

УДК 551.328

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-408-419>

Оригинальная статья

Применение индекса NDWI в исследовании природно-техногенных наледей на автодороге «Лена» (Южная Якутия)

Н. Е. Баишев✉, Л. А. Гагарин, В. В. Шепелев

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉nyurgunbaishev@mail.ru

Аннотация

Впервые получена количественная оценка применения водного индекса NDWI для определения площадей природно-техногенных наледей и их динамики. В отличие от общепринятого в наледеведении снежного индекса NDSI, преимуществом использования индекса NDWI является независимость идентификации контуров наледей от наличия или отсутствия снежного покрова. По данным расчетов площадей природно-техногенных наледей на участках «Горбыллах» и «Дурай» федеральной автодороги «Лена» в зимы 2020–2021 и 2021–2022 гг. зафиксировано увеличение их площадей за счет роста суммы осадков за предшествующие этим зимам летние периоды. К недостаткам стоит отнести наличие облачности на космических изображениях, перекрывающей объект исследования, а также неоднозначную интерпретацию затененных участков наледных полей, когда индекс NDWI интерпретирует лишь наличие воды на поверхности ландшафта.

Ключевые слова: наледь, природно-техногенная наледь, NDWI, NDSI, Sentinel-2, автодорога «Лена», криолитозона

Финансирование. Полевые работы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-27-20118), аналитические исследования выполнены в рамках бюджетного проекта (№ 122012400106-7).

Для цитирования: Баишев Н.Е., Гагарин Н.Е., Шепелев В.В. Применение индекса NDWI в исследовании природно-техногенных наледей на автодороге «Лена» (Южная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(3):408–419. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-408-419>

Original article

NDWI as a method for studying natural and technogenic aufeis along the Lena Highway (Southern Yakutia)

Nyurgun E. Baishev✉, Leonid A. Gagarin, Viktor V. Shepelev

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉nyurgunbaishev@mail.ru

Abstract

The research conducted has yielded, for the first time, a quantitative evaluation of the NDWI (Normalized Difference Water Index) for the purpose of identifying areas of natural and technogenic aufeis within Southern Yakutia. In contrast to the widely used NDSI (Normalized Difference Snow Index) in aufeis investigations, the NDWI offers the advantage of delineating aufeis contours without being influenced by the presence or absence of snow cover. Calculations pertaining to the aufeis areas in the “Gorbyllakh” and “Durai” sections of the Federal Highway “Lena” during the winters of 2020–2021 and 2021–2022 indicate a notable increase in these areas, attributed to heightened precipitation levels anticipated in the subsequent summer period. However, limitations of this approach include the interference of cloud cover in satellite imagery, which can obscure the study area, as well as the potential for ambiguous interpretations of shaded regions within the aufeis meadow, where the NDWI may suggest the presence of surface water.

Keywords: aufeis, natural and technogenic aufeis, NDWI, NDSI, Sentinel-2, Lena Highway, permafrost zone

Funding. Field work was conducted with the financial support of the Russian Science Foundation (No. 22-27-20118), analytical studies were conducted within the framework of the budgeted project (No. 122012400106-7).

For citation: Baishev N.E., Gagarin L.A., Shepelev V.V. NDWI as a method for studying natural and technogenic aufeis along the Lena Highway (Southern Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(3):408–419. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-408-419>

Введение

В районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) широко распространены природно-техногенные наледы (ПТН). К ним относят наледы, которые сформировались на новых участках в результате техногенного нарушения мерзлотных, гидрологических, гидрогеологических и других природных условий [1], а также природные наледы, у которых под воздействием инженерных сооружений трансформировались их морфометрические параметры, режимы формирования и стаивания [2].

В последние годы при изучении закономерностей распространения наледей и их сезонной и многолетней динамики широко используется метод дешифрирования мультиспектральных космоснимков [3–5]. Идентификация мест их появления и контуров происходит на основе расчета нормализованного разностного снежного индекса NDSI (от англ. Normalized Difference Snow Index). Процесс наледеобразования происходит в течение всей зимы, поэтому очень часто изучаемый объект перекрывается выпадающим снегом, а его идентификация по космоснимкам становится весьма затруднительной, особенно на начальных этапах. В силу специфики расчета индекса NDSI очень сложно отделить снежный покров ото льда.

