

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345; 551.343.74; 556.3

DOI: 10.15372/KZ20230603

EDN: IOQDLT

ГИГАНТСКИЕ НАЛЕДИ-ТАРЫНЫ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ
ПО ДАННЫМ КАДАСТРА (1958 г.) И КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ 1973–2021 гг.О.М. Макарьева^{1,2,*}, А.Н. Шихов^{1,3}, А.А. Землянскова^{1,2}, В.Р. Алексеев⁴,
Н.В. Нестерова^{1,5}, А.А. Осташов^{1,5}¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, Россия² Северо-Восточный государственный университет, 685000, Магадан, ул. Портовая, 13, Россия³ Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, Пермь, ул. Букирева, 15, Россия⁴ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия⁵ Государственный гидрологический институт, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23, Россия

*Автор для контакта; e-mail: o.makareva@spbu.ru, omakarieva@yandex.ru

Приведены сведения о фактической максимальной площади (не менее 10 км²) 71 крупнейшей наледи-тарына Северо-Востока России по результатам дешифрирования космических снимков Landsat в 2013–2018 гг. (661 км²) и Sentinel-2 в 2020–2021 гг. (838 км²). Суммарная площадь наледей оказалась не менее чем в 2 раза ниже суммарной площади наледных полей, указанной в Кадастре наледей Северо-Востока (1958 г.) (1680 км²). Для 42 объектов по данным Landsat/MSS также получены данные о площади за 1973–1975 гг. (до начала периода потепления климата). Суммарная величина составила 555 км², что близко к современным оценкам за 2020–2021 гг. (581 км²) и в среднем в 1.9 раза меньше суммарной площади по данным кадастра (1083 км²). Несмотря на то что отдельные гигантские наледы проявляют очень высокую межгодовую изменчивость, их площадь год от года может меняться до 2 раз (на 100 %), в среднем для большинства наледей эта величина составляет около 20 %. На многочисленных примерах установлено несоответствие контуров наледных полей и границ ледяных массивов. Суммарная площадь наледных полей, как указанных в Кадастре 1958 г., так и выделенная на основе современных космоснимков, значительно превышает фактическую площадь распространения наледей. Оценка площади наледей (даже максимальных в многолетнем периоде) по размерам наледных полей может приводить к значительным ошибкам в расчетах динамических запасов наледобразующих подземных вод и других характеристик. После 1973–1975 гг. кардинального изменения характеристик наледности Северо-Востока не зафиксировано. Необходимы дальнейшие натурные исследования гигантских наледей для выявления причин их изменчивости, в том числе постановки долгосрочных режимных наблюдений на специальных наледных полигонах.

Ключевые слова: гигантские наледы-тарыны, снимки Landsat, кадастр наледей, наледная поляна, Северо-Восток России.

Ссылка для цитирования: Макарьева О.М., Шихов А.Н., Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Нестерова Н.В., Осташов А.А. Гигантские наледы-тарыны Северо-Востока России по данным Кадастра (1958 г.) и космическим снимкам 1973–2021 гг. // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 6, с. 27–39. DOI: 10.15372/KZ20230603. EDN: IOQDLT.

GIANT AUFEIS-TARYN IN THE NORTHEAST OF RUSSIA ACCORDING
TO THE CADASTER (1958) AND SATELLITE IMAGES OF 1973–2021О.М. Makarieva^{1,2,*}, A.N. Shikhov^{1,3}, A.A. Zemlianskova^{1,2}, V.R. Alexeev⁴, N.V. Nesterova^{1,5}, A.A. Ostashov^{1,5}¹ St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Universitetskaya nab. 7-9, St. Petersburg, 199034 Russia² North-Eastern State University, Portovaya St. 13, Magadan, 685000 Russia³ Perm State University, Bukireva St. 15, Perm, 614068 Russia⁴ Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia⁵ State Hydrological Institute, 2nd line 23, St. Petersburg, 199053 Russia

*Corresponding author; e-mail: o.makareva@spbu.ru, omakarieva@yandex.ru

Data on the actual maximum area of 71 largest aufeis-taryn in the North-East of Russia (with an area of at least 10 км²) based on the results of interpretation of Landsat satellite images in 2013–2018 (661 км²) and Sentinel-2 in 2020–2021 (838 км²) is presented. The total area of aufeis fields turned out to be at least 2 times

lower than the total area of aufeis glades indicated in the Cadaster of aufeis of the North-East (1958) (1680 km²). For 42 objects the area for 1973–1975 were also obtained according to Landsat/MSS data (before the beginning of the warming period). The total value was 555 km², which is close to modern estimates for 2020–2021 (581 km²), and on average, 1.9 times lower than their total area according to the Cadastre (1958) (1083 km²). Despite the fact that individual giant aufeis show very high interannual variability, their area can change up to two times from year to year (100 %), on average for most aufeis fields this value is about 20 %. On numerous examples, a discrepancy between the contours of aufeis glades and the boundaries of aufeis fields was established. The total area of aufeis glades, both indicated in the Cadaster (1958) and identified on the basis of modern space images, significantly exceeds the actual area of aufeis. Estimating the area of aufeis (even the maximum in a long-term period) by the size of aufeis glades can lead to significant errors in the calculation of the dynamic reserves of aufeis groundwater and other characteristics. In the period after 1973–1975 significant change of total aufeis area in the North-East were not identified. Further field studies of giant aufeis are important to identify the causes of their variability, including the establishment of long-term regime observations at special aufeis research plots.

Keywords: *giant aufeis-taryn, Landsat images, Cadaster (1958), aufeis glade, North-East of Russia.*

ВВЕДЕНИЕ

Северо-Восток России характеризуется широким распространением гигантских наледей, площадь некоторых из них достигает нескольких десятков квадратных километров [Атлас..., 2021]. Наиболее крупные наледи встречаются в бассейне р. Индигирки. Широко известна Большая Момская наледь, площадь которой в период максимального развития, по историческим сведениям, достигала 82 км². Ранее она считалась самой большой в мире [Шепелев, 1972].

Первую систематизацию гигантских наледей Северо-Востока России выполнили геологи А.С. Симаков и З.Г. Шильниковская на основе анализа результатов аэрофотосъемок 1940–1950-х гг. [Симаков, Шильниковская, 1958]. Составленные ими кадастр и карта наледей (далее – Кадастр) содержат сведения о местоположении и размерах ледяных полей площадью не менее 0.01 км². Размеры наледей определялись посредством дешифрирования черно-белых фотоснимков, выполненных после схода устойчивого снежного покрова по выделенным контурам наледных полей.

Еще А.С. Кузнецов [1962] писал о том, что сведения из Кадастра следует использовать с осторожностью. На аэрофотоснимках верховьев бассейна р. Колымы за 1956–1959 гг. он не обнаружил ряда наледей, указанных в Кадастре, а также зафиксировал более 2000 “новых” наледей, не учтенных предыдущими исследователями. Причиной таких расхождений А.С. Кузнецов назвал несовершенство методики составления карты наледей по дешифрированию аэрофотоснимков летнего периода, а также тот факт, что не все наледи действуют ежегодно. А.С. Кузнецов также указал, что крупные наледи отмечаются на определенных участках ежегодно.

Материалы Кадастра использованы многими учеными для формирования представлений о геокриологических условиях, естественных ресурсах подземных вод криолитозоны Северо-Востока России, взаимосвязи подземных и поверхностных

вод в регионе [Толстихин, 1974; Соколов, 1975; Корейша, 1986]. До сих пор основополагающими научными работами по оценке ресурсов подземных вод Северо-Востока России являются исследования О.Н. Толстихина [1974]. Оценка ресурсов подземных вод выполнена расчетными методами с использованием данных о площади и соответствующих им объемах наледей. Основная расчетная характеристика – площадь наледи в период максимального развития – принималась равной площади наледной поляны по материалам А.С. Симакова и З.Г. Шильниковской [1958]. По расчетам О.Н. Толстихина, в наледях Северо-Востока России ежегодно фиксируется 26.2 км³ подземных вод, что составляет 36.5 % естественных ресурсов подземных вод зоны свободного водообмена. Эти же сведения приведены в монографиях [Гидрогеология СССР, 1970, 1972].

