

# ПОДЗЕМНЫЕ ЛЬДЫ И НАЛЕДИ

УДК 551.328

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>

## Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным

© 2019 г. О.М. Макарьева<sup>1-3\*</sup>, А.Н. Шихов<sup>4</sup>, А.А. Осташов<sup>3</sup>, Н.В. Нестерова<sup>3,5</sup><sup>1</sup>Научная группа модели Гидрограф, Санкт-Петербург, Россия; <sup>2</sup>Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия; <sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;<sup>4</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;<sup>5</sup>Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

\*omakarieva@gmail.com

## Icings of the Indigirka river basin according to the recent Landsat satellite images and historical data

O.M. Makarieva<sup>1-3\*</sup>, A.N. Shikhov<sup>4</sup>, A.A. Ostashov<sup>3</sup>, N.V. Nesterova<sup>3,5</sup><sup>1</sup>Hydrograph model research group, St. Petersburg, Russia; <sup>2</sup>Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; <sup>3</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;<sup>4</sup>Perm State University, Perm, Russia; <sup>5</sup>State Hydrological institute, St. Petersburg, Russia

\*omakarieva@gmail.com

Received January 25, 2018 / Revised August 30, 2018 / Accepted October 16, 2018

**Keywords:** *aufeis, database, Indigirka river basin, inventory of aufeises, Landsat images.*

### Summary

The paper presents methods and results of creation of the digital catalogue of aufeises for the Indigirka river basin made on the basis of Landsat images and historical data. The region under study is the basin before the hydrometric section of GMS Vorontsovo, its area is about 305 000 km<sup>2</sup>. Historical data were taken from the Inventory of naleds of the North-East of the USSR territory published in 1958 and topographic maps. It includes the estimated coordinates and characteristics of 897 aufeises with total area of 2064 km<sup>2</sup>. The Landsat-based identification of aufeises for 2013–2017 allowed making description of 1213 aufeises over a total area of 1287 km<sup>2</sup>. The integrated digital catalogue of the aufeises for the Indigirka river basin based on combination of the above two sources is available at <https://issues.pangaea.de/browse/PDI-17699>. 10% of the largest aufeises make up about 60% of the total area of all aufeises according to both sources. The largest number of aufeises is at altitudes of 900–1300 m. The interannual variability of area of the aufeises for the period 2001–2016 was estimated by the example of the Bolshaya Momskaya naled and the group of large aufeises in the basin of the Syuryukty River which is the left tributary of the Indigirka. The conclusions cannot be considered unambiguous due to certain limitations of the imagery data but the results of the analysis is indicative of a tendency to decreasing in the area of the Bolshaya Momskaya naled in recent years, while no reduction in the aufeis area is noted in the basin of the Syuryukty River. The main results of this work are the new geodatabase of the aufeises in the Indigirka river basin, and also the comparison of the satellite observations with historical data performed for two major naleds. It is established that the satellite-estimated total area of aufeises is 1.6 times less than in the Cadastre (1958). At the same time, it was found that more than 600 aufeises recognized by the Landsat images were absent in the Cadastre of 1958. This may suggest that either the Cadastre data is incomplete or that conditions of the aufeis can be significantly changed over the past 50 years.

**Citation:** Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Icings of the Indigirka river basin according to the recent Landsat satellite images and historical data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (2): 201–212. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>.

*Поступила 25 января 2018 г. / После доработки 30 августа 2018 г. / Принята к печати 16 октября 2018 г.*

**Ключевые слова:** база данных, бассейн р. Индигирка, кадастр наледей, наледы, снимки Landsat.

На основе Кадастра наледей Северо-Востока СССР (1958 г.) и топографических карт создана база данных о 897 наледах в бассейне р. Индигирка. По данным космической съёмки Landsat за 2013–2017 гг. выявлены 1213 наледей суммарной площадью 1287 км<sup>2</sup>. Создан единый электронный Каталог наледей в бассейне р. Индигирка. Современная площадь наледей здесь в 1,6 раза меньше, чем по данным Кадастра 1958 г., но в Кадастре отсутствуют сведения более чем о 600 наледей, обнаруженных по снимкам.

## Введение

Растущий интерес к освоению и развитию арктических областей требует понимания гляциальных и мерзлотных явлений, к которым относятся и наледы. Наледи — результат сложной взаимосвязи речных и подземных вод в условиях сурового климата и многолетнемерзлых грунтов, они играют большую роль в хозяйственной деятельности человека. Активизация наледообразовательных процессов может приводить к существенным материальным издержкам. Они отрицательно влияют на устойчивость инженерных сооружений, а также осложняют эксплуатацию гидротехнических и промышленных конструкций [1]. Однако ключи, питающие наледы, могут в некоторых случаях служить единственным источником водоснабжения населённых пунктов [2]. Запасы воды в наледях Северо-Востока, Забайкалья, Якутии и Западной Сибири составляют не менее 50 км<sup>3</sup>, что равно почти объёму годового стока Индигирки [3].

Существуют различные оценки отклика наледей на потепление климата. Так, В.Р. Алексеев [4] отмечает, что в многолетнем режиме наледей зафиксированы циклы подъёма и спада максимальных в году размеров продолжительностью 3, 7 и 11 лет с амплитудой колебания в 25–30% относительно средних многолетних значений. За последние 50–60 лет уменьшается объём родниковых наледей, что согласуется с другими фактами современной дегляциации криосферы [4].

В работе [5] утверждается, что деградация мерзлых пород, особенно в зоне их прерывистого и островного распространения, приведёт к сокращению числа наледей и их практически полному исчезновению. В то же время в зоне сплошной мерзлоты потепление климата на 2–3 °С, прогнозируемое для Северо-Востока Сибири на конец XXI в., не приведёт к коренному изменению режима многолетнемерзлых пород, но увеличит объёмы сквозных и несквозных таликов. Это может вызвать рассредоточение крупных наледей и формирование новых небольших наледей [6]. Прогноз усиления динамики формирования наледей в условиях изменения климата подтверждается полевыми наблюдениями. Так, на основе анализа величины прироста деревьев на наледных полянах в работе [6] делается вывод, что импульсы потепления климата создают условия для роста наледей в долинах Улахан-Тарын и Булус (Центральная Якутия).

В 1958 г. опубликованы Карта наледей Северо-Востока СССР в масштабе 1:2 00 000 и Кадастр наледей, представляющий собой приложение к Карте [7, 8]. В последние 60 лет информация о наледях Северо-Востока не обновлялась. В 1980–1982 гг. в Государственном гидрологическом институте был издан Каталог наледей зоны БАМ [9–11], а в работе [12] её авторы обобщили результаты экспедиционных исследований южной горной тайги Восточной Сибири с 1976 по 1983 г. Однако до сих пор нет электронного Каталога наледей, как, например, Каталога ледников [13].

