Перечисленные предикторы объясняют 29% межгодовых вариаций для средней площади наледей. Для отдельных наледей это значение

составляет от 7% (наледь № 3) до 63% (наледь № 9). При включении в перечень предикторов температуры воздуха в марте и апреле доля объяснённой изменчивости возрастает до 52% в среднем для всех наледей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования выявлены основные закономерности межгодовой изменчивости площади наледей в бассейне р. Селенги и определены гидрометеорологические переменные, существенно влияющие на формирование наледей. В целом по бассейну р. Селенги в период 1990–2024 гг. выявлено статистически значимое сокращение площади наледей (на 3.5% за 10 лет), что согласуется с ранее полученными данными по отдельным участкам бассейна (Темциџин et al., 2019; Гармаев, Черных, 2023). Межгодовые вариации площади отдельных наледей и их групп слабо согласуются между собой, за исключением западной части бассейна. Основным максимумом площади наледей отмечен в 1995–1996 гг., что соответствует окончанию многоводного периода в бассейне р. Селенги, а минимум – в 2008 и в 2014–2016 гг.

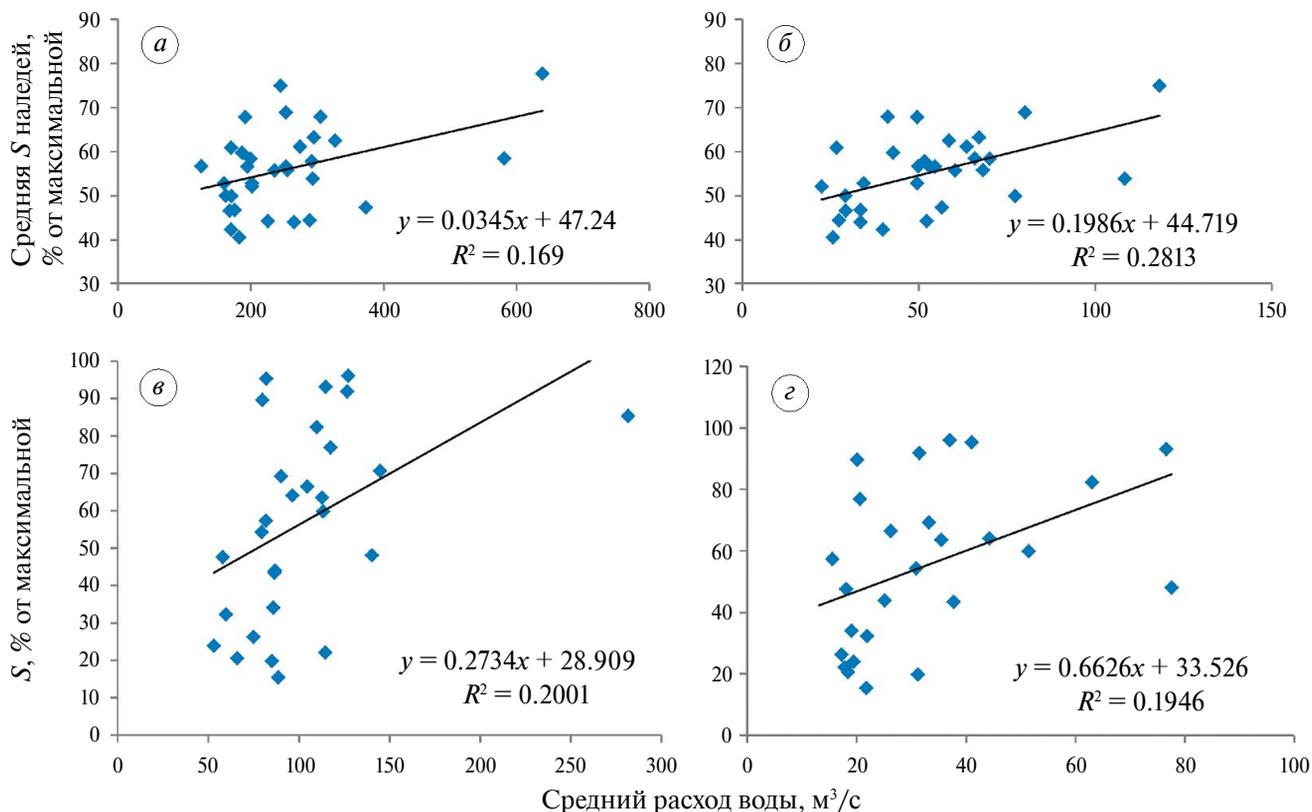


Рис. 5. Зависимости площади наледей от среднегодового (а, в) и среднего за декабрь (б, г) расхода воды по данным гидропостов за предшествующий год: а–б – средняя площадь всех рассматриваемых наледей и расход воды на гидропосту р. Сэлэнгэ – Зуунбурен; в–г – площадь наледи № 1 и расход воды на гидропосту р. Эгийн-Гол – Хантай

Fig. 5. Relationships of the aufeis area with the average annual (а, в) and average December (б, г) water discharge according to gauging stations for the previous year: а–б – average area of all considered aufeis and water discharge at the gauging station Zuunburen (Selenge river); в–г – area of ice No 1 and water discharge at the gauging station Khantai (Egiin-Gol river)

В последние пять лет площадь наледей увеличилась на фоне роста количества осадков и объёма речного стока, но остаётся значительно меньше максимума 1995–1996 гг.