В 2019 г. выполнено обновление данных о гигантских наледях бассейна р. Индигирки на основе дешифрирования снимков Landsat за 2013–2017 гг. [Макарьева и др., 2019]. Картографические работы были продолжены в пределах других бассейнов рек, в результате опубликован Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России [Атлас..., 2021; Макарьева и др., 2022; Алексеев и др., 2023], а также разработаны четыре базы данных, содержащие информацию о местоположении и характеристиках наледей в современных гидроклиматических условиях [Свидетельство..., 2021a–z].

Сравнение данных о площади наледей в бассейнах крупных рек Северо-Востока России (Яна, Индигирка, Колыма, Пенжина) и на Чукотском полуострове выявило, что современное количество наледей в 1.3–1.5 раза больше, чем указано ранее в Кадастре, а общая максимальная площадь наледей в 1.6–2.4 раза меньше площади наледных полей Кадастра в зависимости от бассейна реки. Наибольшее расхождение между данными Кадастра и современными материалами характерно для Чукотского полуострова [Атлас..., 2021]. По

оценкам [Атлас..., 2021], наледные ресурсы бассейнов рек Яна, Индигирка, Колыма, Пенжина и Чукотского полуострова (без учета наледей в бассейнах Лены и рек Охотского моря) составляют 10.6 км³.

За всю историю исследования наледей поднимались вопросы, связанные с изучением их как мерзлотно-гидрогеологических явлений [Романовский, 1973], регуляторов речного и подземного стока [Соколов, 1975; Макариева et al., 2022], связи с тектоническими разломами и таликами [Романовский, 1983].

Существенные различия в оценках наледности, динамических запасов наледообразующих подземных вод и других характеристик требуют рассмотрения следующих фундаментальных вопросов.

1. Уменьшилась ли фактическая площадь наледей Северо-Востока с периода их первой каталогизации на основе материалов 40–50-х гг. прошлого века в связи с изменением мерзлотно-гидрогеологических условий? Какая вариация характеристик наледности может быть отнесена к межгодовой изменчивости, а в каких случаях можно определенно говорить о затухании наледных процессов?

2. Является ли площадь наледной поляны адекватным индикатором фактической площади наледи, а в расчетах ресурсов подземных вод – ее объема?

Несмотря на наличие периодов повышенного или более умеренного наледообразования, незначительные по амплитуде колебания климата не влияют на морфометрические параметры крупных наледей, в то время как более мелкие наледи реагируют даже на изменение одного метеорологического параметра, меняя свое положение, размер, исчезая и появляясь в разные годы [Атлас..., 1997]. Поэтому целью данной работы стала оценка межгодовой изменчивости площади наиболее крупных наледей (размером не менее 10 км²), выделенной по космоснимкам за период с 1973 по 2021 г., а также сравнение фактической площади наледей с площадью наледных полей по материалам Кадастра [Симаков, Шильниковская, 1958] и космическим снимкам. Исследования многолетней и внутригодовой изменчивости наледей проводились многими авторами [Шепелев, 1972; Романовский, 1983; Алексеев, 2016; Zemlianskova et al., 2023], но дать однозначное описание реакции наледей на изменения климата пока не удалось [Поморцев и др., 2010].

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа использовались данные Кадастра, космические снимки Landsat за период с 1973 по 2018 г. и Sentinel-2 за 2020–2021 гг. Вы-

деление контуров наледей по снимкам Landsat и Sentinel-2 производилось по пороговым значениям нормализованного разностного снежного индекса (normalized difference snow index, NDSI), принятым ранее [Макариева и др., 2019]. Фактическая площадь льда на дату снимка за конкретный с 2013 по 2018 год корректировалась до максимальной величины по методу Б.Л. Соколова [1975]. По снимкам Landsat/MSS за 1973–1975 гг. положение ледяных полей определялось на основе их высокой яркости в красном канале спектра. Расчет NDSI по этим снимкам невозможен вследствие отсутствия среднего инфракрасного канала.

С целью выявления возможных различий определения площади наледей с помощью NDSI и по порогу яркости в красном канале для 10 случайно выбранных наледей площадь была определена обоими методами. В среднем площадь наледей, определенная по порогу яркости в красном канале, оказалась на 2.1 % меньше площади, полученной с применением NDSI, а расхождение для отдельных наледей составило от –10.2 до +5.4 % их площади. Таким образом, оценку площади наледей разными методами можно считать сопоставимой (хотя при использовании снимков MSS дополнительная погрешность может возникать за счет их более низкого пространственного разрешения).

В отличие от выделения по снимкам площади наледного льда, выделение наледных полей не лишено субъективности и сложно поддается автоматизации [Марков и др., 2016]. Основным признаком наледной поляны на снимках Landsat и Sentinel-2 является разветвление русла на множество протоков, обусловленное переработкой речной поймы наледью. Другие признаки имеют меньшее значение и зависят от сезона съемки. В рамках настоящей работы по снимкам Sentinel-2, полученным в середине летнего сезона и представленным в спектральном синтезе “средний ИК – ближний ИК – красный”, были оцифрованы вручную контуры 27 наледных полей. Были выбраны наледи, площадь которых по данным Кадастра превышает современную площадь льда, выявленную по спутниковым снимкам. Границы наледных полей были выделены по характерным признакам на снимке, основными из которых являются разветвление русла реки на множество мелких протоков, а также слабое развитие растительности в сравнении с прилегающей территорией.

Общий период космосъемок был разбит на три временные группы: 1) 1973–1975 гг., 2) 2013–2018 гг., 3) 2020–2021 гг. Для каждой наледи разница дат между снимками второй и третьей временной группы составляет не менее трех лет. Выбирались наиболее ранние весенние даты снимков (14 мая – 7 июня в 1973–1975 гг., 18 мая – 19 июня в 2013–2018 гг., 12 мая – 8 июня в 2020–2021 гг.).

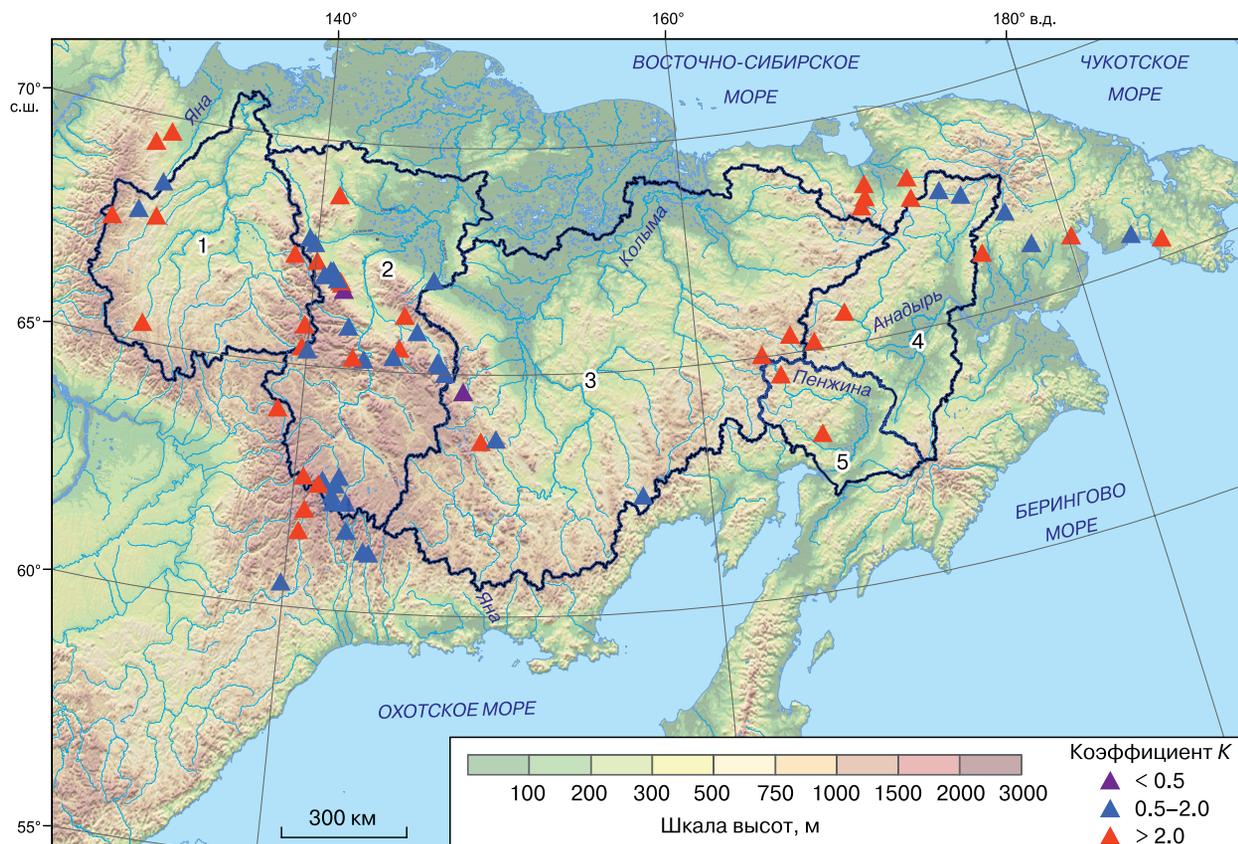


Рис. 1. Схема расположения гигантских наледей-тарынов площадью более 10 км².