В течение зимы наледеобразующие воды периодически появляются на дневной поверхности, в связи с этим представляется возможность их идентификации на основе нормализованного

разностного водного индекса (NDWI), широко применяемого при картировании водных объектов (рис. 1) [6, 7]. В данной работе авторами используется эта методика для идентифицирования контуров растекания наледеобразующей воды на наледной поляне в течение всей зимы. Полученная серия разновременных контуров позволяет определить участки разгрузки подземных вод, установить динамику роста наледей и фиксировать их максимальные размеры.

Целью работы является верификация способа идентификации контуров природно-техногенных наледей с помощью водного индекса NDWI, рассчитанного на основе мультиспектральных космоснимков Sentinel-2.

Объектом исследований являются ПТН, которые формируются на федеральной автомобильной дороге А-360 «Лена» (ФАД «Лена») от пос. Невер (Амурская область) до г. Томмот (Республика Саха (Якутия)) (рис. 2).

Для стационарных исследований выбраны два наледных участка (НУ). Первый НУ – «Горбыллах» расположен в долине р. Горбыллах на 330–331 км ФАД «Лена». Здесь образуется природно-техногенная наледь. Так, 20 января 1928 г. до строительства моста через р. Горбыллах наледь формировалась преимущественно в русле и пойме реки (рис. 3, а). Она имела площадь 9 375 м², протягивалась вдоль дороги на 110 м, а ее мощность достигала 1,5 м [8]. При повторном обследовании 30 января 1960 г., когда мост через реку уже был построен, наледь появлялась выше него

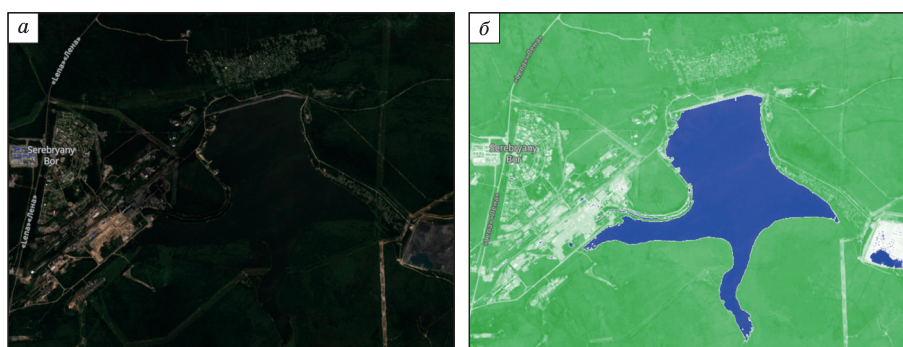


Рис. 1. RGB-снимок Нерюнгринского водохранилища (а) и результат выделения акватории водохранилища по индексу NDWI (б) по данным спутникового снимка Sentinel-2

Fig. 1. RGB image of the Neryungri reservoir (a) and the result of identifying the reservoir water area using the NDWI index (b) based on the Sentinel-2 satellite image data