Выявлены статистически значимые зависимости площади наледей от температурного режима и количества осадков. Так, росту площади наледей способствует холодная погода в декабре, когда происходит их наиболее интенсивное развитие. Аналогичные оценки ранее были получены для наледей северо-востока России (Алексеев и др., 2011; Алексеев, 2016; Zemlianskova et al., 2023). Более сильная отрицательная корреляция выявлена между площадью наледей и температурой воздуха в марте–апреле, поскольку холода в первой половине весны увеличивают продолжительность периода роста наледи. Существенный рост температуры воздуха в апреле (в среднем по бассейну на 0.75°C за 10 лет) может быть одной из причин общего сокращения площади наледей за рассматриваемый период.

Количество осадков за предшествующий год, за период июнь–сентябрь и отдельно за август также имеет корреляцию со средней площадью наледей. В частности, максимум площади наледей в 1995–1996 гг. отмечался после 1994 г., когда выпало наибольшее за рассматриваемый период количество осадков, а в 2014–2016 гг., когда количество осадков было минимальным, отмечались и минимумы площади наледей. Летне-осеннее увлажнение является одним из важных предикторов площади наледей и в других регионах мира, в частности в Канаде и на Аляске (Hall, Roswell, 1981; Morse, Wolfe, 2015). Особенность бассейна р. Селенги – это отсутствие корреляции между площадью наледей и высотой снежного покрова (а также количеством осадков, выпадающих в ноябре–декабре). Это обусловлено крайне малым количеством зимних осадков и малой мощностью снежного покрова (часто менее 10 см), в отличие от северо-востока России (Zemlianskova et al., 2023) и Канады (Morse,

Wolfe, 2015), где снегопады в начале зимы способствуют уменьшению площади наледей.

В целом, рассмотренные переменные позволяют объяснить 52% межгодовых вариаций площади наледей, но для каждой наледи в отдельности эта величина составляет от 7 до 63%. Такие расхождения обусловлены разным происхождением рассмотренных наледей и источников их питания (речные воды, грунтовые воды или выходы подземных вод глубоких горизонтов). Остальная часть вариаций может быть связана с изменениями гидрогеологических и мерзлотных условий, выявление причин которых требует проведения комплексных полевых исследований.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РФФ, проект № 24-47-03008.