Бассейны рек: 1 – Яна, 2 – Индигирка, 3 – Колыма, 4 – Анадырь, 5 – Пенжина.

Использование в анализе данных снимков за три периода позволило значительно уменьшить неопределенность, обусловленную межгодовой изменчивостью площади отдельных наледей.

Всего рассмотрено 72 наледи (рис. 1). Их выбор определялся по двум источникам – Кадастру и космоснимкам Landsat и Sentinel-2. Поэтому в число рассматриваемых наледей попали те, которые имеют площадь льда по космоснимкам или наледной поляны по Кадастру не менее 10 км². По данным Кадастра, площадь рассматриваемых наледей составляла 1707 км² (16 % от общей площади 10 444 км² и 1 % от общего количества 7448 наледей, информация о которых приведена в Кадастре), максимальные и минимальные величины (по данным Кадастра) составили 82 и 3.84 км² соответственно. За первый период (1973–1975) получены данные только для 42 наледей из 72. В некоторые периоды данные для отдельных наледей отсутствовали (из-за облачности на снимках). Одна из наледей, по данным Кадастра формирующаяся на Чукотском полуострове (25.7 км²), не была идентифицирована ни на одном из космоснимков.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 2 представлены результаты сравнения данных о размерах самых крупных наледей в регионе по четырем периодам измерений. Площадь каждого из ледяных массивов показана различными цветами, соответствующими источникам данных, последовательно в порядке убывания площади наледных полей по данным Кадастра. На рис. 2 видно, что для большей части наледей площадь наледных полей, указанных в Кадастре, значительно превышает площади ледяных массивов, измеренных в более поздние периоды, при этом оценка площади наледей по снимкам за 1973–1975 гг. практически совпадает с современными материалами 2020–2021 гг.

Наледи (см. рис. 1) разбиты на три группы в зависимости от отношения площади, указанной в Кадастре, к средней площади, определенной по снимкам за два или три временных промежутка (K) (рис. 3). Красными треугольниками отмечены 35 наледей, площадь которых по снимкам Landsat (1973–2021 гг.) как минимум в 2 раза меньше величин, указанных в Кадастре, т. е. $K > 2$, из них 21 наледь характеризуется коэффициентом $K < 2$

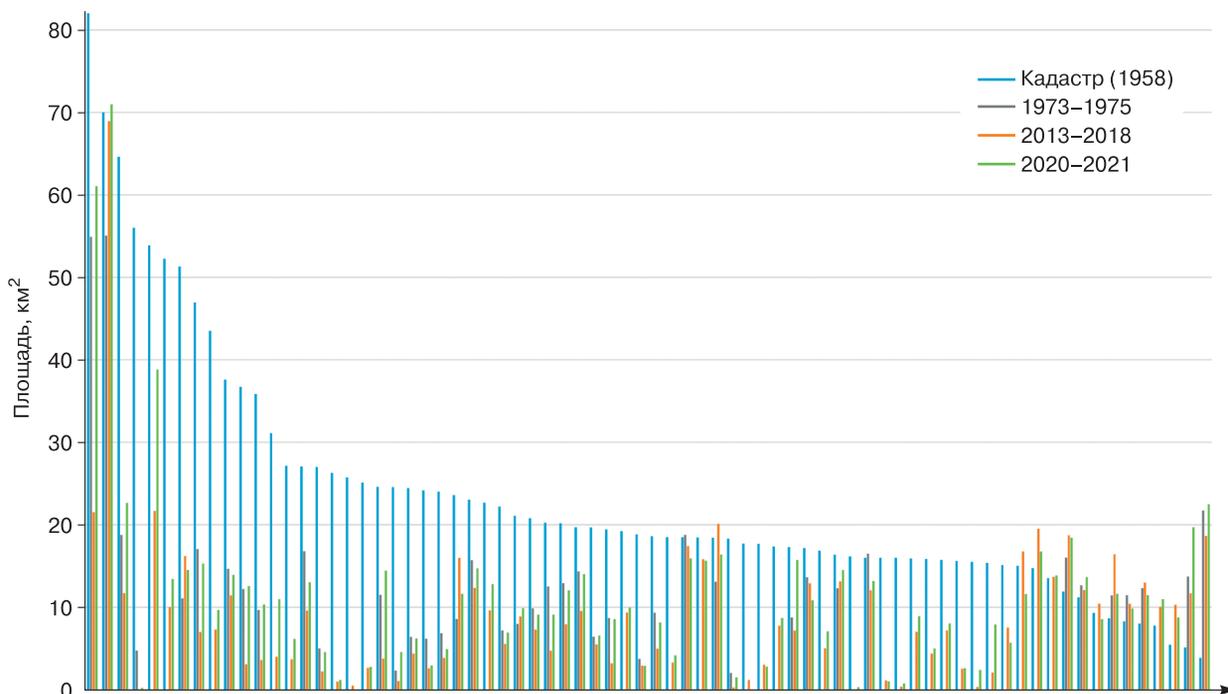


Рис. 2. Соотношение площадей наледных полей по данным Кадастра (1958 г.) и площадей гигантских наледей-тарынов по снимкам Landsat/Sentinel-2 за 1973–2021 гг.

Ось абсцисс: наледы приведены в порядке убывания площади по данным Кадастра.

и $K < 5$, а еще 14 наледей – значением $5 < K < 25$. Фиолетовым цветом маркированы две наледы, площадь которых была значительно недооценена по данным Кадастра, $K < 0.5$. Голубые значки

идентифицируют 34 наледы, размеры которых различаются менее чем в 2 раза ($0.5 < K < 2$), колебания площади этих наледей условно можно отнести к межгодовой изменчивости.

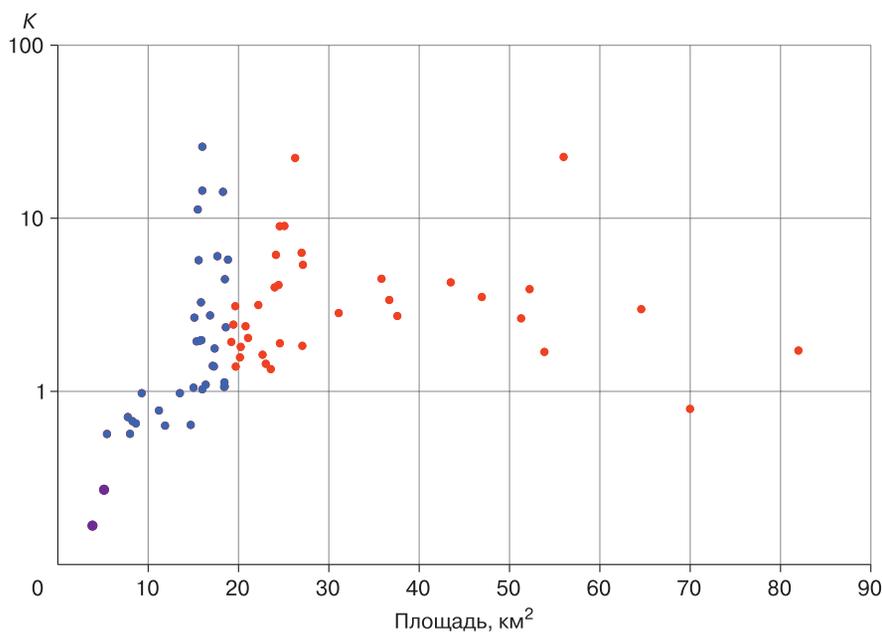


Рис. 3. Распределение коэффициента K относительно площади, указанной в Кадастре (1958 г.).