Широкомасштабное развитие социально-экономической инфраструктуры, активное транспортное строительство в зоне распространения многолетнемерзлых пород [14] требуют разработки геоинформационных систем, позволяющих получить систематизированную информацию о наледях, их распространении и динамике [15]. Цель нашего исследования — создание электронного Каталога, содержащего сведения об историческом и современном местоположении и характеристиках наледей, согласно Кадастру наледей Северо-Востока за 1958 г. [7] и спутниковым снимкам Landsat 2013–2017 гг. В настоящее время работа выполнена для бассейна р. Индигирка (до ГМС Воронцово) площадью 305 тыс. км<sup>2</sup> — созданная база данных и ГИС-каталог наледей опубликованы на ресурсе <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.891036> [16].

## Объект исследования

Большая часть бассейна р. Индигирка представляет собой горную страну с отчётливо выраженными хребтами максимальной высотой до 3003 м. В нижнем течении река пересекает низменность с отметками до 350 м. Климат рассматриваемой территории — резко континентальный. Территория исследования известна как район, в котором находится «Полюс холода» Северного полушария. Абсолютные минимумы в Оймяконе достигают рекордных значений: –71 °С [17]. Бассейн Индигирки расположен в зоне распространения многолетней мерзлоты. Её мощность может достигать 450 м на водоразделах и до 180 м в речных долинах и межгорных впадинах, прерываясь в трещиноватых зонах таликами. На физико-географические процессы

сильно влияет деятельный слой мерзлоты мощностью от 0,3 м до более 2 м [18].

В исследуемом районе наледи формируются на горных хребтах, в предгорных и межгорных впадинах. Всего на Северо-Востоке России известно около 10 тыс. наледей, общая площадь которых составляет около 14 тыс. км<sup>2</sup> [3]. Относительная наледность в среднем колеблется от 0,4 до 1,3%, достигая 4% в бассейнах некоторых рек [19].

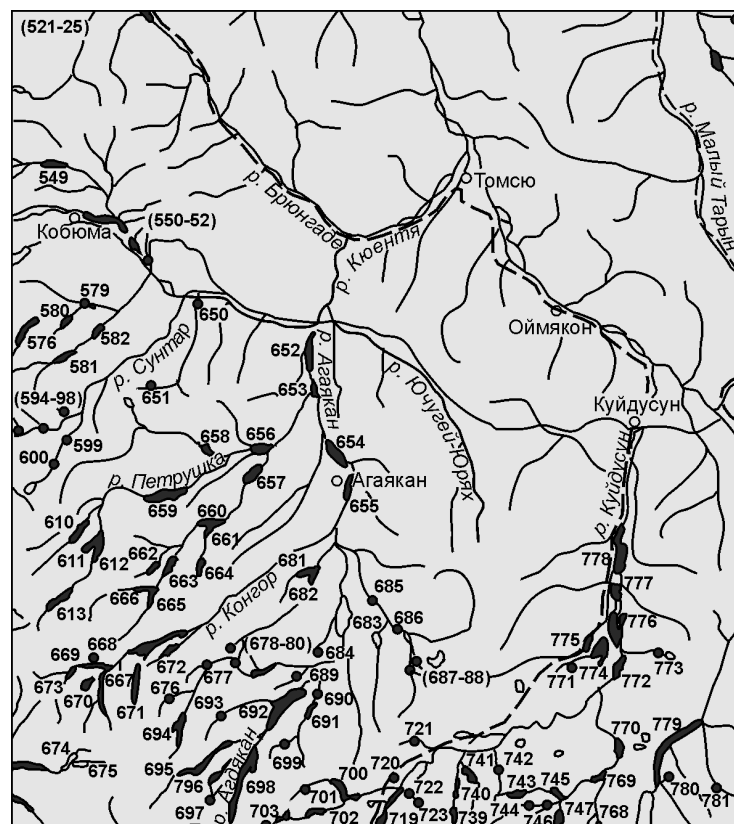
### Материалы и методы

**Создание базы данных наледей по Кадастру и топографическим картам.** Карта и Кадастр наледей Северо-Востока СССР [7, 8] (далее Карта и Кадастр) стали первыми обобщающими работами по учёту наледей и их характеристик для исследуемой территории. Они были выполнены в рамках Центральной комплексной тематической экспедиции Северо-Восточного геологического управления. Кадастр содержит данные о 7448 наледях разных размеров и более чем о 2000 булгунях. Из общего числа наледей 7006 нанесены по данным дешифрирования аэрофотоснимков, а

442 – по данным геологических отчётов. Дешифрирование наледных участков долин базировалось на геоморфологических признаках, т.е. дешифрировались не наледи как таковые, а наледные поляны. В качестве характеристик наледей в Кадастре представлены данные по местоположению наледей, размерам (максимальная длина, средняя ширина, площадь) и дате фиксации льда по аэрофотоснимку. Площадь наледей определялась методом планиметрирования. Размеры наледей, нанесённых на Карту согласно отчётным данным и устным сообщениям, в Кадастре не приводятся.

Очень большие и гигантские наледи были нанесены на Карту [8] в масштабе, остальные условно показаны точками. Каждая наледь на Карте [8] имеет номер, под которым она занесена в Кадастр [7]. Как отмечают А.С. Симаков и З.Г. Шильниковская [2], некоторые небольшие наледи могли быть пропущены из-за невозможности дешифрировать их на аэроснимках, кроме того, к моменту съёмки они могли уже разрушиться. Пример части листа Карты [8] для верховьев бассейна Индигирки приведён на рис. 1.

В настоящей работе на основе Кадастра наледей [7] и топографических карт создана база



**Рис. 1.** Пример части Листа 7 Карты наледей Северо-Востока СССР (верховья р. Индигирка – бассейны рек Сунтар, Агаякан, Куйдусун)  
**Fig. 1.** An example of the part of Sheet 7 Maps of the aufeises in the North-East of the USSR (the upper reaches of the Indigirka River – the Suntar, Agayakan, Kuidusun Rivers)

геоданных о наледях в бассейне р. Индигирка до створа ГМС Воронцово. Она содержит сведения о 897 наледях. В базе данных наледи представлены в виде точечных объектов. Для 808 наледей приведена площадь. Сумма площадей наледей составляет 2063,6 км<sup>2</sup>, а площадь отдельных наледей – от 0,01 до 82 км<sup>2</sup>. Сведения о дате фиксации льда по аэрофотоснимку в пределах исследуемого района приведены в Кадастре для 592 наледей (66%). Средняя дата фиксации льда – 2 августа, самая ранняя – 8 июня, а самая поздняя – 27 сентября. Для остальных 34% наледей дата фиксации льда отсутствует, т.е. наличие льда при дешифрировании аэрофотоснимка зафиксировано не было. Скорее всего, в большинстве случаев наледи уже стаяли, однако Кадастр также может содержать данные о старых наледных полянах, на которых сами наледы отсутствовали.

