

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345; 557.79

DOI: 10.15372/KZ20220404

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ГИГАНТСКИХ НАЛЕДЕЙ
СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ**О.М. Макарьева^{1,2}, В.Р. Алексеев¹, А.Н. Шихов³, Н.В. Нестерова^{2,4}, А.А. Осташов⁴,
А.А. Землянскова^{2,4}, А.В. Семакина⁵**¹ *Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; omakarieva@yandex.ru, icing@bmail.ru*² *Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, Россия; mnesterova1994@gmail.com, anastasiazemlanskova@gmail.com*³ *Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15, Россия; and3131@inbox.ru*⁴ *Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 685070, Магадан, ул. Портовая, 16, Россия; andrey.ostashov@gmail.com*⁵ *Пермский филиал ФГБУ “Рослесинфорг”, 614990, Пермь, ул. Маршрутная, 14, Россия; anastasiasemakina@gmail.com*

Наледи широко распространены на Северо-Востоке России и оказывают существенное влияние на многие компоненты ландшафтов. Появление в открытом доступе спутниковых данных Landsat и Sentinel-2 создало новые возможности для их картографирования. По спутниковым снимкам собран актуальный каталог наледей Северо-Востока России, а также проанализирована многолетняя и сезонная изменчивость наиболее крупных ледяных массивов. На основе обобщения исторических (полученных в середине XX в. с помощью аэрофотосъемки) и современных данных о наледях подготовлено новое картографическое произведение – Атлас гигантских наледей-тарнов Северо-Востока России, который был издан в конце 2021 г. В настоящей работе рассмотрены подходы к картографированию наледей, которые использовались при создании данного Атласа, и приведены основные характеристики наледей по историческим и спутниковым данным. Всего в пределах рассматриваемой территории по снимкам 2013–2020 гг. выявлено 9306 наледей общей площадью 4854.5 км², из которых 1146 относятся к гигантским, т. е. имеют площадь более 1 км². Для выявленных гигантских наледей по разновременным спутниковым снимкам за период с 1970-х гг. по настоящее время проанализирована многолетняя и сезонная динамика их площади и созданы серии космокарт, которые также включены в содержание Атласа. Для большинства гигантских наледей существенного сокращения площади со временем не выявлено. Установлено также, что крупнейшей на Северо-Востоке России является наледь в бассейне р. Сюрюктях. Ее площадь в период схода снежного покрова в среднем на 14.4 км² превышает площадь Большой Момской наледи, которая ранее считалась крупнейшей в России.

Ключевые слова: гигантские наледи, картографирование, атлас, спутниковые снимки Landsat и Sentinel-2, Кадастр наледей, картографическая база данных, Северо-Восток России.

MAPPING OF GIANT AUFEIS FIELDS OF NORTH-EAST RUSSIA

**O.M. Makarieva^{1,2}, V.R. Alexeev¹, A.N. Shikhov³, N.V. Nesterova^{2,4}, A.A. Ostashov⁴,
A.A. Zemlyanskova^{2,4}, A.V. Semakina⁵**¹ *Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; omakarieva@yandex.ru*² *St. Petersburg State University, Universitetskaya embankment 7-9, St. Petersburg, 199034, Russia*³ *Perm State University, Bukireva str. 15, Perm, 614990, Russia*⁴ *North-Eastern Permafrost Station of Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Portovaya str. 16, Magadan, 685070, Russia*⁵ *Perm branch of Roslesinfor, Marshrutnaya str. 14, Perm, 614990, Russia*

Aufeis fields (or icings) are widespread in the North-East of Russia, and have a substantial impact on many components of landscapes. The public availability of Landsat and Sentinel-2 satellite data has opened up new opportunities for aufeis mapping. Based on satellite images, we have compiled an up-to-date GIS dataset of aufeis fields in the North-East of Russia, and also have analyzed the long-term and seasonal variability of the largest aufeis. Based on the synthesis of historical (obtained in the middle of the 20th century using aerial photography) and satellite data on aufeis, we have prepared a new cartographic product – the Atlas of giant aufeis-taryn of the North-East of Russia. The Atlas had been published in 2021. In this paper, we have considered the approaches to aufeis mapping used in creating the Atlas, and have presented the main characteristics of the aufeis fields based on historical and satellite data. In total, according to Landsat images obtained in 2013–2020, we have found and

delineated 9306 aufeis with a total area of 4854.5 km². According to satellite images, 1146 are giant aufeis, i.e. they cover an area of over 1 km². For these giant aufeis, we have analyzed long-term and seasonal dynamics of their area based on satellite images obtained for the period from the 1970s to the present. On this basis, a series of image-based maps have been created, which are also included in the content of the Atlas. We have not found a substantial reduction in their area between 1970s and the present for most of the giant aufeis. We also have found that the largest aufeis in the north-east of Russia is located in the basin of the Syuryuktyah river. Its area immediately after snowmelt period is on average 14.4 km² larger than the area of the Bolshaya Morskaya aufeis, which had been previously considered as the largest aufeis in Russia.

Key words: aufeis fields, mapping, atlas, Landsat and Sentinel-2 satellite data, aufeis Cadastre, GIS database, North-East Russia.

ВВЕДЕНИЕ

Наледи представляют собой одну из форм наземного оледенения, характерную преимущественно для горных районов криолитозоны. Они ежегодно образуются в холодный период года в результате послойного замерзания изливающихся на поверхность подземных вод. Наледи, формирующиеся у постоянно действующих родников, называют тарынами (данный термин имеет якутское происхождение). Наледи-тарыны могут занимать значительные площади (в горной местности до 3–5 % территории) и служат мощным регулятором подземного и поверхностного стока [Алексеев и др., 2011; Алексеев, 2016; Yoshikawa et al., 2007]. Запасы воды в наледях России составляют не менее 50 км³, что почти равно объему годового стока р. Индигирки [Соколов, 1975].

Наиболее благоприятные условия для образования наледей-тарынов, в том числе гигантских, имеющих площадь более 1 км² [Петров, 1930], характерны для территории Северо-Востока России (СВР). СВР включает в себя бассейны Яны, Индигирки, Колымы, Пенжины и других рек бассейна Охотского моря, стекающих с хр. Сунтар-Хаята, а также р. Анадырь и других рек Чукотского полуострова.

СВР характеризуется преимущественно горным рельефом (за исключением Яно-Индигирской и Колымской низменностей), максимальная высота над уровнем моря достигает 3147 м. Большая часть исследуемого региона относится к зоне субарктического континентального климата с очень холодной зимой (средняя температура воздуха в январе –36 °С и ниже) и коротким теплым летом [Национальный Атлас..., 2004]. Вся территория, за исключением побережья Охотского моря, расположена в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород [Геокриология СССР, 1989]. Мощность многолетнемерзлых пород в верхнем течении рек Яна и Индигирка достигает на вершинных поверхностях 350–500 м и более, а преобладающие глубины сезонного оттаивания составляют 0.9–1.3 м [Геокриология СССР, 1989].

Актуальность изучения наледей обусловлена как фундаментальной значимостью, так и практическими соображениями. История их исследова-

ния в России насчитывает более 100 лет. Первая научная статья на русском языке, осветившая природу наледных явлений на основе круглогодичных мерзлотно-геологических изысканий в Южной Якутии, была опубликована в 1903 г. [Подьяконов, 1903]. Исследования наледей резко активизировались на рубеже 1920-х и 1930-х гг. в связи с организацией Якутской комплексной экспедиции АН СССР и в процессе работ по изучению водных ресурсов и путей сообщения восточных районов страны. Так, В.Г. Петров разработал методы борьбы с наледями грунтовых вод у дорожных сооружений [Петров, 1930, 1934]. Н.И. Толстихин создал классификацию подземных вод, питающих наледи (по отношению к мерзлой зоне литосферы), уточнил понятие “наледь”, выделил наледи надмерзлотных, межмерзлотных и подмерзлотных вод [Толстихин, 1931]. Ключевое значение для изучения наледей СВР имели исследования В.П. Седова и П.Ф. Швецова, в частности работа [Швецов, Седов, 1941]. Впервые за всю историю изучения наледей ими были составлены ситуационные карты ледяных массивов с контурами распределения их мощности и местоположением источников образования. Также было установлено, что основная часть ледяных массивов образуется за счет глубинных источников подземных вод, свободно выходящих на земную поверхность.