Цвета соответствуют рис. 1.

Таблица 1. Суммарные площади наледных полей по данным Кадастра [Симаков, Шильниковская, 1958] и наледей по снимкам Landsat и Sentinel-2

Кол-во наледей	Площадь наледи, км ²			
	Кадастр 1958 г.	1973–1975 гг.	2013–2018 гг.	2020–2021 гг.
72	1706	–	–	–
<i>Наледи, выявленные по снимкам</i>				
71	1680	–	661	838
<i>Наледи, для которых доступны снимки за 1973–1975 гг.</i>				
42	1083	555	444	581

Общая площадь 71 наледи, по [Симаков, Шильниковская, 1958], составила 1680 км², по снимкам 2013–2018 гг. – 661 км², а в 2020–2021 гг. – 838 км² (табл. 1). Таким образом, отношение общей фактической площади наиболее крупных наледей в сравнении с данными Кадастра о площади наледных полей равно 1.9–2.5 раза. Эта величина близка к оценкам, полученным для всей совокупности наледей-тарынов Северо-Востока различного размера, приведенным в [Атлас..., 2021].

Из 66 наледей, площадь которых по данным Кадастра превышает 10 км², только 30 в современный период достигают этого порога, 17 имеют площадь от 5 до 10 км², площадь остальных 16 наледей в среднем составляет 2.6 км². Еще 8 наледей в

современном климате имеют площадь больше, чем указана в Кадастре.

Наиболее значительно размеры наледей различаются на Чукотском полуострове. Суммарная площадь ледяных массивов здесь составляет всего 45 % от величины, указанной в Кадастре. В монографии [Гидрогеология СССР, 1972, с. 86] приведены сведения о наледях в бассейнах отдельных рек Чукотского полуострова: "...в Анадырском районе 69 массивов, из них 34 имеют площадь от 4 до 56 км². Наиболее крупные наледи этого района расположены на реках Нунямовеем – 56 км², Танюрер – 53.8 км², Кэнынын – 25.7 км², Сутакан – 24 км², Пыкарваам – 18 км², Эчкакек – 17.7 км², Тнэквеем – 15.3 км², Койвэльвэгыргываам – 13 и 9 км². В долинах рек Чаун-Чукотского района зарегистрированы очень крупные наледи, 39 из которых имеют площадь от 4 до 47 км²". Большая часть указанных гигантских наледей с площадью более 10 км² на Чукотском полуострове на снимках Landsat за периоды 1973–1975 и 2012–2021 гг. имеют значительно меньшую площадь.

Вместе с тем имеется 21 наледь, современные размеры которых практически совпадают с данными Кадастра, вариация коэффициента *K* для этой группы составляет от 0.5 до 1.5. На рис. 4 представлена наледная поляна на р. Малый Пыкарваам (бассейн р. Анадырь) на снимке Sentinel-2 в естественных цветах. Это одна из немногих наледей Чукотского полуострова, размеры которой по



Рис. 4. Наледная поляна на р. Малый Пыкарваам на снимке Sentinel-2 (от 17.08.2019 г.) в естественных цветах.

Площадь, покрытая льдом: 1 – максимальная, 01.06.2019 г.; 2 – минимальная, 04.09.2019 г.

современным спутниковым снимкам и по данным Кадастра практически совпадают (20 и 21.3 км² соответственно).

Отмечается также серия наледей, размеры которых в современных условиях значительно больше, чем указанные в Кадастре. Площадь последней наледи на рис. 2 (15 мая 2021 г.) составляла 22.5 км², тогда как по Кадастру не превышала 3.8 км².

Условно 2013–2018 гг. могут быть отнесены к периоду пониженной наледности, разница в площади наледей по сравнению с 2020–2021 гг. составляет 23.4 %. Однако большая площадь наледей в 2020–2021 гг. в сравнении с 2013–2018 гг. может также частично объясняться увеличением повторяемости съемки за счет появления нового источника данных (снимков Sentinel-2). Это позволило более точно фиксировать площадь наледей, близкую к максимальной (т. е. сразу после схода снежного покрова).

Для расчета ресурсов подземных вод традиционно используется формула зависимости объема от площади наледи:

$$W = aS^n,$$

где W – объем льда, тыс. м³; S – площадь льда, тыс. м²; a, n – коэффициенты [Соколов, 1975].

Ландшафтно-климатические условия формирования наледей влияют на величину расчетных коэффициентов. В работе [Землянкова и др., 2023] были систематизированы все известные наборы параметров указанной формулы, опубликованные в прошлом веке, а также на основе анализа современных данных по Анмангындинской наледи (верховья бассейна р. Колыма) предложены новые значения. Расчетный суммарный объем 42 наледей в период 1973–2021 гг. в 2 раза ниже, чем по данным Кадастра (табл. 2). Объем наледей 2020–2021 гг. на 6 % (75 млн м³) больше величины в 1973–1975 гг. Максимальная разница (1.2 км³) между двумя периодами отмечается для наледи, площадь которой по данным Кадастра (1958 г.) составила 56 км², а по космоснимкам равна 4.74 км² (1975 г.) и 0.21 км² (2021 г.).

В работе [Романовский и др., 1970] дана оценка динамических ресурсов подземных вод, рассчитанная по величине наледного питания в водокритический период для бассейна р. Уяндина (левый приток р. Индигирка) на основе результатов экспедиционных работ. Была получена более низкая величина модуля наледного стока 0.78 л/с по сравнению с данными О.Н. Толстихина (1.5–2 л/с), что авторы также связали с завышенными площадями наледей, величина которых принималась О.Н. Толстихиным равной площади наледных полей и наледных долин, приведенных в Кадастре.

Таблица 2. Суммарный расчетный объем 42 наледей по данным Кадастра [Симаков, Шильниковская, 1958] и наледей по снимкам Landsat (1973–1975) и Sentinel-2 (2020–2021)

Коэффициенты a, n	Объем наледи, км ³		
	Кадастр 1958 г.	1973–1975 гг.	2020–2021 гг.
0.364, 1.167 [Землянкова и др., 2023]	2.23	1.03	1.10
0.96, 1.094 [Соколов, 1975]	2.75	1.33	1.41
0.75, 1.12 [Соколов, Саркисян, 1981]	2.82	1.34	1.42
0.511, 1.146 [Толстихин, 1974]	2.52	1.18	1.25
Среднее значение	2.58	1.22	1.30

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе детального анализа результатов попробуем ответить на поставленные во введении вопросы.

Сокращения фактической площади наледей по сравнению с периодом первой каталогизации наледей Северо-Востока. Вероятной причиной сокращения площади наледей является трансформация мерзлотно-гидрогеологических условий наледобразования. Она может быть связана с процессами изменения климата, современными тектоническими подвижками и(или) антропогенным воздействием в результате добычи минеральных ресурсов.

По материалам метеорологических наблюдений была установлена цикличность климата: чередование холодных и теплых периодов, но с неуклонным трендом потепления. В работе [Балобаев и др., 2003] отмечается, что с конца XIX в. среднегодовые температуры воздуха повысились на 2–3.5 °С, а зимние – на 5–10 °С, отчетливое повышение температуры воздуха началось в 1970–1980-х гг. Например, на Северо-Востоке России с 1970-х гг. средняя годовая температура воздуха выросла на 2.2 °С [Makarjeva et al., 2019]. В ряде мест это привело к трансформации геокриологических условий, повысилась температура и увеличилась мощность слоя сезонного оттаивания пород, изменились сроки промерзания слоя сезонного оттаивания [Makarjeva et al., 2019; Melnikov et al., 2022], процессы водообмена и пути миграции подземных вод [Bring et al., 2016]. Перестройка мерзлотно-гидрогеологических структур, сокращение дебита родников или их исчезновение могут быть причиной угасания процессов наледобразования вплоть до полного их прекращения. В последнем случае на месте ежегодно формирующихся ледяных полей остается реликтовая наледная поляна [Алексеев, 2005].