Пространственная привязка карты наледей проводилась по топографическим картам масштаба 1:200 000 [20], что обеспечивает точность оценки местоположения в пределах 100 м. Местоположение 292 наледей определено непосредственно по топокартам (при оцифровке точка ставилась в центр наледи на топокарте), для остальных наледей местоположение установлено по привязанной карте Кадастра. Также были выделены 11 наледей, которые отсутствовали в Кадастре, но показаны на топографических картах. Их площадь была определена путём оцифровки по этим картам. Площадь остальных наледей найдена по Кадастру. Для 88 наледей площадь установить не удалось, так как они не показаны на топокартах и их площадь не указана в Кадастре.

В созданной базе геоданных для каждой наледи приведены следующие атрибуты:

номер наледи по Кадастру (в случае присутствия наледи только на топографической карте присваивалось значение «0»); площадь наледи; дата фиксации наледи; наличие на топографической карте («0» – отсутствует, «1» – присутствует); наличие в Кадастре («0» – отсутствует, «1» – присутствует); номер карты Кадастра; номенклатура листа топографической карты; долгота, градусы; широта, градусы; высота над уровнем моря, м (определена по ЦМР Aster GDEM); комментарий (здесь отмечались в основном опечатки на кадастровой карте).

**Идентификация наледей по данным космической съёмки Landsat.** Местоположение и площадь наледей достаточно легко определяются по снимкам со спутников серии Landsat и/или

Sentinel-2, полученным сразу после схода снежного покрова. Как известно, снежно-ледовые объекты характеризуются высокими коэффициентами отражения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра и значительным его снижением в среднем инфракрасном диапазоне. На этой закономерности основан нормализованный дифференциальный снежный индекс NDSI, который рассчитывается по формуле [21]

$$NDSI = (GREEN - SWIR1) / (GREEN + SWIR1),$$

где GREEN – коэффициент отражения в зелёном канале (0,525–0,6 мкм для снимков Landsat-8); SWIR1 – коэффициент отражения в среднем инфракрасном канале (1,56–1,66 мкм для снимков Landsat-8).

Пороговое значение NDSI, по которому происходит отделение снежно-ледовых поверхностей, принимается равным 0,4 [21]. Помимо NDSI, для выделения наледей по снимкам Landsat предложены также другие индексы:

- а) нормализованный разностный индекс ледников (Normalized Difference Glacier Index, NDGI);
- б) индекс максимальной разности льда (Maximum Difference Ice Index, MDII).

Их преимущества и недостатки описаны в работе [22]. Существенная проблема при идентификации наледей по космическим снимкам – их отделение от пойменных и термокарстовых озёр, которые в мае–июне также покрыты льдом и имеют сходные с наледями спектральные характеристики. Для решения этой проблемы рекомендуется выполнять маскирование водных объектов по снимкам, полученным в середине летнего сезона, когда ледяной покров на всех водоёмах уже разрушается [22].

Идентификация наледей в бассейне р. Индигирка проведена по снимкам со спутника Landsat-8 за 2013–2017 гг., полученным с веб-сервиса Геологической службы США [23]. Всего обработано 33 снимка, полностью покрывающих бассейн р. Индигирка. Дата съёмки выбиралась таким образом, чтобы выделить максимально возможное число наледей, так как в июне происходит их интенсивное таяние. Самая ранняя из выбранных дат съёмки – 15 мая, самая поздняя – 18 июня. На ряде снимков присутствовала облачность (от 1 до 20%). Предварительная обработка снимков (пересчёт из яркостей в коэффициенты отражения) выполнена

средствами модуля Semi-Automatic Classification Plugin в программе Qgis 2.18. Алгоритм выделения наледей реализован в пакете ArcGis с помощью приложения ModelBuilder. Помимо снимков, при расчётах использована цифровая модель рельефа GMTED2010 с пространственным разрешением 250 м, полученная с веб-сервиса Геологической службы США. На основе данной ЦМР построена сеть тальвегов в пределах исследуемого водосбора. Использование сети тальвегов необходимо, так как практически все наледы расположены либо на водотоках, либо в непосредственной близости от них. Предварительный визуальный анализ снимков позволил оценить оптимальную ширину буферной зоны вокруг тальвегов, необходимой для выделения наледей. Она принята равной 1,5 км.

Процесс идентификации наледей по снимкам Landsat проходил в несколько этапов: 1) выделение снежно-ледовых объектов по пороговому значению NDSI равному 0,4; 2) создание маски воды по пороговым значениям нормализованного разностного водного индекса NDWI (порог принят равным 0,3) и коэффициента отражения в ближнем ИК-канале (порог принят равным 0,04); 3) вырезание выделенных снежно-ледовых объектов по границам буферной зоны вокруг тальвегов (шириной 1,5 км); 4) конвертация в векторный формат, расчёт площадей и удаление объектов площадью менее 5 пикселей Landsat (0,45 га).

Предложенный алгоритм позволил успешно выделить наледы по снимку при отсутствии снежного покрова вверху наледи. В конце мая – начале июня многие наледы в горных районах ещё покрыты снегом. Для их выделения использовали снимки с более поздней датой съёмки (полученные в середине июня). В работе [22] предложен новый спектральный индекс MDII для автоматического разделения снежных и ледовых объектов. В настоящей работе реализовать его преимущества не удалось, так как некоторые наледы на момент съёмки были частично покрыты снегом. При наличии снежного покрова уточнение контуров наледей выполнялось вручную, как и удаление покрытых снегом областей, прилегающих к наледям. При оценке числа наледей по спутниковым данным необходимо учитывать, что в процессе таяния часто происходит разделение одной наледи на несколько смежных участков. Такие участки считались частя-

ми одной наледи, если расстояние между ними не превышало 150 м (5 пикселей Landsat) и при этом они были расположены последовательно в пределах одной долины (наледной поляны).

### Результаты и верификация

Наличие данных Кадастра наледей позволяет провести взаимную верификацию исторических и спутниковых данных. Верификация основана на определении соседних (ближайших) объектов между точечным слоем наледей по данным Кадастра и полигональным слоем, полученным по снимкам Landsat. При этом связываемые объекты должны находиться в пределах одного тальвега или наледной поляны. Пороговое расстояние между объектами для их сопоставления не задавалось, так как за период с середины XX в., когда проводились полевые исследования, положение наледей в пределах одной долины могло существенно измениться.