В 1940-х гг. внимание к изучению наледей-тарынов СВР возросло в связи с открытием и разработкой богатейших месторождений полезных ископаемых (золота, олова, вольфрама, урана и др.). Наибольшее значение имели работы [Чекотилло, 1941; Зонов, 1944]. В статье [Зонов, 1944] рассмотрена наледность всей Яно-Колымской горной системы, а также впервые выявлены и описаны массивы наледного льда, не стаивающие полностью в течение лета. В 1940-е гг. большой вклад в изучение вечной мерзлоты и подземных вод внесли сотрудники экспедиций Дальстроя. Результаты их многолетних исследований обобщены в работе [Симаков, 1949]. Первая карта наледей в бассейне р. Индигирки опубликована в работе [Швецов, 1951].

В последующие годы наблюдения над наледями стали на протяжении четверти века регулярными, главным образом благодаря усилиям сотрудников Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Впервые на территорию Северо-Востока России была составлена карта относительной наледности [Соколов, 1975] и выполнено детальное наледное районирование [Толстухин, 1974, 1975]. В 1960-х гг. организованы специальные наледные полигоны на нескольких реках Северо-Востока России. Самый продолжительный ряд наблюдений (с 1962 по 1992 г.) получен на Анмангындинском наледном полигоне, организованном Колымским УГМС в 1962 г. Материалы многолетних наблюдений за Анмангындинской наледью обобщены в [Алексеев и др., 2012].

Определена гидрологическая роль наледей и их вклад во внутригодовое распределение стока. Установлено, что зимой в наледях аккумулируется до 70 % подземного стока, а летом в результате таяния ледяных массивов такое же количество воды поступает в речную сеть. В большинстве случаев вклад таяния наледей в годовой сток рек составляет 3–7 %, достигая 25–30 % в отдельных речных бассейнах с наибольшей наледностью [Соколов, 1975; Reedyk et al., 1995].

С начала 1990-х гг. исследования наледей СВР приостановились. Однако в настоящее время практическая значимость их изучения возросла в связи с освоением и развитием арктических областей. Так, наледи отрицательно влияют на устойчивость инженерных сооружений и осложняют транспортное сообщение, что было впервые показано еще в работах классиков мерзлотоведения [Львов, 1916; Сумгин, 1927; Петров, 1930]. Родники, питающие наледи, могут в некоторых случаях служить единственным источником водоснабжения населенных пунктов [Симаков, 1949; Симаков, Шильниковская, 1958; Алексеев, 1987].

Наледные участки речных долин и сами наледи хорошо фиксируются на аэро- и космических снимках. Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет определять границы наледных ландшафтов и вычислять площади ледяных массивов на определенный момент времени в различные стадии развития. Это открывает широкие возможности для изучения закономерностей распространения и пространственно-временной изменчивости наледных явлений. Первые широкомасштабные исследования в данном направлении выполнены на Северо-Востоке России в середине XX в. В результате систематизации данных аэрофотосъемки, проведенной в 1940-е и 1950-е гг., составлены Карта наледей Северо-Востока СССР в масштабе 1:2 000 000 и кадастр наледей, являющийся приложением к Карте [Симаков, Шильниковская, 1958]. Они содержали сведения

о 7448 наледях площадью от 0.01 до 81.1 км² (площадь была определена по наледным полянам). Эти материалы были рукописными и хранились в фондах Геологического управления в Магадане.

Первый опыт применения данных спутниковой съемки для изучения наледей относится еще к 1970-м гг. [Топчиев, 1979]. Спутниковые снимки также активно использовались при построении Геокриологической карты СССР, работа по созданию которой велась с начала 1970-х гг. и была завершена в 1991 г. [Геокриологическая карта..., 1996]. На данной карте показано 5109 наледей, крупнейшие из них – в масштабе, остальные внесмасштабно (точками). В 2013 г. эти данные были оцифрованы, также производились их уточнение и верификация по спутниковым снимкам Landsat/ETM+ [Прасолова и др., 2013]. Однако эти цифровые данные не были опубликованы, что отличает наледи от ледников, для которых существует обновляемый электронный каталог [GLIMS and NSIDC, 2017].

В последнее десятилетие появление в открытом доступе многолетних рядов спутниковых данных Landsat и Sentinel-2 существенно расширило возможности для картографирования наледей. Так, для территории СВР данные со спутников Landsat-7, 8 с пространственным разрешением 15 и 30 м доступны за период с 1999 г., а данные Landsat-1 (сенсор MSS) с пространственным разрешением 80 м – с 1973 г. Это позволяет не только оценивать современное состояние наледей, но и анализировать их многолетнюю изменчивость.

Как и другие снежно-ледовые объекты, наледи могут быть выделены автоматически на основе нормализованного разностного снежного индекса NDSI [Hall et al., 1995] или более сложных индексов [Morse, Wolfe, 2015]. Определенные сложности при идентификации наледей по снимкам представляет их отделение от снежного покрова [Pavelsky, Zarnetske, 2017; Makarieva et al., 2019] или от покрытых льдом водоемов [Morse, Wolfe, 2015]. Однако эти проблемы успешно решаются на основе правильного подбора снимков (для территории СВР наиболее информативными являются снимки за период с конца мая до середины июня) или путем экспертной верификации [Makarieva et al., 2019].

Наличие в открытом доступе спутниковых данных и возможность выделения по ним наледей в полуавтоматическом режиме позволило создать актуальные картографические базы наледей речных бассейнов Северо-Востока России. На основе синтеза исторических и современных материалов о наледях подготовлено новое картографическое произведение – Атлас наледей-тарынов Северо-Востока России [Алексеев и др., 2021]. В настоящей работе приведены характеристики использо-

ванного массива и кратко рассмотрены подходы к картографированию наледей по историческим и спутниковым данным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информационной основой для картографирования наледей на территории СВР послужили картографические базы данных [Свидетельство..., 2021a–z], созданные авторами настоящей работы на основе двух источников: карты и кадастра наледей Северо-Востока СССР [Кадастр..., 1958; Симаков, Шильниковская, 1958] и спутниковых снимков Landsat-8. Особенности этих данных, а также методика создания картографической базы данных наледей и ее структура, на примере бассейна р. Индигирки, рассмотрены в работе [Makarjeva et al., 2019]. Следует отметить, что в ней учитывалась только фактическая площадь льда, зафиксированная по спутниковым снимкам, в результате чего площадь наледей оказалась в 1.5–2.2 раза меньше, чем по Кадастру [1958]. Площадь наледных полей существенно больше фактической площади льда, однако многие из них остаются частично или полностью свободными ото льда даже в начале периода таяния.

Наледеи по данным Кадастра 1958 г. представлены в базе данных в виде точечных объектов (с указанием площади согласно Кадастру), а по снимкам Landsat-8 наледи выделены как площадные объекты, т. е. участки, покрытые льдом на момент съемки. В настоящее время база данных наледей по снимкам Landsat создана для всей рассматриваемой территории, за исключением бассейнов рек северного побережья Охотского моря.

Снимки Landsat-8 были загружены с веб-сервиса Геологической службы США [<http://earthexplorer.usgs.gov>]. При картографировании наледей использовались снимки за период 2013–2020 гг., однако более 50 % всех данных о наледях были получены по снимкам за 2016 г., когда в начале июня наблюдался устойчивый период малооблачной погоды. Всего обработано более 130 сцен Landsat-8, полученных в первые недели после схода снежного покрова. Самая ранняя из выбранных дат съемки 15 мая, а самая поздняя 26 июня. Обработка данных и дешифрирование наледей выполнялись в программных пакетах QGIS и ArcGIS.