Снижение наледности в регионе может также происходить в результате перехода выходящих на поверхность наледобразующих вод в категорию транзитных, т. е. фильтрующихся в толще аллювиальных отложений. В настоящее время многие исследователи отмечают увеличение зимнего стока рек криолитозоны России и мира [Spence et al., 2011; Tananaev et al., 2016]. Например, в [Макарьева, Нестерова, 2020] приведены сведения о повышении зимнего меженного стока в бассейнах рек Яна и Индигирка, при этом резкие изменения гидрологических характеристик произошли в основном в период 1991–1996 гг.

Рассмотрим более подробно результаты анализа самых ранних спутниковых снимков, на основе которых выявлено значительное несоответствие площадей 42 гигантских наледей по сравнению с данными Кадастра. Они относятся к 1973–1975 гг., т. е. к *периоду, предшествующему началу периода современного изменения климата*. Суммарные величины 555 км² площади наледей в 1973–1975 гг. близки к современным величинам 581 км² в 2020–2021 гг. (см. табл. 1).

Введем показатель межгодовой изменчивости индивидуальной наледи R , как отношение максимальной площади к минимальной, выбранные в любой из двух периодов. Для 38 из 42 индивидуальных наледей показатель R изменяется от 1.02 до 1.44 (разница дат в различные периоды не более 7 дней), еще для 3 наледей $1.8 < R < 2.1$ (разница дат до 3 недель). Еще одна наледь с наледной поляной 56 км² (по данным Кадастра) имела площадь 0.21 км² 7 июня 1973 г. и 2.48 км² 30 мая 2021 г. ($R = 22.6$). Медиана R для всех 42 наледей составляет 1.2 (рис. 5).

Интерес также представляют самые большие наледи мира. Площадь Большой Момской наледи (первая наледь на рис. 2), скорее всего, никогда не

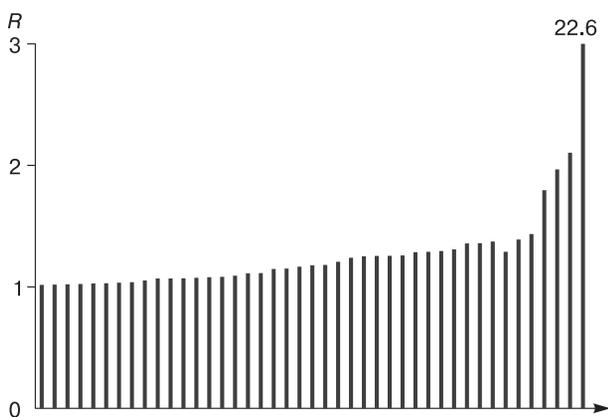


Рис. 5. Показатель межгодовой изменчивости (R) 42 наледей.

Ось абсцисс: значения приведены в порядке возрастания R . Последнее максимальное значение (22.6) отражено не в масштабе.

достигала 82 км², указанных в [Симаков, Шильниковская, 1958], так как площадь наледной поляны не превышает 72 км². Вторая крупнейшая наледь на рис. 2 – это ледяной массив в бассейне р. Сюрюктях (левый приток р. Индигирка). В настоящее время она является самой большой в мире, ее площадь на всех рассмотренных снимках превышает размеры Большой Момской наледи (табл. 3), и в 2012 г. она превысила 81 км². Показатель межгодовой изменчивости этих наледей $R = 1.90$. Для Сюрюктяхской наледи можно отметить значительную разницу площадей в 1973 и 1974 гг., она составила более 40 % (см. табл. 3).

Одной из наиболее изученных наледей является Анмангындинский тарын, формирующий в долине одноименной реки в верховьях бассейна Колымы. Хотя площадь этой наледи в период с 1962 по 2022 г. изменялась от 3.5 до 6.8 км², не достигая 10 км², наличие исторических данных позволяет использовать этот объект в анализе. С 1962 г. наблюдается статистически значимый тренд сокращения площади Анмангындинской наледи, величина которого к современному периоду составила 25 % [Землянкова и др., 2023]. Межгодовая изменчивость R за последние 60 лет составляет для этой наледи 1.94.

В работе [Романовский, 1983] приведены результаты полевого исследования в 1972 г. Ойсордоохской и Кыро-Нехаранских наледей, картированных в 1939 и 1935 гг. П.Ф. Швецовым и

Таблица 3. Площадь Большой Момской наледи и крупнейшей наледи в бассейне р. Сюрюктях в весенний период

Большая Момская наледь		Наледь в бассейне р. Сюрюктях	
Дата съемки	Площадь наледи, км ²	Дата съемки	Площадь наледи, км ²
		19.05.1973	73.51
		31.05.1974	42.70
08.05.2005	66.20	29.05.2005	69.67
27.05.2006	57.90	04.06.2007	52.50
		21.05.2008	67.73
19.06.2009	39.50	17.06.2009	45.06
		18.05.2010	69.80
25.05.2011	61.78		
27.05.2012	49.60	23.05.2012	81.46
15.05.2013	48.15	27.05.2013	56.87
		21.05.2014	78.01
28.05.2015	49.08	31.05.2015	71.29
15.05.2016	45.79	27.05.2016	77.78
		04.06.2016	68.99
24.05.2017	44.72	07.06.2017	62.60
25.05.2018	34.92	07.06.2018	46.23
22.05.2019	53.60	28.05.2019	61.14
16.05.2020	55.01	21.05.2020	64.06

В.П. Седовым [1941]. Несмотря на то что наледы расположены в Селенняхской впадине (бассейн р. Индигирка) на расстоянии не более 30 км друг от друга, изменения их площади были разнонаправленными: площадь Ойсордоохской наледи увеличилась на 30 %, а площадь комплекса Кыро-Нераханских наледей уменьшилась.

Приведенные факты указывают на высокую межгодовую изменчивость площади отдельных наледей, однако в целом, согласно данным 1973–2021 гг., для большинства наледей этот показатель не превышает 1.5, а медианная характеристика составляет 1.2. Общая фактическая площадь наиболее крупных наледей составляет величину, в 1.9–

2.5 раза меньше в сравнении с данными Кадастра о площади наледных полей. Эта величина близка к оценкам, полученным для всей совокупности наледей-тарынов Северо-Востока [Атлас..., 2021].

Полученные результаты могут указывать на некорректность расчетных характеристик (например, величины динамических запасов наледообразующих подземных вод), выполненных на основе данных Кадастра [Симаков, Шильниковская, 1958], либо на резкое изменение условий наледообразования в регионе (не выявленного генезиса), произошедшее с конца 40-х по 70-е гг. прошлого века. Однако можно утверждать, что в период после 1973–1975 гг. кардинального изменения характе-