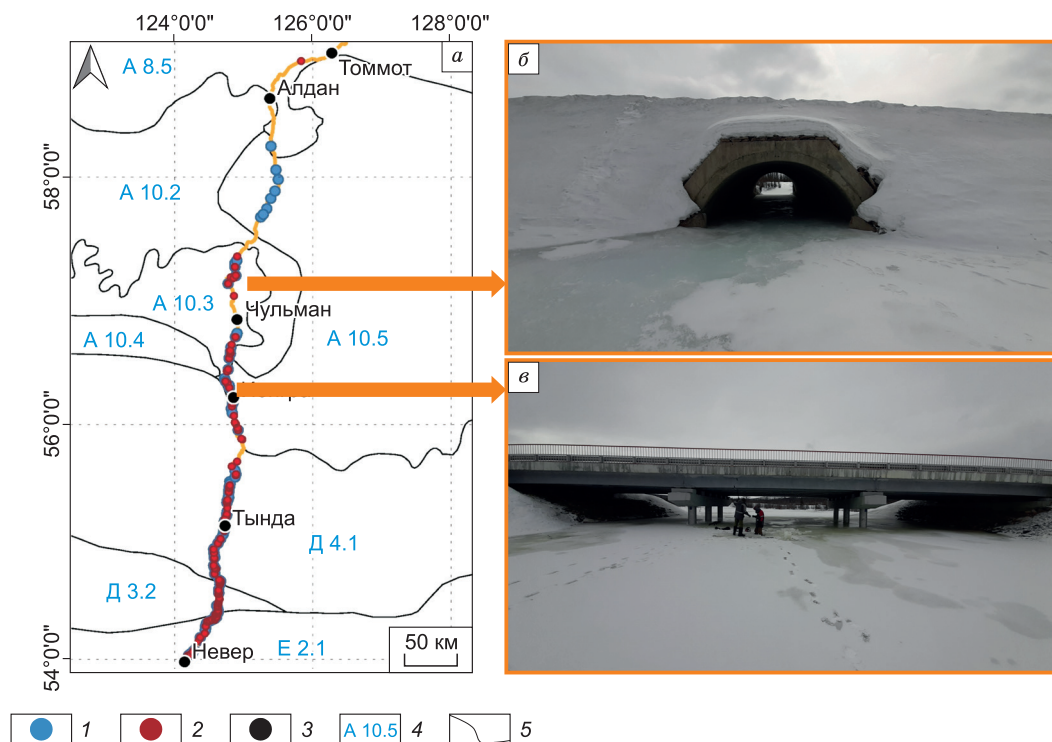


Рис. 2. Местоположение исследуемых наледных участков на ФАД «Лена». *а:* 1 – наледи за зиму 1927–1928 гг., 2 – за зиму 2021–2022 гг., 3 – населенные пункты, 4 – номер гидрогеологических районов 2-го порядка, 5 – границы гидрогеологических районов 2-го порядка: Е 2.1 – Тугурино-Джагдинский гидрогеологический массив (ГГМ); Д 3.2 – Витимо-Олекминский ГГМ; Д 4.1 – Становой ГГМ; А 10.5 – Сутамо-Суннангинский ГГМ; А 10.3 – Чульманский адартезианский бассейн; А 10.2 – Алдано-Тимонский ГГМ; А 8.5 – Лено-Амгинский артезианский бассейн; А 10.4 – Южно-Алданский ГГМ [14]. *б* – природно-техногенная наледь на участке «Дурай» (дата фотографии: 8 апреля 2022 г.). *в* – природно-техногенная наледь на участке «Горбыллах» (дата фотографии: 3 апреля 2022 г.). Фотографии Баишева Н.Е.

Fig. 2. *a:* Location of the studied aufeis areas along the Lena Highway: 1 – Aufeis during the winter of 1927–1928; 2 – Aufeis during the winter of 2021–2022; 3 – settlements; 4 – number of hydrogeological areas of the 2nd order; 5 – contours of hydrogeological areas of the 2nd order: E 2.1 – Tugurino-Jagdinsky hydrogeological array (HGA); Д 3.2 – Vitimo-Olekminsky HGA; Д 4.1 – Stanovoy HGA; А 10.5 – Sutamo-Sunnanginsky HGA; А 10.3 – Chulmansky adartesian basin; А 10.2 – Aldano-Timonsky HGA; А 8.5 – Leno-Amginsky artesian basin; А 10.4 – Yuzhno-Aldansky HGA [14]. *б* – Natural and technogenic aufeis at the “Durai” site (photographed on April 8, 2022). *в* – Natural and technogenic aufeis at the “Gorbillakh” site (photographed on April 3, 2022). Photographs by Baishev N.E.

по течению и задерживалась мостом. На этом участке был обустроен мерзлотный пояс в виде снегового вала (рис. 3, б). Площадь наледи составляла 112 800 м², длина вдоль дороги 450 м, а мощность достигала 1,2 м [9]. В марте 1976 г. площадь наледи была равна 20 000 м², а в марте 1977 г. – 1 000–2 000 м² [10]. Стоит отметить, что площадь наледи рассчитывалась лишь для отрезка долины реки шириной 100–200 м выше и ниже по течению от дороги. По данным Landsat 4-5 TM (Thematic Mapper) на дату 30.05.1987 г. площадь наледи была равна 68 837 м², и ее длина вдоль дороги составляла 145 м (рис. 3, в).