Для исключения ошибочно выделенных объектов, а также пропусков наледей проведена сплошная верификация результатов автоматизированного дешифрирования наледей. Она включала уточнение контуров наледей (где необходимо), удаление покрытых снегом областей, прилегающих к наледям, удаление прочих ледовых объектов, таких как покрытые льдом озера или участки русел рек, а также объединение наледей, разделен-

ных в процессе таяния на несколько смежных участков. Такие участки считались частями одной наледи в том случае, если они были расположены в пределах одной наледной поляны.

Всего в пределах исследуемой территории по снимкам Landsat выделено 9306 наледей общей площадью 4854.5 км² (рис. 1). Согласно данным Кадастра наледей 1958 г., общее количество наледей на данной территории составляло 6704, а суммарная площадь достигала 9785 км². Соответствие данных о наледях по двум источникам представлено в таблице для пяти крупнейших речных бассейнов изучаемого региона.

Основной причиной несоответствия общей площади наледей между данными Кадастра 1958 г. и современными оценками, полученными по снимкам Landsat, является разный способ учета наледей. При составлении Кадастра оценивалась площадь наледных полей, а по снимкам Landsat – площадь, покрытая льдом в момент съемки. Также снимки Landsat были получены в период активного таяния наледей, в связи с чем возникла необходимость восстановить их максимальную площадь (до таяния). Она была рассчитана на основе зависимости от категории размера наледи и количества дней таяния наледи до момента получения снимка на основе метода из [Соколов, 1975]. В среднем по бассейнам рек расчетная максимальная площадь наледей оказалась на 15–30 % больше, чем площадь, оцененная по снимкам (см. таблицу).

Выборочное сопоставление восстановленной площади с площадью наледных полей дает неоднозначные результаты. В большинстве случаев восстановленная площадь близка к площади наледных полей. Однако имеются многочисленные наледные поляны, где восстановленная площадь наледи меньше площади самой поляны в несколько раз. В таких случаях обычно наледь на снимках выглядит как несколько ледяных массивов в пределах одной обширной поляны, причем суммарная площадь льда многократно меньше площади, указанной в Кадастре. Такие наледи предположительно относятся к участкам с угасанием наледных процессов согласно классификации [Зонов, 1944], однако для оценки изменения их площади со временем требуется проведение дополнительных исследований по снимкам разных лет. Наиболее крупные из таких наледей расположены на Чукотском полуострове.

Таким образом, количество наледей по современным спутниковым данным больше, чем указано в Кадастре, но при этом их суммарная площадь существенно меньше. Аналогичный результат ранее был получен для бассейна р. Индигирки [Makarjeva et al., 2019]. Однако это различие вполне может быть связано с указанными выше различиями в подходах к оценке площади, а не с реальным сокращением площади наледей.

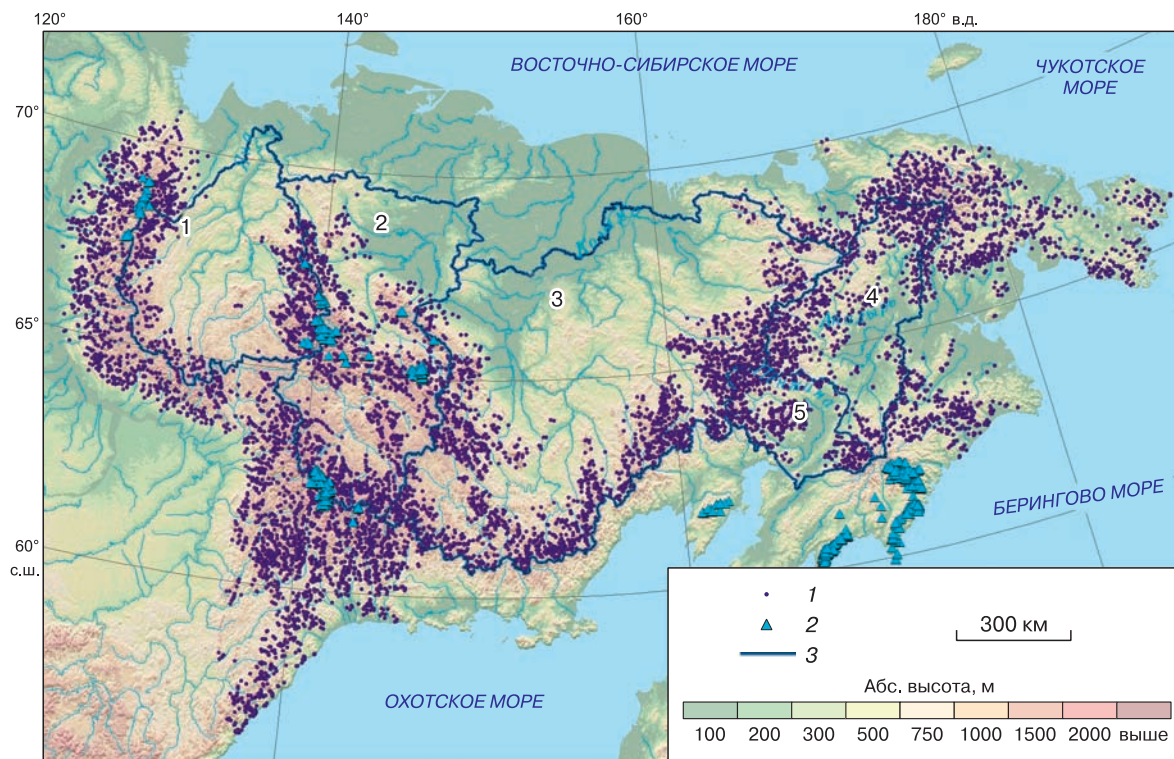


Рис. 1. Пространственное распределение наледей на Северо-Востоке России (за исключением северного побережья Охотского моря), выделенных по спутниковым данным Landsat-8.

1 – наледы (по данным Landsat); 2 – ледники (по данным GLIMS); 3 – границы бассейнов рек. Бассейны крупных рек: 1 – Яна, 2 – Индигирка, 3 – Колыма, 4 – Анадырь, 5 – Пенжина.

Сопоставление данных о количестве и площади наледей по Кадастру [1958] и по снимкам Landsat в пределах пяти крупнейших речных бассейнов СВР

Бассейн реки – замыкающий створ	Количество наледей и их площадь (км ²) по Кадастру		Количество наледей и их площадь (км ²) по снимкам Landsat		
	Наледи, подтвержденные по снимкам Landsat (по наличию льда)	Наледи, не подтвержденные по снимкам Landsat	Наледи, подтвержденные по Кадастру	Наледи, отсутствующие в Кадастре	Максимальная расчетная площадь наледей
Яна – Юбилейный	268 (616.4)	117 (122.2)	262 (309.8)	320 (102.4)	513.8
Индигирка – Воронцово	605 (1845.8)	243 (140.1)	582 (974.9)	572 (238.6)	1627.4
Колыма – Черский	1100 (1605.3)	662 (332.6)	1072 (714.2)	1138 (164.4)	1163.5
Анадырь – 3 км выше р. Утесики	357 (661.2)	147 (101.7)	351 (280.6)	399 (71.4)	396.5
Пенжина до устья	302 (410.9)	122 (125.5)	288 (106.5)	250 (48.7)	189.5

Создание карт пространственного распределения наледей

Важным показателем, характеризующим пространственное распределение наледей и их значимость для формирования гидрологического режима, является наледность, или доля площади наледей от общей площади территории. Этот по-

казатель рассчитывался двумя способами – в ячейках регулярной сетки размером 50 × 50 км и как среднее значение по частным водосборным бассейнам. При реализации первого способа для каждой ячейки было выполнено суммирование площадей наледей, попадающих в них, а затем полученные значения наледности интерполированы

из центра каждой ячейки. Для интерполяции был использован метод сплайна с натяжением.