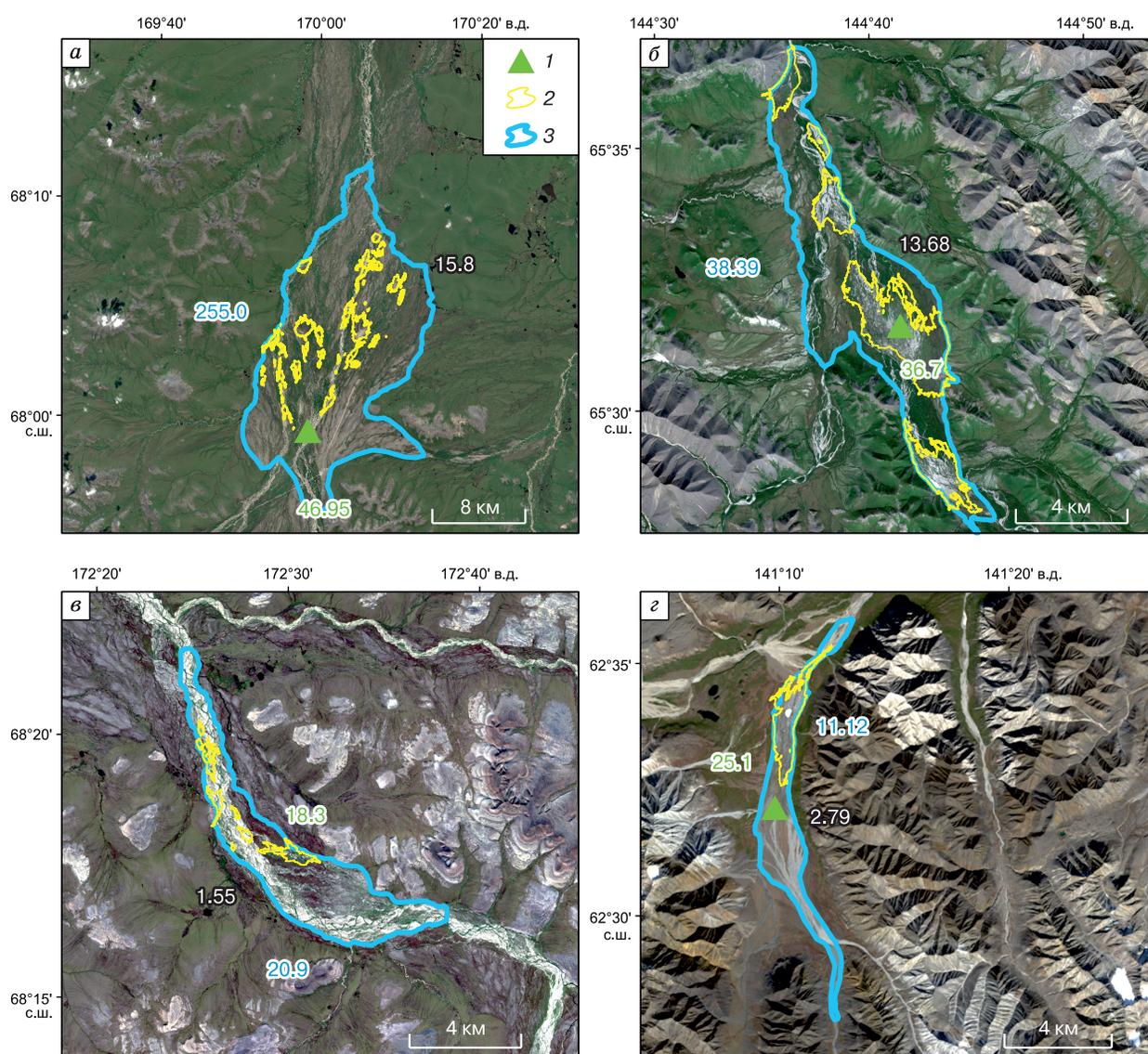


Рис. 6. Соотношения площади наледных полей и максимальной площади наледи по снимкам Sentinel-2 на реках Люлювеем (а), Эрakit (б), Эльгыкаквын (в) и Агаякан (г).

1 – площадь наледи по Кадастру; 2 – площадь наледи по весеннему снимку Sentinel-2; 3 – площадь наледной поляны по снимку Sentinel-2. Цифры в поле снимка – площадь контуров соответствующего цвета, км².

ристик наледности Северо-Востока не происходило, а предыдущие выводы авторов об уменьшении площади наледей в бассейне р. Индигирка были ошибочными [Макарьева и др., 2019].

Соответствие площадей наледных полей и наледей. На рис. 6 представлены примеры выделения площадей наледных полей и контуров наледей на весенних снимках Sentinel-2, а также указаны площади наледных полей по данным [Симаков, Шильниковская, 1958]. Разница площади отдельных наледных полей составила от 3 до 90 %.

Всего по спутниковым снимкам было выделено 27 наледных полей площадью от 1.5 до 255 км² (по Кадастру – от 5.5 до 82.0 км²).

На рис. 6, а, з можно отметить значительное несоответствие площади наледных полей по данным Кадастра и выделенных по космическим снимкам. При этом на всех примерах рис. 6 фактические площади наледей в несколько раз меньше площади наледных полей, выделенных как по современным снимкам, так и по данным Кадастра.

Из 71 рассмотренной гигантской наледи 12 представляют собой лишь набор отдельных мигрирующих ледяных полей, суммарная площадь которых (78 км²) значительно меньше площади наледной поляны, указанной в Кадастре (288 км²). Б.В. Зонов [1944] отнес такие наледи к участкам,

характеризующимся угасанием наледных процессов.

В качестве примера угасания наледных процессов на рис. 7 представлены снимки Landsat за 1974 г. и Sentinel-2 за 2019 г. наледной поляны р. Люлювеем, впадающей в Чаунскую губу. Здесь образуются отдельные наледные массивы размером до 0.8 км², общая площадь которых превышает 17 км². По данным Кадастра, на этом участке реки площадь наледной поляны составляет 47 км².

Выявлены также шесть наледей, для которых площадь наледной поляны по Кадастру более чем в 2 раза превышает площадь наледной поляны, выделенной по снимкам Sentinel-2 (см. рис. 6, з). Такие расхождения могут быть обусловлены субъективностью визуального выделения границ наледной поляны, особенно в тех случаях, когда несколько наледей расположены последовательно вдоль одного водотока, либо ошибками в данных Кадастра. В.Р. Алексеев и соавт. [2011] указывают на то, что при использовании метода ландшафтной индикации за пределами тайги и лесотундры отмечаются большие погрешности в определении параметров наледей. Ошибка оценки наледности Северной Чукотки составляет 20–25 %.

Н.Н. Романовский с соавторами, рассматривая геологическую роль и процесс миграции нале-

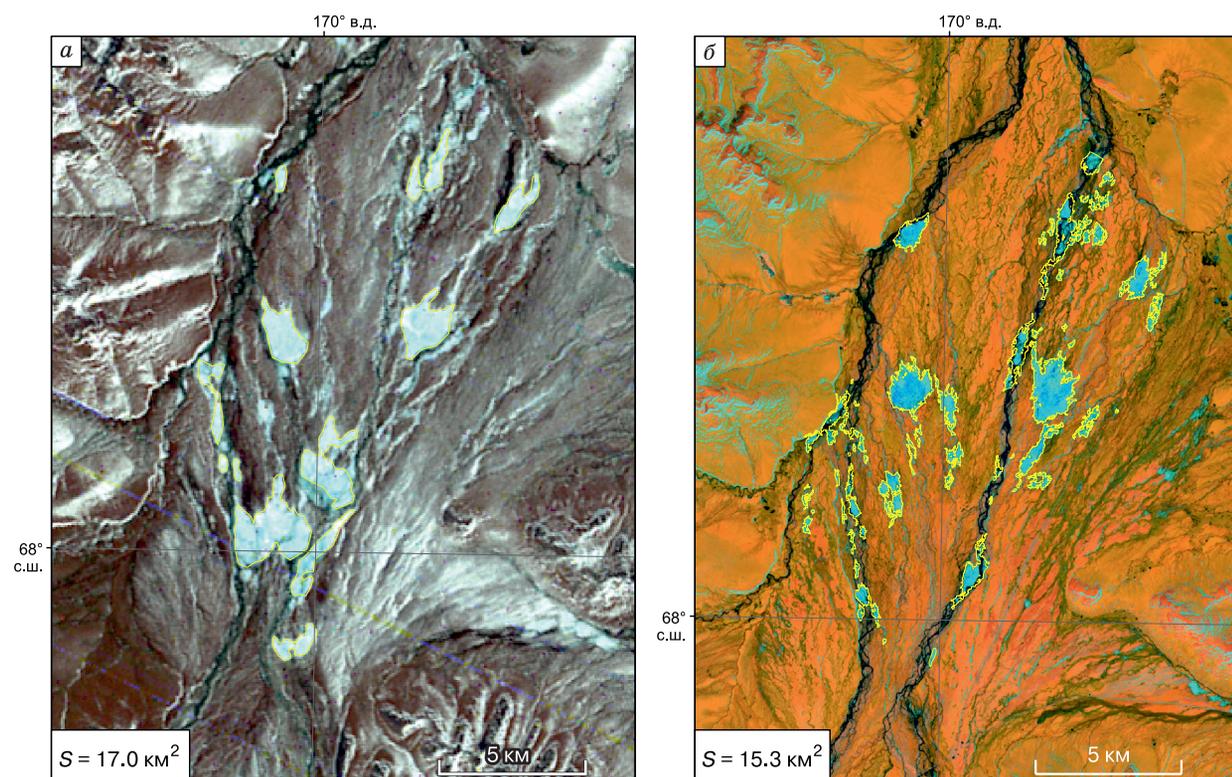


Рис. 7. Сравнение площади гигантской наледи в бассейне р. Люлювеем по снимкам Landsat/MSS (а) и Sentinel-2 (б).

а – площадь 17.0 км², 30.05.1974 г.; б – площадь 15.3 км², 01.06.2019 г. Желтым контуром выделена наледь.