Acknowledgments. The study was funded by Russian Scientific Foundation grant No. 24-47-03008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.Р.* Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 73–93.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-73-92>
- Алексеев В.Р., Горин В.В., Котов С.В.* Наледи-тарыны Северной Чукотки // Лёд и Снег. 2011. № 4 (116). С. 85–93.
- Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Остахов А.А., Землянскова А.А.* Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / Ред. В.В. Шепелев, М.Н. Железняк. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2021. 302 с.
- Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В., Аюржанаев А.А.* Гидроэкологическая безопасность бассейна реки Селенга. М.: ООО «ПринтЛето», 2023. 208 с.
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М.* Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // Изв. РАН. Сер. географическая. 2022. № 86 (3). С. 435–446.
<https://doi.org/10.31857/S2587556622030062>
- Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В.* Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2016. 320 с.
- Миллионщикова Т.Д.* Моделирование и предвычисление многолетних изменений стока р. Селенги. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Ин-т водных проблем РАН, 2019. 133 с.
- Соколов Б.Л.* Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 190 с.
- Черных В.Н., Гармаев Е.Ж.* Мониторинговые исследования наледей в бассейнах малых рек центральной части Селенгинского среднегорья // Проблемы региональной экологии 2023. № 2. С. 36–41.
<https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-2-36-41>
- 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. No. 146604.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146604>
- Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M.* Spatial and temporal dynamics of aufeis in the Tso Moriri basin, eastern Ladakh, India // Permafrost and Periglacial Processes. 2023. V. 34 (1). P. 81–93.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2173>
- Chernykh V., Shikhov A., Ayurzhanov A., Sodnomov B., Tsydypov B., Zharnikova M., Dashtseren A.* Icings in the Selenga River basin // Journ. of Maps. 2024. V. 20 (1). P. 1–10.
<https://doi.org/10.1080/17445647.2024.2340994>
- Ensom T.P., Makarieva O.M., Morse P.D., Kane D.L., Alekseev V.R., Marsh P.* The Distribution and Dynamics of Aufeis in Permafrost Regions // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. V. 31 (3). P. 383–395.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2051>
- Froehlich W., Slupik J.* River icings and fluvial activity in extreme continental climate: Khangai Mountains, Mongolia / In: Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference. Ottawa: National Research Council of Canada, 1982. P. 203–211.
- Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigoriev V.Y., Sazonov A.A., Zotov L.V., Jarsjö J.* Runoff fluctuations in the Selenga River Basin // Regional Environmental Change. 2017. V. 17 (7). P. 1965–1976.
<https://doi.org/10.1007/s10113-017-1199-0>
- 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. V. 14 (15). No. 2396.
<https://doi.org/10.3390/w14152396>
- 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 Sensing of Environment. 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)
- Hall D.K., Roswell C.* The origin of water feeding icings on the eastern North Slope of Alaska // Polar Record. 1981. V. 20 (128). P. 433–438.
<https://doi.org/10.1017/S0032247400003648>
- Harden D., Barnes P., Reimnitz E.* Distribution and character of naleids in northeastern Alaska // Arctic. 1977. V. 30 (1). P. 1–30. <https://doi.org/10.14430/arctic2681>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- 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. V. 11 (1). P. 409–420. <https://doi.org/10.5194/essd-11-409-2019>
- Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A., Zemlianskova A., Luo D., Ostashov A., Alexeev V. Giant Aufeis – Unknown Glaciation in North-Eastern Eurasia According to Landsat Images 2013–2019 // *Remote Sensing*. 2022. V. 14 (17). No. 4248. <https://doi.org/10.3390/rs14174248>
- Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada // *Journ. of Geophysical Research: Earth Surface*. 2015. V. 120. P. 1670–1686. <https://doi.org/10.1002/2015JF003534>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13 (9). P. 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- National Agency Meteorology and the Environmental Monitoring // Электронный ресурс. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/global-historical-climatology-network-daily> (Дата обращения: 20.12.2024).
- National Centers for Environmental Information. Global Historical Climatology Network daily (GHCNd) // Электронный ресурс. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/global-historical-climatology-network-daily> (Дата обращения: 20.12.2024).
- Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H.H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Eitzelmüller B., Kholodov A., Khomutov A., Käb A., Leibman M.O., Lewkowicz A.G., Panda S.K., Romanovsky V., Way R.G., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // *Earth-Science Reviews*. 2019. V. 193. P. 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Temuujin Kh., Dashtseren A. Ulambayar G. Icing dynamic changes in Bayanzurkh district, Ulaanbaatar, Mongolia. The 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, 2019. // Электронный ресурс. URL: http://portal.igg.ac.mn/dataset/24584791-238d-4e34-a046-661f05a0f1f6/resource/73a84bad-cc91-4136-aacd-dc291cd09cd6/download/temuujin_est2019_abstract.pdf (Дата обращения: 20.12.2024).
- Yoshikawa K., Hinzman L.D., Kane D.L. Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska // *Journ. of Geophys. Reserarch*. 2007. V. 112. G04S43. <https://doi.org/10.1029/2006JG000294>
- Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov A., Alekseev V., Nesterova N., Ostashov A. The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis // *CATENA*. 2023. V. 233 No. 107530. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107530>