Второй способ предполагал предварительное построение схемы водосборного деления территории. Для этого на основе глобальной цифровой модели рельефа (ЦМР) GMTED-2010 с размером ячейки 230 м [Danielson, Gesch, 2011] была создана сеть тальвегов. В дальнейших расчетах учитывались только те тальвеги, водосборная площадь которых (catchment area) превышает 1000 ячеек ЦМР, что соответствует ~50 км². Из числа этих тальвегов были выделены все объекты третьего и более высоких порядков по схеме Хортон–Стралера [Strahler, 1952], а затем в автоматическом режиме построены границы их водосборов. Учитывая низкое пространственное разрешение исходной ЦМР, во многих случаях потребовалось ручное редактирование выделенных водосборов. Верификация проводилась путем согласования выделенных границ бассейнов и гидрографической сети по данным цифровой картографической основы ВСЕГЕИ масштаба 1:2 500 000 [http://vsegei.com/ru/info/topo/]. На следующем этапе была рассчитана доля площади, занятой наледями, от общей площади частных водосборов. Расчет выполнен как по историческим данным Кадастра наледей [1958], так и по спутниковым снимкам.

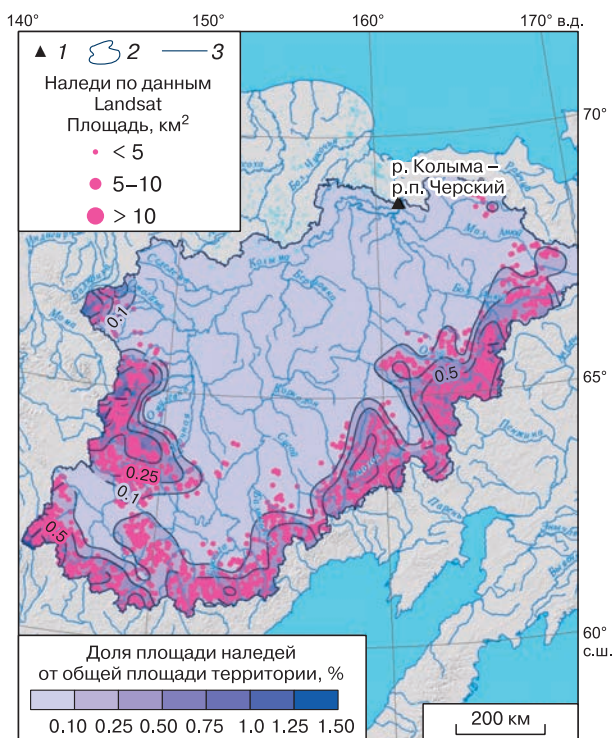


Рис. 2. Наледность бассейна р. Колымы по данным Landsat.

1 – гидропосты; 2 – бассейн р. Колымы; 3 – изолинии наледности.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА КАРТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В АТЛАСЕ

В Атласе наледей-тарынов Северо-Востока России представлены карты распространения наледей по данным Кадастра и по снимкам Landsat (для последних минимальная пороговая площадь составляет 1 га) для бассейнов основных рек СВР (Индигирка, Яна, Колыма, Анадырь), рек Чукотки (Амгуэма, Люлювеем, Паляваам), а также наиболее крупных рек бассейна Охотского моря (Пенжина, Ульбея, Нядбаки). Карты построены по данным Кадастра наледей [1958] и по снимкам Landsat-8. Общий перечень карт, представленных в атласе, включает карты распространения наледей-тарынов в бассейнах крупных рек (см. рис. 1) и частных водосборов в их пределах, карты наледности бассейнов крупных рек (рис. 2), карты доли протяженности наледей от длины рек для основных бассейнов, а также серии космокарт, созданных на основе спутниковых снимков и характеризующих современное состояние и динамику гигантских наледей.

Также в ходе экспедиций 2020–2021 гг. были проведены съемки отдельных наледных полей в бассейнах рек Индигирка и Колыма с беспилотного летального аппарата (БПЛА), на основе которых были построены ортофотопланы Анмангындинской наледи и комплекса наледей в бассейне р. Кюбюме [Makarieva et al., 2021] и других объектов. Они также представлены в Атласе.

Общую характеристику запасов воды, которые могут быть аккумулированы в наледях на территории СВР, дает карта наледных ресурсов (рис. 3). Впервые подобная карта была опубликована в Атласе снежно-ледовых ресурсов мира [Атлас..., 1997] на основе данных, полученных Б.Л. Соколовым. Объем наледных ресурсов (измеряемый в миллионах кубических метров на 1000 км²) был рассчитан для пяти крупнейших речных бассейнов СВР.

Максимальная наледность в пределах исследуемой территории характерна для бассейна р. Индигирка и особенно некоторых ее притоков, стекающих с хр. Черского. Наибольшей наледностью на всей рассматриваемой территории характеризуется бассейн р. Сюрюктях, где наледы занимают свыше 3 % территории.

С учетом слоя наледей, полученных по спутниковым данным, и картографической основы ВСЕГЕИ [http://vsegei.com/ru/info/topo/] была рассчитана доля протяженности наледей от длины рек (рис. 4). Этот показатель характеризует распространение наледей вдоль водотоков и в целом имеет высокую корреляцию с наледностью бассейнов. Учитывая низкую точность данных картографической основы, оценивались пересечения

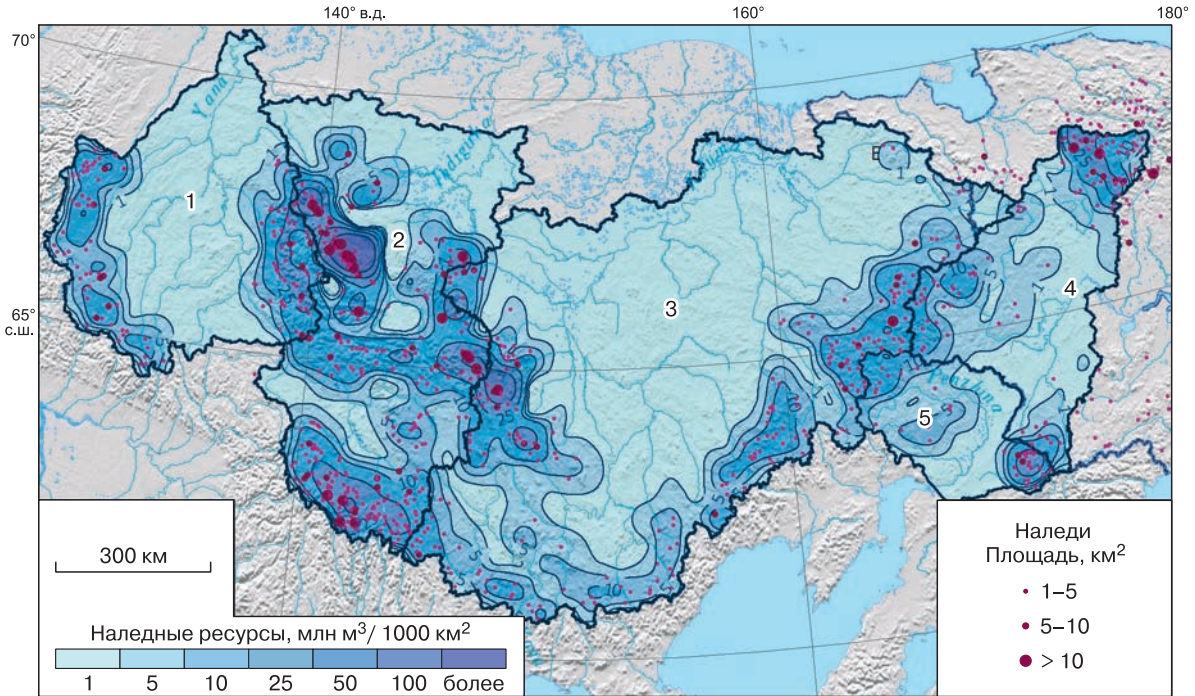


Рис. 3. Наледные ресурсы бассейнов рек Яны (1), Индигирка (2), Колыма (3), Анадырь (4), Пенжина (5), рассчитанные на основе данных Landsat-8.