По результатам автоматизированной обработки спутниковых снимков Landsat выделены наледы общей площадью 1253,9 км<sup>2</sup>. В ходе сопоставления с данными Кадастра по снимкам вручную были векторизованы ещё около 100 наледей общей площадью 33,5 км<sup>2</sup>. Пропуски обусловлены главным образом наличием снежного покрова и/или облачности на снимках. При верификации использовалось по 2–3 снимка одной и той же территории, что позволило восстановить пропущенные объекты. Общее число наледей, выделенных по снимкам Landsat в бассейне р. Индигирка, составило 1213, а их суммарная площадь равна 1287,4 км<sup>2</sup>. Таким образом, величину ошибки второго рода (долю пропуска объектов) при автоматизированном выделении наледей можно оценить в 2,7% их общей площади.

Результаты выполненного сопоставления приведены в табл. 1. Всего по снимкам Landsat были идентифицированы 634 наледы из Кадастра. Им соответствует 611 наледей, выявленных по снимкам, т.е. в 23 случаях одной наледи на снимке соответствуют две наледы в Кадастре. Ещё 262 наледы, присутствующие в Кадастре, не удалось идентифицировать по спутниковым данным. В основном это небольшие по площади наледы, которые стаивают уже к середине июня. Однако в это число входит также 43 крупных на-

Таблица 1. Сопоставление данных о наледях по Кадастру (1958 г.) и по снимкам Landsat

Источник данных	Верификация	Число наледей	Площадь, км <sup>2</sup>
Кадастр	Подтверждённые по снимкам	634	1905,0
	Не подтверждённые по снимкам	262	158,6
Снимки Landsat	Подтверждённые по Кадастру	611	1037,0
	Не подтверждённые по Кадастру	602	250,4

леди площадью свыше 1 км<sup>2</sup> (рис. 2, а). Такие расхождения можно объяснить естественной изменчивостью, так как с середины XX в. (когда проводились полевые наблюдения и был создан Кадастр наледей) некоторые наледы могли ис-

чезнуть. Из наледей, установленных по снимкам, в Кадастре присутствует менее половины: 602 наледи (на общей площади 250,4 км<sup>2</sup>), выявленные по снимкам Landsat, не подтверждены по данным Кадастра (см. рис. 2, б). Столь значительное расхождение может быть вызвано несколькими причинами: а) в ряде случаев одной наледи по Кадастру соответствуют две или больше наледей, установленных по снимку; б) для наледей характерна значительная межгодовая изменчивость условий образования, поэтому не исключено образование новых наледей на участках, где они ранее не наблюдались.

Общая площадь наледей, установленная по данным космической съёмки, оказалась в 1,6 раза меньше, чем по данным Кадастра [7]. Такое расхождение можно объяснить тем, что в Кадастре [7] указана площадь не самих наледей,

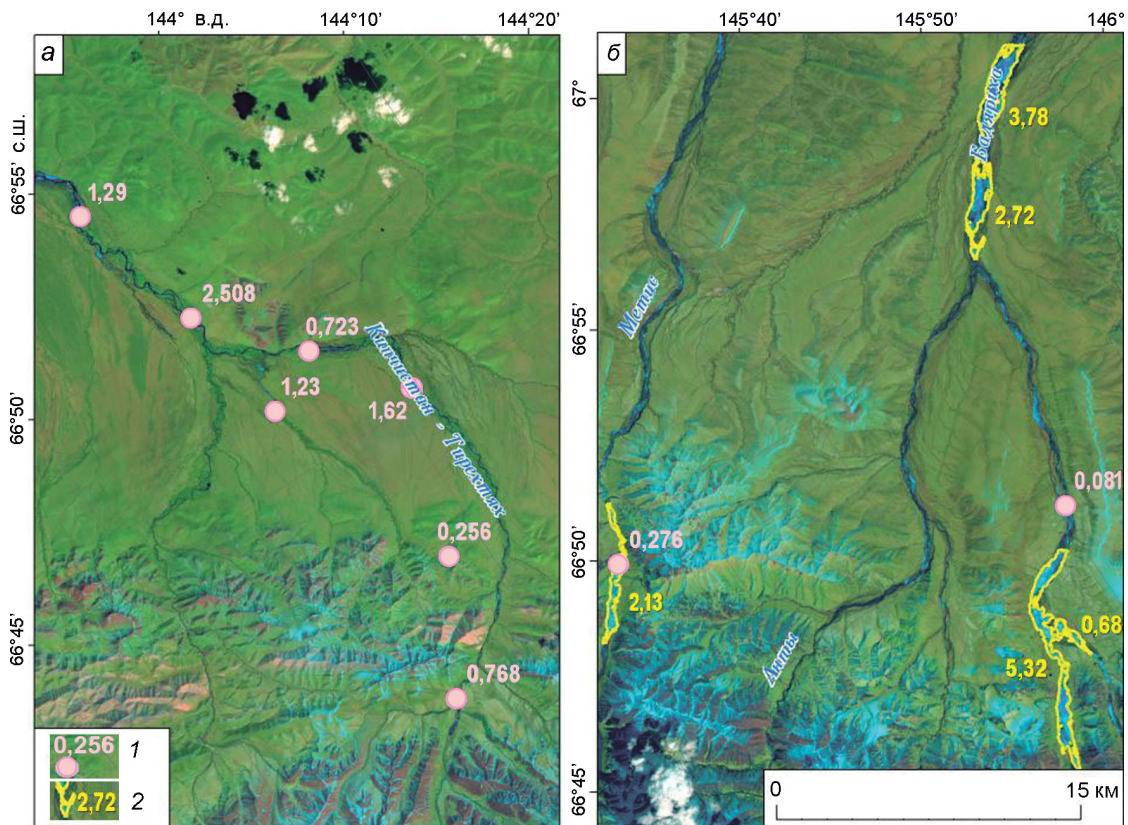
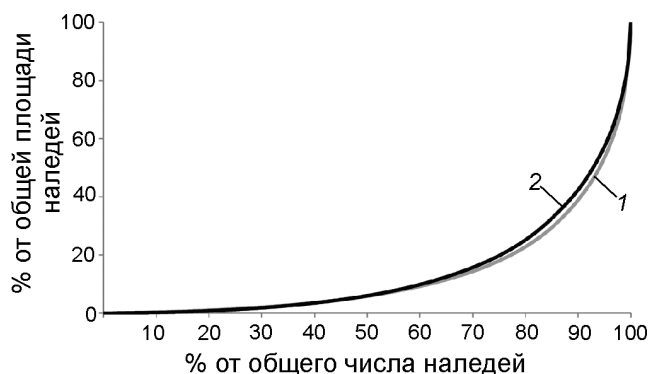