Второй участок «Дурай» расположен в бассейне р. Большой Дурай на 450–451 км автодороги «Лена». Здесь наледь ежегодно образуется

в результате строительства дорожного полотна. Так, в зиму 1927–1928 гг. наледь здесь не была зафиксирована, так как строительство дороги на этом участке еще не начиналось [8]. После ее возведения о наледообразовании здесь сведения тоже отсутствуют [9–13]. Однако, по данным Landsat 4-5 TM на дату 30.05.1987 г. площадь наледи была равна 29 755 м², а длина вдоль дороги составляла 88 м (рис. 3, з).

Материалы исследований

Основным источником данных послужили мультиспектральные космические снимки Sentinel-2 с готовой атмосферной корректировкой. Были использованы снимки за периоды с ноября 2020 г. по апрель 2021 г. и 2022 г., с облачностью

≤ 20 %. Всего было использовано 27 космоснимков за 2020–2021 гг. и 27 за 2021–2022 гг.

По имеющимся данным [15, 16], для идентификации наледей по космоснимкам наиболее информативными спектральными диапазонами являются 0,540–0,560 и 0,770–0,810 мкм. На современном этапе исследований идентификация наледей проводится с помощью расчета снежного индекса NDSI [3–5]. Однако, в течение зимы наледь периодически покрывается снегом, в связи с чем становится затруднительно определять ее плановые границы с помощью этого индекса. В связи с этим авторами сделано допущение, что все излившиеся на поверхность поймы и русла реки подземные воды при замерзании расходятся на формирование налееди. Фиксируя размеры водных ареалов с момента начала образования налееди и объединяя их в единый полигон, можно оценить его динамику. Для этого был рассчитан водный индекс NDWI.

Для верификации данных, полученных при дешифрировании космоснимков, на НУ в начале сентября 2020 г. авторами были установлены автоматизированные фотокамеры KeepGuard (KG) 762 NV (рис. 4). Задача заключалась в фиксации мощности налееди и выявлении ареалов излившихся наледееобразующих вод. Частота съемки составляла два раза в сутки. Дополнительно в апреле 2022 г. на обоих НУ была выполнена аэрофотосъемка с помощью квадрокоптера Mavic 3, построены ортофотопланы местностей.

Методика исследований

В программе ArcGIS 10.5 для расчета индекса NDWI были использованы каналы 3 (Green, длина волны 0,560 мкм) и 8 (NIR, длина волны 0,842 мкм) (формула (1)). Их пространственное разрешение составляет 10 м/пиксель [https://sentinel.esa.int]

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

Рассчитанный диапазон значений индекса NDWI варьирует в пределах от –1 до 1. Водным объектам соответствуют положительные его величины [6, 7].

На следующем этапе была проведена бинарная классификация растрового слоя NDWI, а затем его векторизация. У последнего в таблице атрибутов в колонке «gridcod» имелись значения 0 и 1, где 1 – водные объекты, 0 – остальные. Нулевые величины не использовались в дальнейшем анализе и были удалены. Далее, для

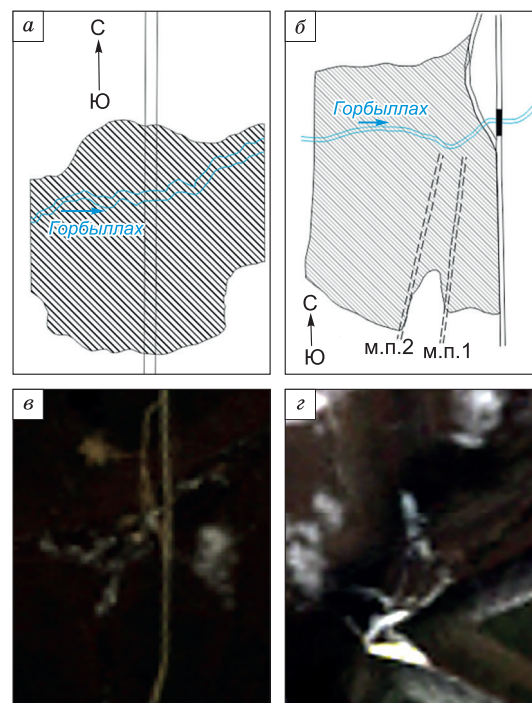


Рис. 3. План-схемы налееди на участке «Горбыллах»: а – 20 января 1928 г. [8]; б – 30 января 1960 г. [9]. Космические снимки Landsat 4-5 TM на дату 30.05.1987 г. на участках «Горбыллах» (в) и «Дурай» (г)