наледей не с самими водотоками, а с построенными вокруг них буферными зонами. Ширина буферной зоны была принята равной 500 м, что соответствует возможной величине смещения водотока по данным картографической основы относительно его истинного положения.

Согласно классификации В.Г. Петрова, под гигантскими наледями понимают наледы, имеющие площадь более 1 км² [Соколов, 1975]. На всей территории СВР выявлено 1146 таких наледей. Из них для 42 наледей максимальная расчетная площадь льда превышает 10 км². Данная оценка существенно ниже ранее полученной на основе площади наледных полей. Так, в работе [Иванова, Павлова, 2018] приводятся данные о том, что в бассейне р. Индигирки выявлено 36, а в бассейне р. Яны – 14 наледей площадью более 10 км². Наиболее значительная группа из 7 наледей площадью более 10 км² расположена в бассейне р. Сюрюктях, наледность которого, согласно спутниковым данным, превышает 2%.

В Атласе рассматриваются одиночные гигантские наледы или их группы. Для каждой гигантской наледи, рассмотренной в Атласе, на основе снимков Landsat-1–8 и Sentinel-2 проанализирована многолетняя и внутригодичная изменчивость и построены серии карт и схем. Согласно словарю [Баранов и др., 1999], такие изображения относят к космокартам.

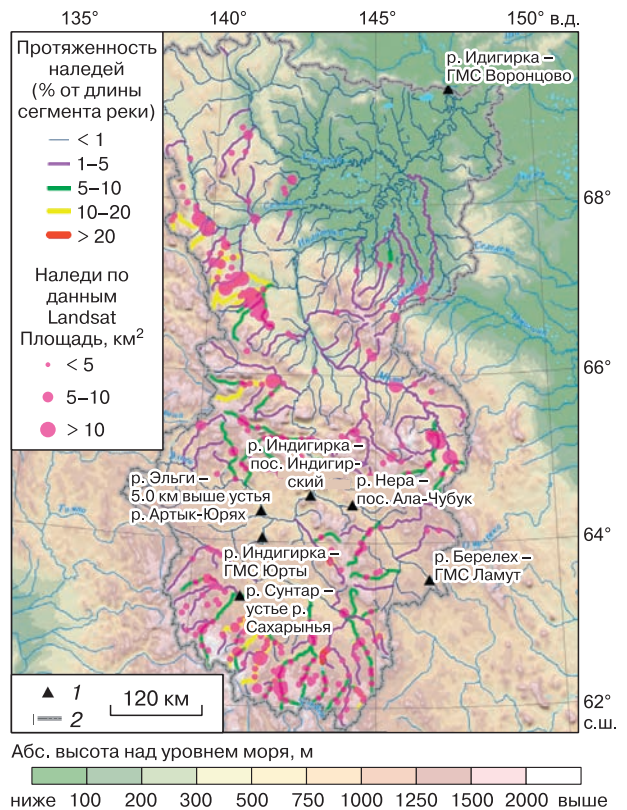


Рис. 4. Относительная доля протяженности наледей от длины рек в бассейне р. Индигирки.

1 – гидропосты; 2 – граница водосборного бассейна.

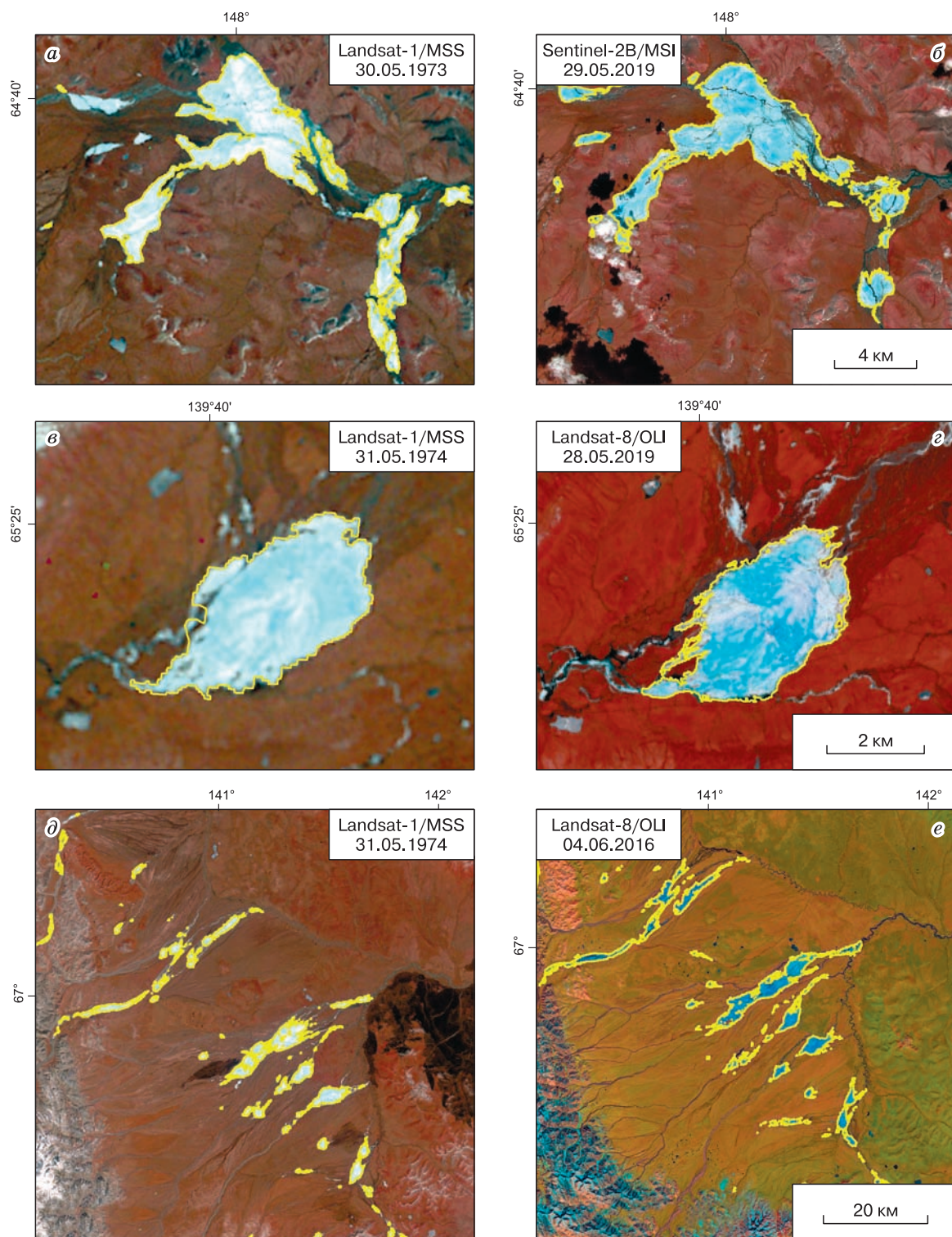


Рис. 5. Изменение площади отдельных гигантских наледей в бассейнах рек Колыма (а, б), Яна (в, г) и Индигирка (д, е) между 1973, 1974 и 2016, 2019 гг. по снимкам Landsat и Sentinel-2.

Площадь льда (км²): а – 35.7, б – 35.3, в – 9.2, г – 7.9, д – 163.3, е – 223.0.