Рис. 2. Расхождения между положением наледей по данным Кадастра и по спутниковым данным: а – отсутствие наледей на снимке при их наличии в Кадастре (снимок Landsat-8 за 18.06.2017 г.); б – отсутствие (или занижение площади) наледей по Кадастру при их наличии на снимке (снимок Landsat-8 за 30.05.2016 г.). 1 и 2 – наледы по данным Кадастра и снимкам Landsat и их площадь (км<sup>2</sup>) соответственно

Fig. 2. The discrepancy between the position of augeises according to the Cadastre and satellite data: а – the absence of augeises in the picture if they are present in the Cadastre (Landsat-8 image for June 18, 2017); б – the lack (or underestimation of the area) of the augeises in the Cadastre, if they are present in the image (Landsat-8 image for May 30, 2016). 1 and 2 – the augeises and their areas (km<sup>2</sup>) by Cadastre and Landsat images respectively



**Рис. 3.** Кривые Лоренца, иллюстрирующие распределение площади наледей по данным Кадастра (1) и по спутниковым данным (2)

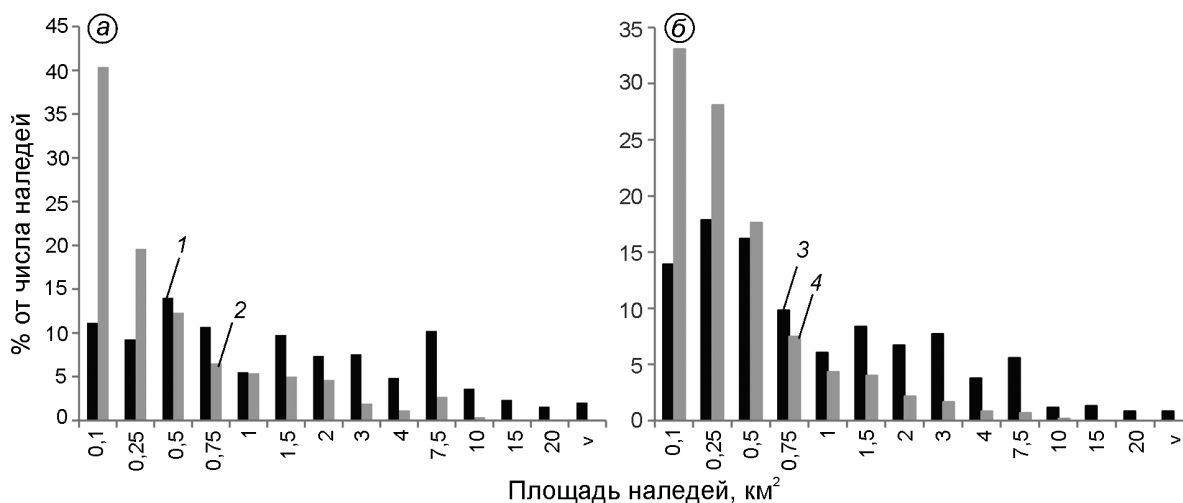
**Fig. 3.** Lorentz curves illustrating the distribution of the area of auefises according to the Cadastre (1) and satellite data (2)

а наледных полян (которая соответствует максимальной площади наледей в течение одного или нескольких сезонов). По спутниковым же данным оценивалась площадь самих наледей, причём в ряде случаев (когда использовались снимки за середину июня) эта площадь была существенно меньше максимально возможной. Вероятно, часть различий спутниковых данных с Каталогом связана с тем, что в Каталоге не учитывались наледи речных вод, которые не имеют ярко выраженных наледных полян.

Распределение площади наледей по данным Кадастра и спутниковым данным проиллюстрировано с помощью кривых Лоренца (рис. 3). Форма кривых в обоих случаях указывает на высокую степень неравномерности, причём неравномерность распределения площадей по данным Landsat оказывается несколько выше, чем по данным Кадастра. На 10% крупнейших наледей по данным Landsat приходится 61,1% их общей площади, а 10% крупнейших наледей по данным Кадастра занимают 57,4% общей площади.

Представляет интерес сопоставление распределения площади наледей, подтверждённых и не подтверждённых в ходе взаимной верификации данных Кадастра и спутниковых снимков. Как следует из рис. 4, а, почти 60% наледей, присутствующих в Кадастре и не подтверждённых по снимкам, имеют площадь до 0,25 км<sup>2</sup>. Среди наледей, подтверждённых по снимкам, таких насчитывается всего около 20% (площадь приведена по Кадастру). Таким образом, не подтверждёнными по снимкам оказались в основном небольшие наледи. В свою очередь, по рис. 4, б также можно отметить, что почти 60% наледей, выявленных по снимкам и не подтверждённых по Кадастру, имеют площадь менее 0,25 км<sup>2</sup> (площадь приведена по снимкам).

**Распределение наледей по высотным зонам.** Рельеф – важнейший фактор, определяющий

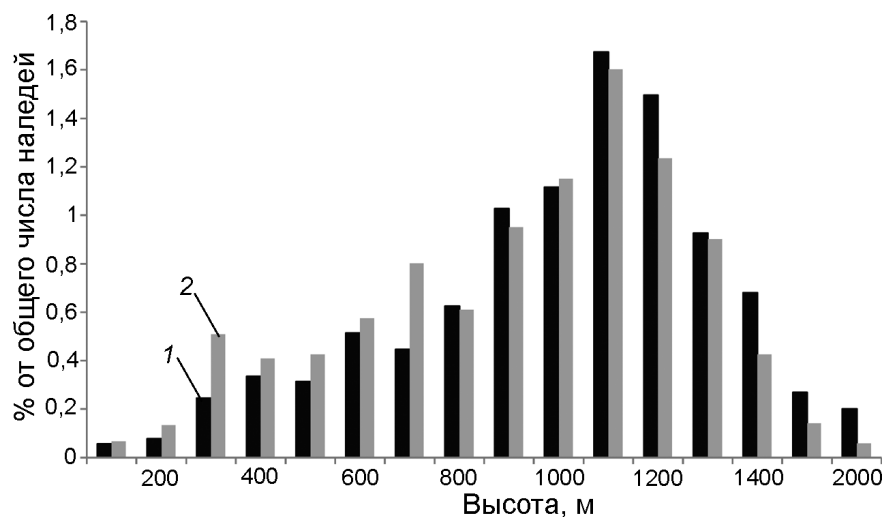


**Рис. 4.** Распределение площадей наледей:

а – по данным Кадастра, подтверждённых и не подтверждённых по снимкам Landsat; б – по снимкам Landsat, подтверждённых и неподтверждённых по Кадастру; 1 и 2 – соответственно подтверждённые и не подтверждённые по Кадастру; 3 и 4 – соответственно подтверждённые и не подтверждённые по снимками Landsat