Fig. 3. Aufeis plan diagrams for the “Gorbillakh” site: а) January 20, 1928 [8]; б) January 30, 1960 [9]. Satellite images from Landsat 4-5 TM dated May 30, 1987 at the sites “Gorbillakh” (в) and “Durai” (г)

каждого полигона была вычислена площадь. Валидация порогового значения NDWI проводилась с помощью сравнения космических снимков и фотографий с камер одинаковых дат, установленных на исследуемых наледных участках.

С целью выяснения погрешности расчета площади наледей с помощью индекса NDWI выполнено сравнение ее со значениями индекса NDSI. Последний был рассчитан на основе майско-июньских космоснимков Sentinel-2 2021 и 2022 гг., так как в это время снежный покров стаивает и наледь выглядит наиболее контрастно на изображениях.

Результаты исследований

На участке «Горбыллах» наледееобразующие воды фиксировались на космоснимках с 13 декабря 2020 г. по 24 января 2021 г. и с 21 февраля по 2 мая 2021 г. (рис. 5). В отличие от предыдущего зимнего периода в зиму 2021–2022 гг. появление воды на дневной поверхности отмечалось раньше, с 8 ноября по 13 декабря 2021 г., с 9 января

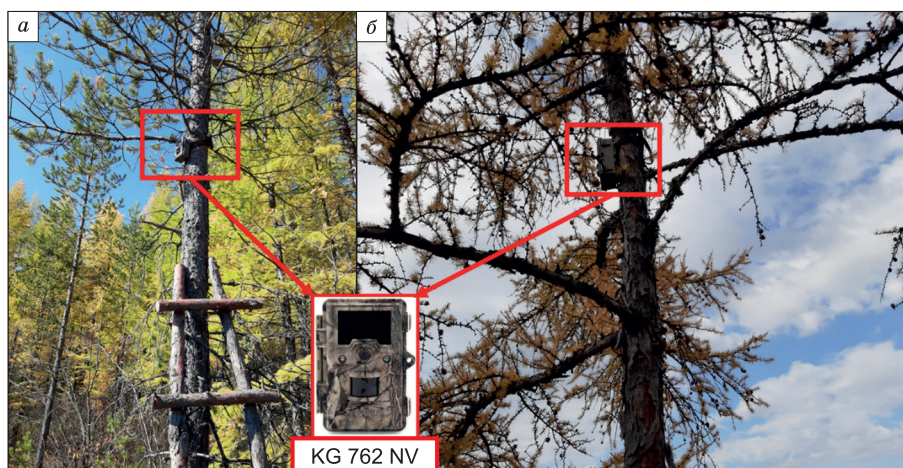


Рис. 4. Установленные автоматизированные фотокамеры KeepGuard (KG) 762 NV на участках «Дурай» (а) и «Горбыллах» (б)

Fig. 4. KeepGuard (KG) 762 NV automated cameras installed at the “Durai” (a) and “Gorbillakh” (b) sites