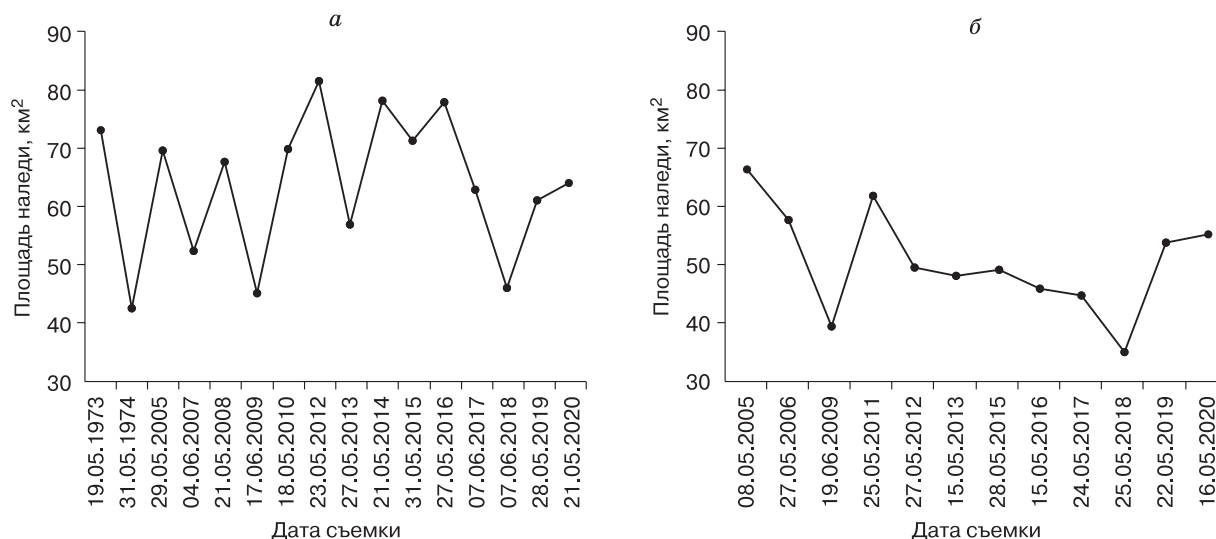


Рис. 6. Межгодовая изменчивость площади крупнейшей наледи в бассейне р. Сюрюктях (а) и Большой Момской наледи (б) в конце весеннего сезона (2005–2020 гг.) по снимкам Landsat-7, 8 и Sentinel-2.

Схема общего вида наледной поляны с выделением контура наледи в период максимального развития (при отсутствии снежного покрова) и максимального стаивания основана на снимках Sentinel-2 в естественных цветах с пространственным разрешением 10 м. Максимальная и минимальная площади наледей определялись по данным за выбранный год, а не за весь период наблюдений.

Космокарты динамики площади наледей в начале периода таяния построены по разновременным снимкам Landsat за период с 1974 по 2020 г. (рис. 5). Они характеризуют изменение максимальной площади наледей, определенной после схода устойчивого снежного покрова. На основе серии снимков Landsat, полученных за период 2000–2020 гг., установлено, что средняя площадь самой крупной наледи в бассейне р. Сюрюктях в период ее максимального развития (64.9 км^2) существенно больше площади Большой Момской наледи (50.5 км^2), которая ранее считалась крупнейшей наледью на территории России (рис. 6).

Космокарты динамики площади наледей в период таяния построены по снимкам Sentinel-2 за 2019 г. Для этого были подобраны снимки с момента схода снежного покрова в мае–начале июня до максимального стаивания наледи в августе–сентябре. Выделение наледей производилось по методике [Makarieva et al., 2019], адаптированной для снимков Sentinel-2.

ВЫВОДЫ

Наледи-тарыны – важнейший элемент горных ландшафтов Северо-Восточной Азии и мощный фактор преобразования геолого-географической среды. Создание картографической базы данных и Атласа наледей-тарынов открывает новый этап в

изучении этого явления. Представленные в Атласе карты фиксируют местоположение и размеры ледяных массивов спустя 50–70 лет после их первой регистрации на черно-белых аэрофотоснимках в конце 1940-х гг.

Полученные характеристики наледей, в том числе сведения о межгодовой и внутригодовой изменчивости некоторых из них являются важнейшими источниками информации для анализа современных изменений климатических и мерзлотно-гидрогеологических условий региона. Оценки максимальной площади наледности по бассейнам рек и объема наледных ресурсов могут стать основой для определения вклада наледей в формирование речного стока на территории СВР.

Проведенное сравнение характеристик наледей по данным Кадастра 1958 г. и современным спутниковым снимкам (несмотря на неоднозначность сопоставления этих источников данных) подтверждает, что за последние 50–70 лет произошли некоторые изменения в пространственном распределении и площади наледей на Северо-Востоке России. Однако их точная оценка затруднительна по причине различия в методиках оценки площади наледей. Причины этих изменений пока не анализировались, а их выявление требует проведения комплексных междисциплинарных исследований [Makarieva et al., 2021].

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Русского географического общества (проект 07/2021-И “Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России (продолжение)”), РФФИ (проект № 20-05-00666) и Санкт-Петербургского государственного университета (проект № 75295776).