**Fig. 4.** The distribution of auefises areas:

а – according to the Cadastre, confirmed and unconfirmed by Landsat images; б – Landsat images, confirmed and unconfirmed by Cadastre; 1 and 2 – confirmed and unconfirmed by Cadastre; 3 and 4 – confirmed and unconfirmed by Landsat images



**Рис. 5.** Распределение наледей бассейна р. Индигирка по высотным зонам:

1 – данные Кадастра; 2 – спутниковые данные

**Fig. 5.** Distribution of aufeis at the Indigirka River basin on high-altitude zones:

1 – Cadastre; 2 – satellite images

пространственное распределение наледей. Их распределение по высотным зонам, по данным Кадастра и снимкам Landsat, имеет высокую степень подобия (рис. 5). Больше всего наледей на высотах 1100–1300 м. В нижних высотных зонах (до 800 м) их число, по данным Landsat, оказывается больше, чем по данным Кадастра. Наоборот, на высотах от 1400 до 2000 м по данным Кадастра выделено больше наледей, чем по снимкам. Это можно объяснить тем, что многие наледы, расположенные на значительных высотах, невелики по размерам, поэтому их могли не заметить при анализе спутниковых данных. В период съёмки они могли быть покрыты снегом, что также увеличивало вероятность их пропуска.

#### **Распределение наледей по речным бассейнам.**

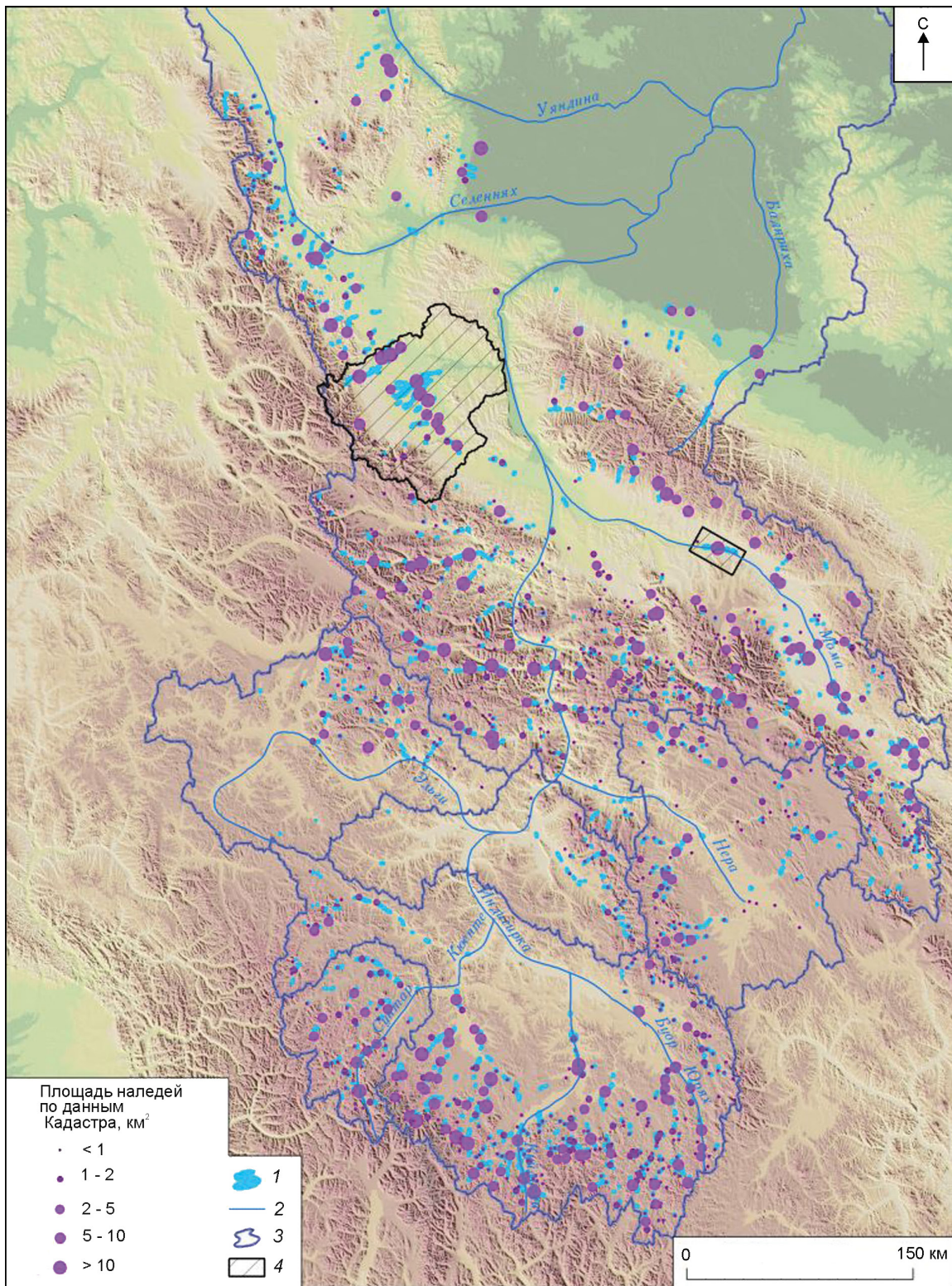
В.В. Шепелев [15] предлагает использовать бассейновый подход к изучению распространения и динамики наледей. В бассейне р. Индигирка выделяется несколько областей с высокой плотностью наледей – в южной части территории (в бассейнах рек Сунтар и Куйдусун), а также в центральной части бассейна на склонах хр. Черского (рис. 6). Самые крупные наледы по спутниковым данным выявлены в бассейне р. Сюрюктях на северо-восточном склоне хр. Черского. В то же время наледы практически не встречаются в самой северной, равнинной части водосбора р. Индигирка. Из рассмотренных речных бассейнов наибольшей наледностью отличается бассейн верхнего течения р. Индигирка до пос. Юрты (табл. 2). Зависимость между средней высотой бассейна и наледностью статистически значима, но менее выражена, чем

можно было бы ожидать. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между средней высотой бассейна и наледностью составляет 0,71 и 0,77 при оценке наледности по данным Кадастра и спутниковым снимкам соответственно.

**Межгодовая изменчивость площади наледей.** Оценка межгодовой изменчивости площади наледей выполнена на примере двух объектов: Большой Момской наледи, расположенной в русле р. Мома (площадь по данным Кадастра составляет 82 км<sup>2</sup>), а также группы крупных наледей в бассейне левого притока Индигирки – р. Сюрюктях (общая их площадь по данным Кадастра достигает 287,8 км<sup>2</sup>). Для проведения такой оценки получены безоблачные снимки со спутников Landsat-5 (TM), Landsat-7 (ETM+) и Landsat-8 (OLI) с датами съёмки между 1 мая и 30 июня. В архивах USGS на рассматриваемую территорию отсутствуют снимки со спутника Landsat-5 за период с 1984 по 2007 г. Это ограничивает продолжительность спутниковых наблюдений за наледями периодом с 1999 г. (когда был запущен спутник Landsat-7). Получение репрезентативных данных затрудняет также наличие облачности. Перечень дат снимков и полученные значения площади наледей приведены в табл. 3.