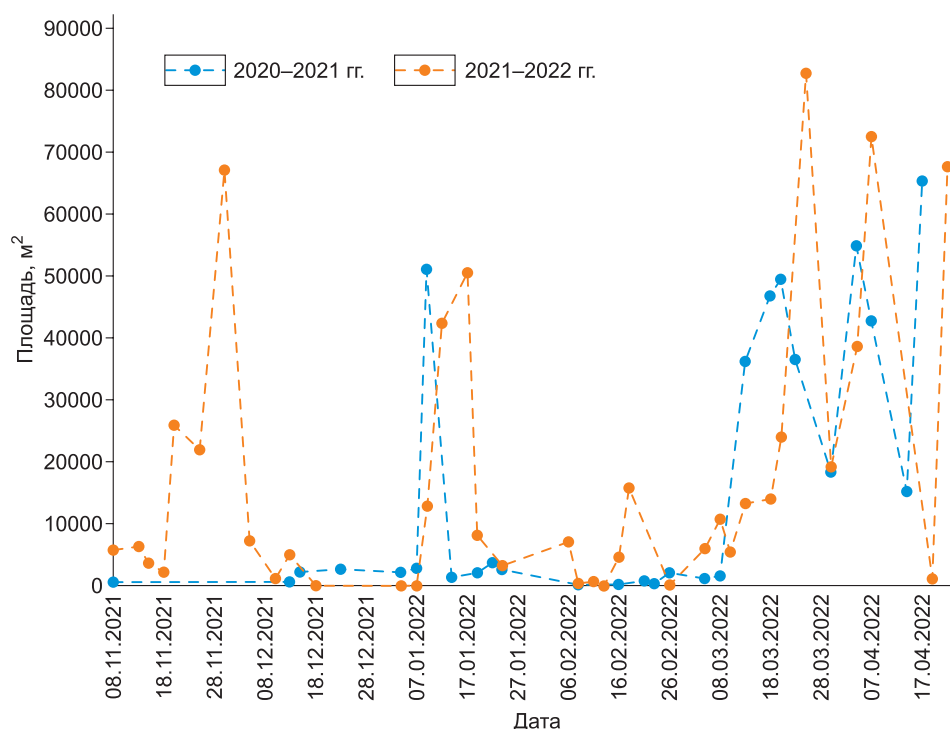


Рис. 5. График изменения площади растекшихся по долине реки наледообразующих вод по данным индекса NDWI в зимы 2020–2021 гг. и 2021–2022 гг. на участке «Горбыллах»

Fig. 5. Graph depicting the variations in the area of aufeis-forming waters distributed along the river valley according to the NDWI index during the winters of 2020–2021 and 2021–2022 at the “Gorbillakh” site

по 11 февраля 2022 г. и с 16 февраля по 22 апреля 2022 г. (см. рис. 5).

В зиму 2020–2021 гг. питание (приращение объема) исследуемой наледи условно можно разделить на два периода: декабрь–январь и февраль–май. В первом периоде максимальная пло-

щадь растекшейся по пойме реки воды была зафиксирована 9 января 2021 г. и составила 51 082 м². Во втором периоде максимальная площадь была отмечена 17 апреля 2021 г. и достигла 65 355 м².