дей, указывают на то, что направленная или циклическая многолетняя динамика наледей существенно расширяет их площадь воздействия на рельеф [Романовский и др., 1970; Романовский, 1973; Афанасенко и др., 1975]. В результате площади наледных полей значительно превышают размеры образующихся наледей.

Результаты настоящего исследования на более широком материале подтверждают полученные ранее выводы Н.Н. Романовского [1973] о том, что оценка площади наледи (даже максимальной в многолетнем периоде) по размерам наледной поляны не рекомендуется. Использование в анализе снимков за период 1973–1975 гг. и их сравнение с данными современного периода показывает, что суммарная площадь наледных полей, указанная в Кадастре, в 1.9 раза превышает фактическую площадь распространения наледей как в период его создания, так и в настоящее время.

ВЫВОДЫ

Анализ данных, полученных с помощью космических снимков Landsat и Sentinel-2 с 1973 по 2021 г., и их сравнение с Кадастром наледей Северо-Востока России [Симаков, Шильниковская, 1958] выявили существенные различия в оценке площади для категории гигантских наледей площадью более 10 км².

1. Общая фактическая площадь наледей составляет величину в 1.9 раза меньше суммарной площади наледных полей, указанных в Кадастре. Из 72 рассмотренных наледей 35 имеют площадь, как минимум в 2 раза меньше указанной в Кадастре. Выявлены 13 наледей, площадь которых увеличилась по сравнению с данными Кадастра. Суммарная площадь 42 наледей, полученных по снимкам 1973–1975 гг., составляет 555 км², что практически совпадает с данными за 2020–2021 гг. (581 км²), при этом общая площадь наледных полей по данным Кадастра – 1083 км².

2. Отдельные гигантские наледи проявляют очень высокую межгодовую изменчивость, их площадь год от года может меняться до двух раз (100 %), однако в среднем для большинства наледей эта величина составляет около 20 %.

3. В период после 1973–1975 гг. кардинального изменения характеристик наледности Северо-Востока по результатам исследования не зафиксировано, а предыдущие выводы авторов [Макарьева и др., 2019] об уменьшении суммарной площади наледей в регионе были ошибочными.

4. На многочисленных примерах установлено несоответствие контуров наледных полей и границ наледей. Оценка площади наледи (даже максимальной в многолетнем периоде) по размерам наледной поляны не рекомендуется. Суммарная площадь наледных полей, указанная в Кадастре, значительно превышает фактическую площадь

распространения наледей как в период его создания, так и в настоящее время.

5. Преувеличенные значения площади наледей определяют неточности в дальнейших расчетах динамических запасов наледообразующих подземных вод, величина которых (а также соответствующих характеристик речного стока) по данным Кадастра может быть завышена более чем в 2 раза.

Использование наледей в качестве индикатора гидродинамических процессов в криолитозоне требует постановки долгосрочных режимных наблюдений на специальных наледных полигонах. Выявление причин изменчивости наледей позволит обеспечить более точную оценку запасов природных вод в горных регионах Арктики и Субарктики, а также в других наледных областях России.

Благодарности. Авторы искренне благодарят двух анонимных рецензентов за конструктивные замечания и комментарии.

Исследования проводятся при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта № 94034170, обработка и анализ снимков Landsat за 1973–1975 гг. выполнен в рамках проекта Российского научного фонда № 23-17-20011 и при содействии правительства Магаданской области.

Литература

- Алексеев В.Р.** Ландшафтная индикация наледных явлений. Новосибирск, Наука, 2005, 363 с.
- Алексеев В.Р.** Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лед и снег, 2016, т. 56, № 1, с. 73–92.
- Алексеев В.Р., Горин В.В., Котов С.В.** Наледи-тарыны Северной Чукотки // Лед и снег, 2011, № 4 (116), с. 85–93.
- Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н. и др.** Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России (2013–2019 гг.) // География и природ. ресурсы, 2023, № 3, с. 136–143.
- Атлас** гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н. и др. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2021, 302 с.
- Атлас** снежно-ледовых ресурсов мира. М., Науч. мир, 1997, 371 с.
- Афанасенко В.Е., Корейша М.М., Романовский Н.Н.** Наледные ландшафты Северо-Востока СССР // Материалы VI Съезда Геогр. о-ва СССР: Проблемы ландшафтоведения. Л., 1975, с. 78–81.
- Балобаев В.Т., Гаврилова М.К., Скачков Ю.Б. и др.** Обзор состояния и тенденций изменения климата Якутии. Якутск, Изд-во СО РАН, 2003, 64 с.
- Гидрогеология СССР.** Т. 20. Якутская АССР / Под ред. А.И. Ефимова, И.К. Зайцева. М., Недра, 1970, 383 с.
- Гидрогеология СССР.** Т. 26. Северо-Восток СССР / Под ред. О.Н. Толстихина. М., Недра, 1972, 297 с.
- Землянкова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н. и др.** Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // Лед и снег, 2023, т. 63, № 1, с. 71–84.

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.

Корейша М.М. Закономерности развития наземных льдов в условиях резко континентального климата: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 1986, 45 с.

Кузнецов А.С. Наледи и польньи на Северо-Востоке СССР // Сб. работ по гидрологии. Л., Гидрометеиздат, 1962, № 2, с. 72–86.

Макарьева О.М., Алексеев В.Р., Шихов А.Н. и др. Картографирование наледей Северо-Востока России // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 4, с. 47–58.

Макарьева О.М., Нестерова Н.В. Фазовое состояние осадков как фактор увеличения меженного стока в криолитозоне (на примере бассейнов Яны и Индигирки) // Метеорология и гидрология, 2020, № 4, с. 95–103.

Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным // Лед и снег, 2019, т. 59, № 2, с. 201–212.

Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования. СПб., Нестор-История, 2016, 320 с.

Поморцев О.А., Кашкаров Е.П., Попов В.Ф. Наледи: глобальное потепление климата и процессы наледообразования (ритмическая основа долгосрочного прогноза) // Вестн. ЯГУ, 2010, т. 7, № 2, с. 40–48.

Романовский Н.Н. О геологической деятельности наледей // Мерзлотные исслед., 1973, вып. XIII, с. 66–89.

Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 232 с.

Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Кудрявцев В.А. и др. Мерзлотные и гидрогеологические особенности района Депутатского рудного узла // Мерзлотные исслед., 1970, вып. X, с. 34–58.

Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2021620267 (от 12.02.2021 г.) “Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для Чукотского полуострова” / Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А. и др. 2021а.

Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2021620317 (от 24.02.2021 г.) “Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Индигирка” / Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А. и др. 2021б.

Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2021620332 (от 26.02.2021 г.) “Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Колыма” / Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А. и др. 2021в.

Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2021620333 (от 26.02.2021 г.) “Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Яна” / Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А. и др. 2021г.

Симаков А.С., Шильниковская З.Г. Карта наледей Северо-Востока СССР. Краткая объяснительная записка. Магадан, Сев.-Вост. геол. управление, 1958, 40 с.

Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л., Гидрометеиздат, 1975, 190 с.

Соколов Б.Л. Подземное питание горных рек / Б.Л. Соколов, В.О. Саркисян. Л., Гидрометеиздат, 1981, 239 с.

Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск, Наука, 1974, 164 с.

Швецов П.Ф. Гигантские наледы и подземные воды хребта Тас-Хаяхта / П.Ф. Швецов, В.П. Седов. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1941, 81 с.

Шепелев В.В. Оценка наледного питания и наледного стока бассейнов рек Мома и Тихон-Юрях (притоки Индигирки) // Геокриологические и гидрологические исследования Сибири. Якутск, Кн. изд-во, 1972, с. 187–190.

Bring A., Fedorova I., Dibike Y. et al. Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects and research challenges // J. Geophys. Res., Biogeosciences, 2016, vol. 121, p. 621–629. – <https://doi.org/10.1002/2015JG003131op>

Makarieva O., Nesterova N., Post D. et al. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // The Cryosphere, 2019, vol. 13, p. 1635–1659. – <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>

Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A. et al. Giant aufeis-unknown glaciation in North-Eastern Eurasia according to Landsat images 2013–2019 // Remote Sens., 2022, vol. 14, p. 4248. – <https://doi.org/10.3390/rs14174248>

Melnikov V., Osipov V., Brouchkov A. et al. Past and future of permafrost monitoring: Stability of Russian energetic infrastructure // Energies, 2022, vol. 15, p. 3190. – <https://doi.org/10.3390/en15093190>

Spence C., Kokelj S.V., Ehsanzadeh E. Precipitation trends contribute to streamflow regime shifts in northern Canada – cold region hydrology in a changing climate // IAHS Publ., 2011, vol. 346, p. 3–8.

Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // Geophys. Res. Lett., 2016, vol. 43, p. 10764–10772.

Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov A. et al. 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, vol. 233, p. 107530. – <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107530>

References

Alekseev V.R. Landshaftnaya indikatsiya naleednykh yavlenii [Landscape indication of aufeis phenomena]. Novosibirsk, 2005, 364 p. (in Russian).

Alekseev V.R. Long-term variability of the spring taryn-aufeis. Led i sneg [Ice and Snow], 2016, vol. 56, No. 1, p. 73–92.

Alekseev V.R., Gorin V.V., Kotov S.V. Taryn aufeis in the Northern Chukotka. Led i sneg [Ice and Snow], 2011, No. 4 (116), p. 85–93.

Alekseev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N. et al. Atlas of giant aufeis-taryn of the North-East of Russia (2013–2019). Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources], 2023, No. 3, p. 136–143.

Atlas gigantskih naledej-tarynov Severo-Vostoka Rossii [Atlas of the giant aufeis-taryns of the North-East of Russia]. Alekseev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N. et al. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2021, 302 p. (in Russian).

Atlas snezhno-ledovykh resursov mira [Atlas of snow and ice resources of the World]. Moscow, Nauchnii mir, 1997, 341 p. (in Russian).

Afanasenkov V.E., Korescha M.M., Romanovsky N.N. Glacial landscapes of the North-East of the USSR. In: Materials of the VI Congress of Geogr. USSR: Problems of landscape studies. Leningrad, 1975, p. 78–81 (in Russian).

Balobaev V.T., Gavrilova M.K., Skachkov Yu.B. et al. The review of conditions and tendencies of climate changes in Yakutia. Yakutsk, Izd-vo SO RAN, 2003, 64 p. (in Russian).

Gidrogeologiya SSSR [Hydrogeology of the USSR. Vol. 20. Yakut ASSR]. A.I. Efimov, I.K. Zaitsev (eds.). Moscow, Nedra, 1970, 383 p. (in Russian).

- Gidrogeologiya SSSR [Hydrogeology of the USSR. Vol. 26. North-East of the USSR]. O.N. Tolstikhin (ed.). Moscow, Nedra, 1972, 297 p. (in Russian).
- Zemlianskova A.A., Alekseev V.R., Shikhov A.N. et al. Long-term dynamics of the huge Anmangynda aufeis in the North-East of Russia (1962–2021). *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2023, vol. 63 (1), p. 71–84.
- Zonov B.V. Aufeis and polynyas on the rivers of the Yana-Kolyma Mountain country. In: Proceedings of the Obruchevo Permafrost Institute of the USSR Academy of Sciences. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1944, vol. IV, p. 33–92 (in Russian).
- Koreisha M.M. Regularities of the development of land ice in a sharply continental climate: abstract. PhD dis. ... of Geographical Sciences. Moscow, 1986, 45 p. (in Russian).
- Kuznetsov A.S. Aufeis and polynyas in the North-East of the USSR. In: Collection of works on hydrology. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1962, No. 2, p. 72–86 (in Russian).
- Makarieva O.M., Alekseev V.R., Shikhov A.N. et al. Mapping of giant aufeis fields in the Northeast of Russia. *Earth's Cryosphere*, 2022, vol. XXVI, No. 4, p. 41–51.
- Makarieva O.M., Nesterova N.V. Phase state of precipitation as a factor of low flow in the Yana and Indigirka river basins. *Russ. Meteorol. and Hydrol.*, 2020, vol. 45, No. 4, p. 276–282. DOI: 10.3103/S1068373920040081.
- Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Aufeis of the Indigirka River basin according to modern Landsat images and historical data. *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2019, vol. 59, No. 2, p. 201–212.
- Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V. Naledi zony BAM: Ekspeditsionnye issledovaniya [Icing fields of the BAM zone: expeditionary investigations]. St. Petersburg, Nestor-History, 2016, 320 p. (in Russian).
- Pomorsev E.P., Kashkarov V.F., Popov V.F. Ice field: global warming and processes of ice formation (rhythmic basis of long-term prognosis). *Vestnik Yakut. Gos. un-ta [Vestnik of Yakut State University]*, 2010, vol. 7 (2), p. 40–48.
- Romanovsky N.N. About geological activity of aufeis. *Merzlotnye issledovaniya [Permafrost Studies]*, 1973, iss. 13, p. 66–89.
- Romanovsky N.N. Podzemnye vody kriolitozony [Groundwater of cryolithozone]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1983, 232 p. (in Russian).
- Romanovsky N.N., Kondratieva K.A., Kudryavtsev V.A. et al. Permafrost and hydrogeological features of the area of the Deputatsky ore cluster. *Merzlotnye issledovaniya [Permafrost Studies]*, 1970, iss. 10, p. 34–58.
- Certificate of state registration of the database No. 2021620267 (dated 12.02.2021). Naledi Severo-Vostoka Rossii: GIS katalog dlya Chukotskogo poluoostrova [Aufeis of the North-East of Russia: GIS catalog for the Chukchi Peninsula]. Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A. et al. 2021a. (in Russian).
- Certificate of state registration of the database No. 2021620317 (dated 02.24.2021). 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. et al. 2021b. (in Russian).
- Certificate of state registration of the database No. 2021620332 (dated 02.26.2021). 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. et al. 2021c. (in Russian).
- Certificate of state registration of the database No. 2021620333 (dated 02.26.2021). 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. et al. 2021d. (in Russian).
- Simakov A.S., Shilnikovskaya Z.G. Karta naledej Severo-Vostoka SSSR. Kratkaya ob"yasnitel'naya zapiska [Map of aufeis in the North-East of the USSR. A brief explanatory note]. North-Eastern Geological Department of the Main Department of Geology and Subsoil Protection under the Council of Ministers of the RSFSR. Magadan, 1958, 40 p. (in Russian).
- Sokolov B.L. Naledi i rechnoy stok [Aufeis and river runoff]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1975, 190 p. (in Russian).
- Sokolov B.L., Sarkisyan V.O. Podzemnoe pitanie gornyykh rek [Groundwater feeding of mountain rivers]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981, 239 p. (in Russian).
- Tolstikhin O.N. Aufeis and underground water in the North-Eastern Regions of the USSR. Novosibirsk, Nauka, 1974, 164 p. (in Russian).
- Shvetsov P.F., Sedov V.P. Gigantskie naledi i podzemnye vody khrebta Tas-Khayakhtakh [Giant aufeis and underground water in the Tas-Khayakhtakh ridge]. Moscow; Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1941, 81 p. (in Russian).
- Shepelev V.V. Assessment of aufeis power and aufeis runoff of the Moma and Tikhon-Yuryakh river basins (tributaries of the Indigirka). In: Geocryological and hydrological studies of Siberia. Yakutsk, Publishing House, 1972, p. 187–190 (in Russian).
- Bring A., Fedorova I., Dibike Y. et al. Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects and research challenges. *J. Geophys. Res., Biogeosciences*, 2016, vol. 121, p. 621–629. – <https://doi.org/10.1002/2015JG003131op>
- Makarieva O., Nesterova N., Post D. et al. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, p. 1635–1659. – <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>
- Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A. et al. Giant aufeis – unknown glaciation in North-Eastern Eurasia according to Landsat images 2013–2019. *Remote Sens.*, 2022, vol. 14, p. 4248. – <https://doi.org/10.3390/rs14174248>
- Melnikov V., Osipov V., Brouchkov A. et al. Past and future of permafrost monitoring: Stability of Russian energetic infrastructure. *Energies*, 2022, vol. 15, p. 3190. – <https://doi.org/10.3390/en15093190>
- Spence C., Kokelj S.V., Ehsanzadeh E. Precipitation trends contribute to streamflow regime shifts in northern Canada – cold region hydrology in a changing climate. *IAHS Publ.*, 2011, vol. 346, p. 3–8.
- Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, p. 10764–10772.
- Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov A. et al. 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, vol. 233, p. 107530. – <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107530>

*Поступила в редакцию 3 мая 2023 г.,
после доработки – 5 октября 2023 г.,
принята к публикации 9 ноября 2023 г.*