Оценивая межгодовые изменения площади рассматриваемых наледей, необходимо иметь в виду, что они расположены на небольших высотах: Большая Момская наледь – на высоте от 430 до 500 м, наледы в бассейне р. Сюрюктях – на высоте от 200 до 500 м. Это способствует их сравнительно раннему и интенсивному таянию весной. Максимальной площади наледи дости-





**Рис. 6.** Наледи в бассейне р. Индигирка по данным Кадастра и космическим снимкам Landsat: 1 – наледи по данным Landsat; 2 – речная сеть; 3 – бассейны рек; 4 – участки, по которым оценивалась межгодовая изменчивость площади наледей

**Fig. 6.** Auefises at the Indigirka River basin according to Cadastre data and Landsat images: 1 – auefises from Landsat images; 2 – river network; 3 – borders of river basins; 4 – the areas where the interannual variability of the auefises area was carried out

Таблица 2. Наледность частных водосборов бассейна р. Индигирка

Бассейн реки – створ	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средняя абсолютная высота водосбора, м	Наледность по Кадастру, %	Наледность по снимкам Landsat, %
Р. Сунтар – устье р. Сахарынья	7680	1460	0,97	0,78
Р. Эльги – 5,0 км выше устья р. Артык-Юрях	17 600	1104	0,49	0,23
Р. Индигирка – ГМС Юрты	51 100	1256	1,15	0,80
Р. Индигирка – пос. Индигирский	83 500	1185	0,82	0,56
Р. Нера – пос. Ала-Чубук	22 300	1174	0,32	0,26
Р. Индигирка – пос. Воронцово	305 000	803	0,68	0,41

Таблица 3. Площади наледей по снимкам Landsat

Дата съёмки	Площадь наледи, км <sup>2</sup>
<i>Большая Момская наледь</i>	
17.06.2002	29,2
08.05.2005	66,2
27.05.2006	57,9
19.06.2009	39,5
25.05.2011	61,7
27.05.2012	49,6
15.05.2013	48,1
18.06.2017	21,9
<i>Группа наледей в бассейне р. Сюрюктях</i>	
26.06.2001	69,7
29.06.2002	100,6
04.06.2007	155,1
17.06.2009	89,5
22.06.2011	117,5
21.05.2014	268
18.06.2015	164,8
04.06.2016	206,4

гают к началу мая. По имеющимся снимкам сделать однозначный вывод о росте или уменьшении площади наледей невозможно, поскольку даты съёмки от года к году существенно различаются. Тем не менее, по полученным данным можно сделать некоторые частные выводы.

1. За рассматриваемый период Большая Момская наледь ни разу не достигала площади, указанной в Кадастре (82 км<sup>2</sup>), в том числе по снимку, полученному в первой декаде мая 2005 г., когда процесс таяния наледи ещё не начинался. При сравнении двух снимков, полученных в сопоставимых условиях (8 мая 2005 г. и 15 мая 2013 г.), установлено, что площадь наледи в 2013 г. оказалась меньше на 18,1 км<sup>2</sup>. Всё это может указывать на тенденцию к снижению площади Большой Момской наледи в последние годы.

2. Площадь крупнейшей наледи в бассейне р. Сюрюктях в мае 2014 г. достигала 78,0 км<sup>2</sup>, что на 8 км<sup>2</sup> больше, чем по данным Кадастра. Отметим, что максимальные площади наледей в бассейне р. Сюрюктях установлены по снимкам, полученным в конце рассматриваемого периода (2014–2017 гг.), в том числе в середине июня (18 июня 2015 г.). Это позволяет предположить, что в данном бассейне в последние годы площадь наледей не уменьшается.

### Заключение

Настоящее исследование – первый этап проекта по созданию электронного Каталога наледей Северо-Востока России, который предусматривал выполнение следующих работ: 1) на основе использования данных Кадастра [7] и топографических карт создать базу данных о наледях в бассейне р. Индигирка (до створа ГМС Воронцово, площадь 305 тыс. км<sup>2</sup>), в которую вошли сведения о 896 наледях; 2) идентифицировать наледи по данным космической съёмки Landsat за период 2013–2017 гг. (установлены 1213 наледей с суммарной площадью 1287,4 км<sup>2</sup>); 3) объединить исторические данные Кадастра [7] и результаты выявления наледей по данным космической съёмки в единый электронный Каталог наледей в бассейне р. Индигирка, ныне он доступен на <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.891036> [16].

К важнейшим результатам относится создание актуальной базы данных о наледях в бассейне р. Индигирка, а также выполненное сопоставление данных космической съёмки с историческими данными для двух крупных наледей. Установлено, что современная площадь наледей в 1,6 раза меньше, чем по данным Ка-

дастра [7], но в Кадастре отсутствуют сведения более чем о 600 наледях, обнаруженных по снимкам. Это указывает, с одной стороны, на неполноту данных Кадастра, а с другой – на существенное изменение условий образования наледей за последние 50 лет.

В результате выполненных работ расширена база данных о наледях на территорию Северо-

Востока России и установлено, насколько их изменения обусловлены климатом и как они влияют на речной сток.

**Благодарность.** Авторы благодарны М.Л. Маркову за конструктивные комментарии и замечания.

**Acknowledgements.** The authors are grateful to M.L. Markov for constructive comments and suggestions.

## Литература

1. Наледи Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1981. 244 с.
2. Симаков А.С., Шильниковская З.Г. Карта наледей Северо-Востока СССР. Краткая объяснительная записка. Магадан: Северо-Восточное геологическое управление Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров РСФСР, 1958. 40 с.
3. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 190 с.
4. Алексеев В.Р. Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 73–92. doi: 10.15356/2076-6734-2016-1-73-92.
5. Гаврилова М.К. Изменение современного климата области «вечной мерзлоты» в Азии // Обзор состояния и тенденций изменения климата Якутии. Якутск: изд. СО РАН, 2003. С. 13–18.
6. Поморцев О.А., Кашкаров Е.П., Попов В.Ф. Наледи: глобальное потепление климата и процессы наледообразования (Ритмическая основа долгосрочного прогноза) // Вестн. Якутского гос. ун-та. 2010. Т. 7. № 2. С. 40–48.
7. Кадастр к карте наледей Северо-Востока СССР масштаба 1:2 000 000 / Сост. З.Г. Шильниковская. Магадан: Центральная комплексная тематическая экспедиция Северо-Восточного геологического управления, 1958. 398 с.
8. Карта наледей Северо-Востока СССР масштаба 1:2 000 000 / Сост. А.С. Симаков, З.Г. Шильниковская. Магадан: Северо-Восточное геологическое управление Главного управления геологии и охраны недр при Совете Министров РСФСР. Центральная комплексная тематическая экспедиция, 1958.
9. Каталог наледей зоны БАМ: Вып. 1. Наледи верхней части бассейна р. Чары. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 62 с.
10. Каталог наледей зоны БАМ: Вып. 3. Наледи бассейна р. Муя. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 84 с.
11. Каталог наледей зоны БАМ: Вып. 2. Наледи бассейна р. Верхней Ангары. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 95 с.