Литература

- Алексеев В.Р.** Наледи. Новосибирск, Наука, 1987, 159 с.
- Алексеев В.Р.** Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лед и снег, 2016, т. 56, № 1, с. 73–93.
- Алексеев В.Р.** Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / В.Р. Алексеев, О.М. Макарьева, А.Н. Шихов и др. Новосибирск, СО РАН, 2021, 302 с.
- Алексеев В.Р., Бояринцев Е.Л., Довбыш В.Н.** Многолетняя динамика размеров Амангындинской наледи в условиях изменений климата // Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока: Тр. Всерос. науч. конф., посвящ. памяти А.В. Рождественского (Москва, 10–12 апр. 2012 г.). М., 2012, с. 298–305.
- Алексеев В.Р., Горин В.В., Котов С.В.** Наледи-тарыны Северной Чукотки // Лед и снег, 2011, т. 116, № 4, с. 85–93.
- Атлас** снежно-ледовых ресурсов мира / Ин-т географии РАН. М., Науч. мир, 1997, 371 с.
- Баранов Ю.Б.** Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / Ю.Б. Баранов, А.М. Берлянт, Е.Г. Капралов и др. М., ГИС-ассоциация, 1999, 204 с.
- Геокриологическая** карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Под ред. Э.Д. Ершова. Винница (Украина), Гос. картограф. фабрика, 1996, 16 л.
- Геокриология** СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 516 с.
- Зонов Б.В.** Наледи и польньи на реках Янско-Колымской горной страны // Тр. Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1944, т. IV, с. 33–92.
- Иванова Л.Д., Павлова Н.А.** Формирование и динамика наледей в бассейне р. Индигирки за последние шестьдесят лет // Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XXII Совецание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием) (Новосибирск, 18–22 июня 2018 г.). Новосибирск, Изд-во НГУ, 2018, с. 218–222.
- Кадастр** к Карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1:2 000 000 / Сост. А.С. Симаков, З.Г. Шильниковская. Магадан, Центр. комплексная тематическая экспедиция Северо-Вост. геол. управления, 1958, 398 с.
- Львов А.В.** Поиски и испытания водоисточников водоснабжения на западной части Амурской жд. в условиях “вечной” мерзлоты почвы. Иркутск, Изд-во Типо-лит. П.И. Макушина и В.М. Посохина, 1916, 881 с.
- Национальный Атлас** России. Т. 2. Природа и экология / Под ред. А.А. Ключко, М.А. Романовской и др. М., ФГУП ГОСГИСЦЕНТР, 2004, 495 с.
- Петров В.Г.** Наледи на Амуро-Якутской магистрали. Л., Изд-во АН СССР и автодорожного ин-та НКПС СССР, 1930, 177 с.
- Петров В.Г.** Опыт определения силы давления грунтовых вод в наледях // Тр. Комиссии по изучению вечной мерзлоты. М., Изд-во АН СССР, 1934, т. 2, с. 59–72.
- Подъяконов С.А.** Наледи Восточной Сибири и причины их возникновения // Изв. РГО, 1903, т. XXXIX, с. 305–337.
- Прасолова А.И., Пижанкова Е.И., Яковенко Е.Д.** Разработка методики дешифрирования космоснимков для обновления слоя наледей цифровой геокриологической карты России // Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы: Тез. конф. М., РУДН, 2013, с. 121–124.
- Свидетельство** о гос. регистрации базы данных № 2021620267 (от 12.02.2021 г.) “Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для Чукотского полуострова”. 2021а. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2021620267&TypeFile=html
- Свидетельство** о гос. регистрации базы данных № 2021620317 (от 24.02.2021 г.) “Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Индигирка”. 2021б. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2021620317&TypeFile=html
- Свидетельство** о гос. регистрации базы данных № 2021620332 (от 26.02.2021 г.) “Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Колыма”. 2021в. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2021620332&TypeFile=html
- Свидетельство** о гос. регистрации базы данных № 2021620333 (от 26.02.2021 г.) “Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Яна”. 2021г. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2021620333&TypeFile=html
- Симаков А.С.** Некоторые данные о наледях Колымо-Индигирского края // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Магадан, 1949, вып. 6, с. 66–80.
- Симаков А.С., Шильниковская З.Г.** Карта наледей Северо-Востока СССР. Краткая объяснит. записка. Северо-Вост. геол. управление Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров РСФСР. Магадан, 1958, 40 с.
- Соколов Б.Л.** Наледи и речной сток. Л., Гидрометеозидат, 1975, 190 с.
- Сумгин М.И.** Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Владивосток, Дальне-Вост. геофиз. обсерватория, 1927, 372 с.
- Толстихин Н.И.** Подземные воды в районах вечной мерзлоты // Доклад на 1-м Всесоюз. гидрол. съезде. Л., Геолгиз, 1931, 5 с.
- Толстихин О.Н.** Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск, Наука, 1974, 164 с.
- Толстихин О.Н.** Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР // Изучение и охрана водных ресурсов. М., Наука, 1975, 18 с.
- Топчиев А.Г.** Космические методы изучения долин и наледей Чульманского района // Вопросы географии. Сб. 3. Геоморфология и строительство. М., Мысль, 1979, с. 46–54.
- Чекотилло А.М.** Область великих наледей (наледи Восточной Якутии) // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1941, № 1, с. 94–113.
- Швецов П.Ф.** Гигантские наледи и подземные воды хребта Тас-Хаяхта / П.Ф. Швецов, В.П. Седов. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1941, 81 с.
- Швецов П.Ф.** Подземные воды Верхоянско-Колымской горноскладчатой области и особенности их проявления, связанные с низкотемпературной вечной мерзлотой. М., Изд-во АН СССР, 1951, 279 с.
- Danielson J.J., Gesch D.B.** Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) // U.S. Geol. Survey Open-File Rep. 2011–1073, 2011, 26 p.
- GLIMS and NSIDC:** Global Land Ice Measurements from Space glacier database. Compiled and made available by the international GLIMS community and the National Snow and Ice Data Center, Boulder CO, USA. – <https://doi.org/10.7265/N5V98602>, 2005 (updated 2017).
- Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V.** Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data // Remote Sens. Environ., 1995, vol. 54, p. 127–140.

- Makarieva O.M., Nesterova N.V., Ostashov A.A. et al.** Perspectives of the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia // *Вестн. СПбГУ. Науки о Земле*, 2021, т. 66, вып. 1, с. 74–90 (in English).
- Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V.** Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia) // *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, vol. 11 (1), p. 409–420.
- Morse P.D., Wolfe S.A.** Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada // *J. Geophys. Res.: Earth Surface*, 2015, vol. 120 (9), p. 1670–1686.
- Pavelsky T.M., Zarnetske J.P.** Rapid decline in river icings detected in Arctic Alaska: Implications for a changing hydrologic cycle and river ecosystems // *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44 (7), p. 3228–3235.
- Reedyk S., Woo M.K., Prowse T.D.** Contribution of icing ablation to streamflow in a discontinuous permafrost area // *Can. J. Earth Sci.*, 1995, vol. 32, p. 13–20.
- Strahler A.N.** Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology // *Geol. Soc. Amer. Bulletin*, 1952, vol. 63, p. 1117–1141.
- Yoshikawa K., Hinzman L.D., Kane D.L.** Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska // *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2007, vol. 112, p. 1–14.
- URL:** <http://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 22.07.2021).
- URL:** <http://vsegei.com/ru/info/topo/> (дата обращения: 22.07.2021).
- ### References
- Alexeev V.R. Naledi [Aufeis]. Novosibirsk, Nauka, 1987, 159 p. (in Russian).
- Alexeev V.R. Long-term variability of the spring taryn-aufeises. *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2016, No. 56 (1), p. 73–93 (in Russian).
- Alexeev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Zemlyanskova A.A. Atlas gigantskikh naledei-tarynov Severo-Vostoka Rossii [Atlas of Giant Aufeis-Taryn of the North-East of Russia]. Novosibirsk, SB RAS, 2021, 302 p. (in Russian).
- Alexeev V.R., Boyarintsev E.L., Dovbysh V.N. Long-term dynamics of the size of the Anmangynda aufeis under climate change. Modern problems of stochastic hydrology and flow regulation. In: Proc. of the All-Russian scientific conference dedicated to the memory of A.V. Rozhdestvensky (Moscow, 10–12 April, 2012). Moscow, 2012, p. 298–305 (in Russian).
- Alexeev V.R., Gorin V.V., Kotov S.V. Aufeis-taryns of northern Chukotka. *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2011, No. 116 (4), p. 85–93 (in Russian).
- Atlas snezhno-ledovykh resursov mira [Atlas of snow and ice resources of the world]. Institute of Geography RAS. Moscow, Nauchny Mir, 1997, 371 p. (in Russian).
- Baranov Yu.B., Berlyant A.M., Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Serapinas B.B., Filippov Yu.A. Geoinformatika. Tolkovyi slovar' osnovnykh terminov [Geoinformatics. Explanatory Dictionary of Basic Terms]. Moscow, GIS-Association, 1999, 204 p. (in Russian).
- Geokriologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:2 500 000 [Geocryological Map of the USSR on a scale of 1:2,500,000]. E.D. Ershov (Ed.). Vinnitsa (Ukraine), State cartographic factory, 1996, 16 p.
- Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dal'nii Vostok [Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East]. E.D. Ershov (Ed.). Moscow, Nedra, 1989, 516 p. (in Russian).
- Zonov B.V. Aufeis and aufeis fields on the rivers of the Yansko-Kolyma mountainous country. In: *Trudy Instituta merzlotovedeniya im. V.A. Obrucheva AN SSSR [Proceedings of V.A. Obruchev Permafrost Institute of the Academy of Sciences of the USSR]*. Moscow, Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1944, vol. IV, p. 33–92 (in Russian).
- Ivanova L.D., Pavlova N.A. Formation and dynamics of aufeis in the Indigirka River basin in the last sixty years. In: Proc. of the All-Russian meeting on groundwater in the East of Russia (XXII Meeting on groundwater in Siberia and the Far East with international participation) (Novosibirsk, June 18–22, 2018). Novosibirsk, Izd-vo NGU, 2018, p. 218–222 (in Russian).
- Kadastr k Karte naledey Severo-Vostoka SSSR masshtaba 1:2 000 000 [Cadastre to the Map of the north-east of the USSR. Scale 1:2 000 000]. Magadan, Central complex thematic expedition of the North-Eastern geological department, 1958, 398 p. (in Russian).
- L'vov A.V. Poiski i ispytaniya vodoistochnikov vodosnabzheniya na zapadnoi chasti Amurskoi zh.d. v usloviyakh "vechnoi" merzloty pochvy [Search and testing of water supply sources on the western part of the Amur railway in conditions of "permafrost" soil]. Irkutsk, Tipo-lit. P.I. Makushina i V.M. Posohina Publisher, 1916, 881 p. (in Russian).
- Natsional'nyi Atlas Rossii. T. 2. Priroda i ekologiya [National Atlas of Russia. Vol. 2. Nature and Ecology]. A.A. Klochko, M.A. Romanovskaya (Eds.). Moscow, GOSGISTSENTR, 2004, 495 p. (in Russian).
- Petrov V.G. Naledi na Amuro-Yakutskoj magistrali [Aufeis on the Amur-Yakutsk highway]. Leningrad, Izd-vo AN SSSR i avtodorozhnogo in-ta NKPS SSSR, 1930, 177 p. (in Russian).
- Petrov V.G. Experience in determining the force of groundwater pressure in ice. In: *Trudy Komissii po izucheniyu vechnoj merzloty [Proceedings of the Commission for the Study of Permafrost]*. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1934, vol. 2, p. 59–72 (in Russian).
- Podyakonov S.A. Aufeis in Eastern Siberia and the causes of their occurrence. *Izvestiya RGO [Bulletin of Russian Geographical Society]*, 1903, vol. 39, p. 305–337 (in Russian).
- Prasolova A.I., Pizhankova E.I., Yakovenko E.D. Development of a satellite images interpretation technique for updating the layer of aufeis of the digital geocryological map of Russia. In: Abstracts of the Conf. Geocryological mapping: problems and prospects, Moscow, RUDN, 2013, p. 121–124 (in Russian).
- Certificate of state registration of the database No. 2021620267. Naledi Severo-Vostoka Rossii: GIS katalog dlya Chukostkogo poluostrova [Aufeis of the North-East of Russia: GIS catalog for the Chukchi Peninsula]. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Zemlyanskova A.A., Semakina A.V., Alexeev V.R. Russian Federation: Published 12.02.2021. – URL: https://www1.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=D B&DocNumber=2021620267&TypeFile=html
- Certificate of state registration of the database No. 2021620317. Naledi Severo-Vostoka Rossii: GIS katalog dlya bassejna reki Indigirka [Aufeis of the North-East of Russia: GIS catalog for the Indigirka River basin]. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Zemlyanskova A.A., Alexeev V.R. Russian Federation: Published 24.02.2021. – URL: https://www1.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=D B&DocNumber=2021620317&TypeFile=html
- Certificate of state registration of the database No. 2021620332. Naledi Severo-Vostoka Rossii: GIS katalog dlya bassejna reki Kolyma [Aufeis of the North-East of Russia: GIS catalog for the