Citation: Garmaev E.Zh., Chernykh V.N., Pyankov S.V., Shikhov A.N., Ayurzhanayev A.A., Bogatyrev D.A. Multiyear variability of aufeis area in the Selenga River basin and its determining hydrometeorological factors. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (2): 342–356. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425020114

Multiyear Variability of Aufeis Area in the Selenga River Basin and Its Determining Hydrometeorological Factors

© 2025 E. Zh. Garmaev^a, V.N. Chernykh^a, S. V. Pyankov^b,
A. N. Shikhov^{b,c,#}, A. A. Ayurzhanayev^a, D. A. Bogatyrev^b

^a*Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of RAS, Ulan-Ude, Russia*

^b*Perm State University, Perm, Russia*

^c*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

[#]*e-mail: and3131@inbox.ru*

Received January 23, 2025; Revised February 20, 2025; Accepted April 18, 2025

Aufeis are widespread in the permafrost zone, including the Selenga River basin. They are considered as indicators of dynamic groundwater reserves and often cause damage to settlements and infrastructure. In this study, a representative set of aufeis in the Selenga River basin was compiled based on a previously developed GIS dataset. Landsat and Sentinel-2 satellite images for 1990–2024, acquired immediately

after snowmelt, were used to estimate the aufeis area and its multi-year changes. Changes in aufeis area were compared with meteorological parameters derived from the weather station data and ERA5 reanalysis. We found that the average aufeis area decreases by 3.5% per 10 years. At the same time, interannual variations of the area of individual aufeis are generally poorly correlated. The aufeis area has a negative correlation with air temperature in December, March and April, as cold weather in these months favours increase of ice-covered area. A significant increase in air temperature in April in recent decades may be one of the reasons for the overall decrease in the aufeis area. A correlation has also been found with the amount of precipitation in the previous year and particularly in the period from June to September. The largest aufeis area has been observed in 1995–1996, after 1993–1994 which was the wettest year of the period. The lowest aufeis area corresponds to the driest years 2014–2016. On average, the meteorological variables explain 52% of the interannual variability of the aufeis area, but for individual aufeis this value ranges from 7 to 63%. Such differences are due to the different origin of the considered aufeis and possible changes in the hydrogeological conditions, the identification of which requires field studies.

Keywords: aufeis, long-term changes, Landsat and Sentinel-2 images, ERA5 reanalysis, precipitation, air temperature, water discharge, correlation