## References

1. *Naledi Sibiri i Dal'nego Vostoka*. Naledi of Siberia and the Far East. Novosibirsk: Nauka, 1981: 244 p. [In Russian].
2. *Simakov A.S., Shilnikovskaya Z.G. Karta naledey Severo-Vostoka SSSR. Kratkaya obyasnitel'naya zapiska*. The map of naleds of the North-East USSR. Brief explanatory note. Magadan: North-Eastern Geological Administration of the Main Directorate of Geology and Subsoil Resources Protection under the Council of Ministers of the RSFSR, 1958: 40 p. [In Russian].
3. *Sokolov B.L. Naledi i rechnoy stok*. Naleds and river runoff. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975: 190 p. [In Russian].
4. *Alekseev V.R. Long-term variability of the spring taryn-aufeises. Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (1): 73–92. doi: 10.15356/2076-6734-2016-1-73-92. [In Russian].
5. *Gavrilova M.K. Changes in the current climate in the permafrost region in Asia. Obzor sostoyaniya i tendency izmeneniya klimata Yakutii*. Overview of the state and trends of climate change in Yakutia. Yakutsk: Siberian Branch of RAS, 2003: 13–18. [In Russian].
6. *Pomortsev O.A., Kashkarov E.P., Popov V.F. Naledi: global warming of the climate and processes of ice formation (Rhythmic basis of the long-term forecast). Vestnik Yakutskogo gos. Universiteta*. Herald of the Yakutsk State University. 2010, 7 (2): 40–48 [In Russian].
7. *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. Central complex thematic expedition of the North-Eastern geological department. Magadan, 1958: 398 p. [In Russian].
8. *Karta naledey Severo-Vostoka SSSR Masshtaba 1:2 000 000*. Map of the ice-creams of the North-East of the USSR Scale 1: 2 000 000. North-Eastern Geological Administration of the Main Directorate of Geology and Subsoil Protection under the Council of Ministers of the RSFSR. Central complex thematic expedition. Magadan, 1958. [In Russian].
9. *Katalog naledey zony BAM*. Inventory of the icings at the BAM zone. Is. 1. The icings on the upper part of the Chara River basin. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 62 p. [In Russian].
10. *Katalog naledey zony BAM*. Inventory of the icings at the BAM zone. Is. 3. The icings of the Moya River basin. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981: 84 p. [In Russian].

12. Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2017. 320 с.
13. 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, 2005. U.S.A. doi: 10.7265/N5V98602.
14. Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 31 августа 2017 г.).
15. Шепелев В.В. О преимуществах бассейнового подхода при изучении закономерностей распространения наледей // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 381–386. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-381-386.
16. Makarieva O., Shikhov A., Ostashov A., Nesterova N. Aufeises (naleds) of the North-East of Russia: GIS catalogue for the Indigirka River basin (Russia). PANGAEA, 2018. <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.891036>.
17. Иванова Р.Н. Рекордно низкие температуры воздуха в Евразии // Вестн. Сев.-Вост. федерального ун-та им. М.К. Аммосова. 2006. Т. 3. № 1. С. 13–19.
18. Объяснительная записка к геокриологической карте СССР масштаба 1:2 500 000 / Сост. К.А. Кондратьева, Е.Н. Дунаева, Н.И. Труш, А.В. Гаврилов, Е.В. Афанасьенко, С.Ф. Хруцкий, Э.Д. Ершов. М.: Министерство геологии СССР, ПГО Гидроспещгеология, 1991. 126 с.
19. Толстикин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.
20. Топографические карты Советского генштаба (Soviet military topographic maps). <https://maps.vlasenko.net>.
21. 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.
22. Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada // Journ. of Geophys. Research. Earth Surface. 2015. V. 120. P. 1670–1686.
23. Сервер Геологической службы США. <http://earthexplorer.usgs.gov>.
11. Katalog naledey zony BAM. Inventory of the icings at the BAM zone. Is. 2. The icings of the Upper Angara River basin. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982: 95 p. [In Russian].
12. Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V. Naledi zony BAM: Ekspeditsionnye issledovaniya. Icing fields of the BAM zone: field studies expeditionary investigations. St. Petersburg: Nestor-History, 2017: 320 p. [In Russian].
13. 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, U.S.A. 2005. doi: 10.7265/N5V98602.
14. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii «Sotsial'no-ekonomicheskoe razvitiye Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii» The State Program of the Russian Federation «Social and Economic Development of the Arctic Zone of the Russian Federation», approved by Resolution of the Government of the Russian Federation of April 21, 2014, 366 (as amended by the Resolution of the Government of the Russian Federation of August 31, 2017). [In Russian].
15. Shepelev V.V. Advantages of the basin approach for investigations of aufeises (naleds). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 381–386. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-381-386. [In Russian].
16. Makarieva O., Shikhov A., Ostashov A., Nesterova N. Aufeises (naleds) of the North-East of Russia: GIS catalogue for the Indigirka River basin (Russia). 2018. PANGAEA, <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.891036>.
17. Ivanova R.N. Record low air temperatures in Eurasia. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova*. Bulletin of the Ammosov North-Eastern Federal University. 2006, 3 (1): 13–19. [In Russian]
18. Obyasnitel'naya zapiska k geokriologicheskoy karte SSSR masshtaba 1:2 500 000 Explanatory note to the geocryological map of the USSR, scale 1: 2 500 000. Moscow: Ministry of Geology of the USSR, PGO Hydrospeetsgeology, 1991: 125 p. [In Russian].
19. Tolstikhin O.N. Naledi i podzemnyye vody Severo-Vostoka SSSR Naleds and underground waters of the Northeast of the USSR. Novosibirsk: Nauka, 1974: 164 p. [In Russian].
20. Soviet military topographic maps. <https://maps.vlasenko.net>.
21. 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.
22. Morse P.D., Wolfe S.A. Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada. *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2015, 120: 1670–1686.
23. US Geological Survey Server. <http://earthexplorer.usgs.gov>.