- Kolyma River basin]. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Zemlyanskova A.A., Alexeev V.R. Russian Federation: Published 26.02.2021. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2021620332&TypeFile=html
- Certificate of state registration of the database No. 2021620333. Naledi Severo-Vostoka Rossii: GIS katalog dlya bassejna reki Yana [Aufeis of the North-East of Russia: GIS catalog for the Yana River basin]. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V., Zemlyanskova A.A., Alexeev V.R. Russian Federation: Published 26.02.2021. – URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2021620333&TypeFile=html
- Simakov A.S. Several data on the aufeis in the Kolymo-Indigirsky region. In: Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Severo-Vostoka SSSR [Materials on geology and mineral resources of the North-East of the USSR]. Magadan, 1949, vol. 6, p. 66–80 (in Russian).
- Simakov A.S., Shilnikovskaya Z.G. Karta naledei Severo-Vostoka SSSR. Kratkaya ob"yasnitel'naya zapiska [The map of the naleeds of the North-East of the USSR. A Brief Explanatory Note]. Magadan, The North-Eastern Geological Survey of the Main Directorate of Geology and Subsoil Protection, 1958, 40 p. (in Russian).
- Sokolov B.L. Naledi i rechnoi stok [Aufeis and Streamflow]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1975, 190 p. (in Russian).
- Sumgin M.I. Vechnaya merzlota pochvy v predelakh SSSR [Permafrost of soil within the USSR]. Vladivostok, Dal'nevostochnaya geofizicheskaya observatoriya, 1927, 372 p. (in Russian).
- Tolstikhin N.I. Groundwater in permafrost regions. In: Report at the 1st All-Union hydrological congress. Leningrad, Geoliz, 1931, 5 p. (in Russian).
- Tolstikhin O.N. Naledi i podzemnye vody Severo-Vostoka SSSR [Aufeis and groundwater in the North-East of the USSR]. Novosibirsk, Nauka, 1974, 164 p. (in Russian).
- Tolstikhin O.N. Aufeis and underground water of the North-East of the USSR. In: Study and protection of water resources. Moscow, Nauka, 1975, 18 p. (in Russian).
- Topchiev A.G. Space methods in studying the valleys and aufeis of the Chulman region. Voprosy geografii. Sb. 3. Geomorfologiya i stroitel'stvo [Challenges in Geography. Vol. 3. Geomorphology and Construction]. Moscow, Mysl, 1979, p. 46–54 (in Russian).
- Chekotillo A.M. The region of great icing (icing of Eastern Yakutia). Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya [Bulletin of USSR Academy of Sciences. Geology series], 1941, No. I, p. 94–113 (in Russian).
- Shvetsov P.F., Sedov V.P. Gigantskie naleedi i podzemnye vody khrebtta Tas-Khayakhtakh [Giant aifeis and underground water of the Tas-Khayakhtakh ridge]. Moscow; Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1941, 81 p. (in Russian).
- Shvetsov P.F. Podzemnye vody Verkhoyansko-Kolymskoi gornoskladchatoi oblasti i osobennosti ikh proyavleniya, svyazannye s nizkotemperaturnoi vechnoi merzlotoi [Groundwater of the Verkhoyansk-Kolyma mountain-fold area and features of their manifestation associated with low-temperature permafrost]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1951, 279 p. (in Russian).
- Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073, 2011, 26 p.
- GLIMS and NSIDC: Global Land Ice Measurements from Space glacier database. Compiled and made available by the international GLIMS community and the National Snow and Ice Data Center, Boulder CO, USA. – <https://doi.org/10.7265/N5V98602>, 2005 (updated 2017).
- Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. Remote Sens. Environ., 1995, vol. 54, p. 127–140.
- Makarieva O.M., Nesterova N.V., Ostashov A.A., Zemlyanskova A.A., Tumskoy V.E., Gagarin L.A., Ekaykin A.A., Shikhov A.N., Olenchenko V.V., Khristoforov I.I. Perspectives of the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia. Vestnik of Saint Petersburg University, Earth Sciences, 2021, vol. 66 (1), p. 74–90.
- Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia). Earth Syst. Sci. Data, 2019, vol. 11 (1), p. 409–420.
- Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada. J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2015, vol. 120 (9), p. 1670–1686.
- Pavelsky T.M., Zarnetske J.P. Rapid decline in river icings detected in Arctic Alaska: Implications for a changing hydrologic cycle and river ecosystems. Geophys. Res. Lett., 2017, vol. 44 (7), p. 3228–3235.
- Reedyk S., Woo M.K., Prowse T.D. Contribution of icing ablation to streamflow in a discontinuous permafrost area. Canadian J. Earth Sci., 1995, vol. 32, p. 13–20.
- Strahler A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. Geol. Soc. America Bulletin, 1952, vol. 63, p. 1117–1141.
- Yoshikawa K., Hinzman L.D., Kane D.L. Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska. J. Geophys. Res. Biogeosci., 2007, vol. 112, p. 1–14.
- URL: <http://earthexplorer.usgs.gov> (last visited: 22.07.2021).
- URL: <http://vsegei.com/ru/info/topo/> (last visited: 22.07.2021).

*Поступила в редакцию 25 июля 2021 г.,
после доработки – 22 декабря 2021 г.,
принята к публикации 19 мая 2022 г.*