REFERENCES

- Alekseev V.R.* Long-term variability of the spring taryn-aufeis. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (1): 73–93. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-73-92> [In Russian].
- Alekseev V.R., Gorin V.V., Kotov S.V.* Aufeis-taryns of Northern Chukotka. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2011, 4 (116): 85–93 [In Russian].
- Alekseev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Zemlyanskov A.A.* Atlas gigantских наледей-тарынов Северо-Востока России. Atlas of giant glaciers-taryns of the North-East of Russia. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2021: 302 p. [In Russian].
- Garmaev E.J., Pyankov S.V., Ayurzhanaev A.A.* *Gidroekologicheskaya bezopasnost' bassejna reki Selenga*. Hydrological and Environmental Safety of the Selenga River Basin. Moscow: PrintLeto, 2023: 208 p. [In Russian].
- Grigoriev V.Yu., Frolova N.L., Kireeva M.B., Stepanenko V.M.* Spatial and Temporal Variability of ERA5 Precipitation Accuracy over Russia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series. 2022, 86 (3): 435–446. <https://doi.org/10.31857/S2587556622030062> [In Russian].
- Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V.* *Naledi zony BAM: Ekspeditsionnye issledovaniya*. Naledi of the Baikal-Amur Railroad zone: Expeditionary studies. St. Petersburg: Nestor-Istoria, 2016: 320 p. [In Russian].
- Millionshchikova T.D.* *Modelirovaniye i predvychnisleniye mnogoletnikh izmeneniy stoka r. Selengi*. Modeling and prediction of long-term changes in the runoff of the Selenga River. PhD Thesis. Moscow: Water problem Institute of RAS, 2019: 133 p. [In Russian].
- Sokolov B.L.* *Naledi i rechnoj stok*. Naledi and river runoff. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1975: 190 p. [In Russian].
- Chernykh V.N., Garmaev E.J.* Monitoring studies of ices in small river basins of the central part of the Selenga middle mountains. *Problemy regional'noj ekologii*. Problems of regional ecology. 2023, 2: 36–41. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-2-36-41> [In Russian].
- Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M.* Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin. *Science of the Total Environment*. 2021, 780: 146604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146604>
- Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M.* Spatial and temporal dynamics of aufeis in the Tso Moriri basin, eastern Ladakh, India. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2023, 34 (1): 81–93. <https://doi.org/10.1002/ppp.2173>
- Chernykh V., Shikhov A., Ayurzhanaev A., Sodnomov B., Tsydyпов B., Zharnikova M., Dashtseren A.* Icings in the Selenga River basin. *Journal of Maps*. 2024, 20 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1080/17445647.2024.2340994>
- Ensom T.P., Makarieva O.M., Morse P.D., Kane D.L., Alekseev V.R., Marsh P.* The Distribution and Dynamics of Aufeis in Permafrost Regions. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2020, 31 (3): 383–395. <https://doi.org/10.1002/ppp.2051>
- Froehlich W., Slupik J.* River icings and fluvial activity in extreme continental climate: Khangai Mountains, Mongolia. In: *Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference*. Ottawa: National Research Council of Canada, 1982: 203–211.
- Frolova N.L., Belyakova P.A., Grigoriev V.Y., Sazonov A.A., Zotov L.V., Jarsjö J.* Runoff fluctuations in the Selenga River Basin. *Regional Environmental Change*. 2017, 17 (7): 1965–1976. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1199-0>
- 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 (15): 2396. <https://doi.org/10.3390/w14152396>
- 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 Sensing of Environment*. 1995, 54: 127–140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)
- Hall D.K., Roswell C. The origin of water feeding icings on the eastern North Slope of Alaska. *Polar Record*. 1981, 20 (128): 433–438. <https://doi.org/10.1017/S0032247400003648>
- Harden D., Barnes P., Reimnitz E. Distribution and character of naleds in northeastern Alaska. *Arctic*. 1977, 30 (1): 1–30. <https://doi.org/10.14430/arctic2681>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, 146 (730): 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- 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, 11 (1): 409–420. <https://doi.org/10.5194/essd-11-409-2019>
- Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A., Zemlianskova A., Luo D., Ostashov A., Alexeev V. Giant Aufeis – Unknown Glaciation in North-Eastern Eurasia According to Landsat Images 2013–2019. *Remote Sensing*. 2022, 14 (17): 4248. <https://doi.org/10.3390/rs14174248>
- Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada. *Journ. of Geophysical Research: Earth Surface*. 2015, 120: 1670–1686. <https://doi.org/10.1002/2015JF003534>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.N. ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*. 2021, 13 (9): 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- National Agency Meteorology and the Environmental Monitoring. Retrieved from: URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/global-historical-climatology-network-daily> (Last access: December 20, 2024).
- National Centers for Environmental Information. Global Historical Climatology Network daily (GHCNd). Retrieved from: URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/global-historical-climatology-network-daily> (Last access: December 20, 2024).
- Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H.H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Eitzelmüller B., Kholodov A., Khomutov A., Käb A., Leibman M.O., Lewkowicz A.G., Panda S.K., Romanovsky V., Way R.G., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*. 2019, 193: 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
- Temuujin Kh., Dashtseren A., Ulambayar G. Icing dynamic changes in Bayanzurkh district, Ulaanbaatar, Mongolia. The 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, 2019. Retrieved from: URL: http://portal.igg.ac.mn/dataset/24584791-238d-4e34-a046-661f05a0f1f6/resource/73a84bad-cc91-4136-aacd-dc291cd09cd6/download/temuujin_est2019_abstract.pdf (Last access: December 20, 2024).
- Yoshikawa K., Hinzman L.D., Kane D.L. Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska. *Journ. of Geophys. Reserarch*. 2007, 112: G04S43. <https://doi.org/10.1029/2006JG000294>
- Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov A., Alekseev V., Nesterova N., Ostashov A. The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis. *CATENA*. 2023, 233: 107530. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107530>