Зимой 2021–2022 гг. питание природно-техно-

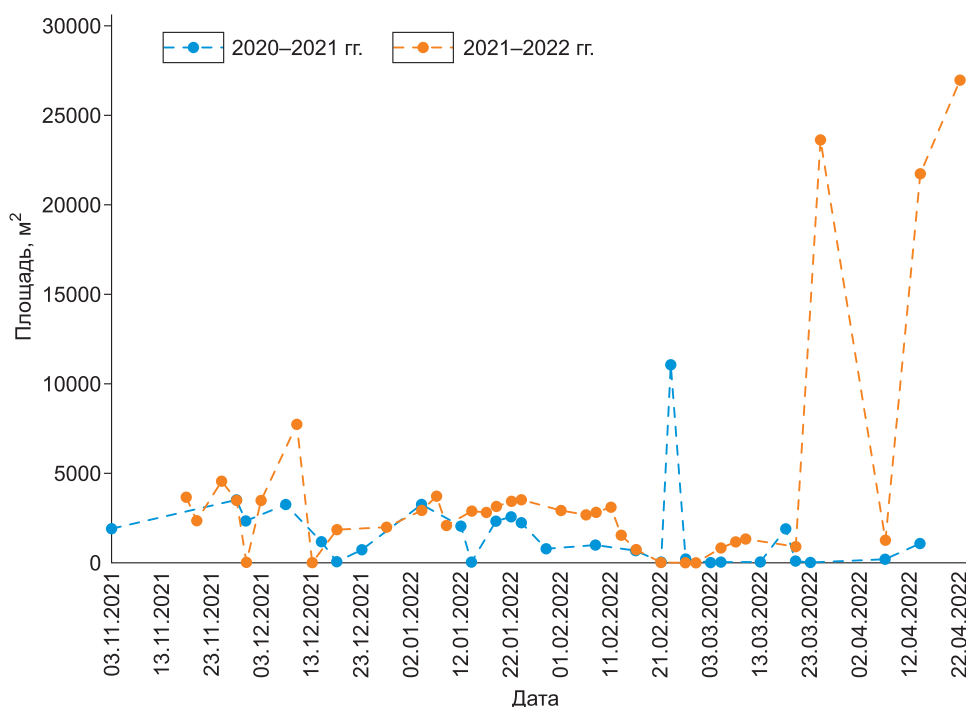


Рис. 6. График изменения площади растекшихся в долине реки наледеобразующих вод по данным индекса NDWI в зимы 2020–2021 и 2021–2022 гг. на участке «Дурай»

Fig. 6. Graph depicting the variations in the area of aufeis-forming waters distributed along the river valley according to the NDWI index during the winters of 2020–2021 and 2021–2022 at the “Durai” site

периода: 1) ноябрь–декабрь; 2) январь–февраль; 3) февраль–апрель. В первом периоде максимальная площадь, занимаемая наледеобразующими водами, была зафиксирована 30 ноября 2021 г. и составила 67 076 м², во втором – 17 января 2022 г., 50 545 м², в третьем – 25 марта 2022 г., 82 799 м². Максимальные (кумулятивные) площади растекшихся по долине р. Горбыллах наледеобразующих вод в зимы 2020–2021 и 2021–2022 гг. составили 73 607 и 121 752 м² соответственно.

На участке «Дурай» дешифрирование космоснимков показало, что в зимний период 2020–2021 гг. наледеобразующие воды в долине реки изливались с 3 ноября по 15 декабря 2020 г., с 23 декабря 2020 г. по 16 февраля 2021 г., с 23 по 26 февраля 2021 г., с 5 по 20 марта 2021 г. и с 7 по 14 апреля 2021 г. (рис. 6). В зиму 2021–2022 гг. изливы подземных вод происходили с 18 ноября по 10 декабря 2021 г., с 18 декабря 2021 г. по 16 февраля 2022 г. и с 5 марта по 22 апреля 2022 г. (см. рис. 6).

В обе зимы 2020–2021 и 2021–2022 гг. питание наледи на этом участке можно разделить на три периода: 1) ноябрь–декабрь; 2) декабрь–февраль; 3) март–апрель.

В первом периоде в зиму 2020–2021 гг. максимальная площадь наледи была зафиксирована 28 ноября 2020 г. и равнялась 3 488 м², а в зиму 2021–2022 гг. – 10 декабря 2021 г. со значением 7 753 м².

Во втором периоде в зиму 2020–2021 гг. максимальная площадь формирующейся наледи отмечалась 23 февраля 2021 г. и равнялась 11 052 м², а в зиму 2021–2022 гг. – 7 января 2022 г. и составила 3 729 м².

В третьем периоде в зиму 2020–2021 гг. максимальная площадь ПТН была зафиксирована 18 марта 2021 г. и равнялась 1 920 м², а в зиму 2021–2022 гг. – 22 апреля 2022 г. и составляла 26 988 м². Кумулятивная площадь растекшихся по долине притока р. Дурай наледеобразующих вод в зимы 2020–2021 и 2021–2022 гг. составила соответственно 14 505 и 35 676 м².

На территории Южной Якутии значительное выпадение атмосферных осадков (более 300 мм) в летне-осенний период зимой вызывает увеличение размеров крупных ключевых наледей до 30 %, а мелких грунтовых наледей в несколько раз [10]. Так, увеличение площади наледей на обоих исследуемых участках в зиму 2021–2022 гг. связано с тем, что лето в 2021 г. было более

**Основные климатические параметры,
влияющие на наледообразование,
по данным метеостанции «Чульман» [17]**

**The main climatic parameters
influencing the formation of aufeis,
according to the data
of the weather station “Chulman” [17]**

Зимний период	Мощность снега, см	Сумма $T_{\text{воздуха}}$, °C	Осадки, мм
2020–2021 гг.	52	–4053,6	299
2021–2022 гг.	50	–3831,5	505

влажным, чем лето 2020 г. (см. таблицу). Это привело к увеличению влагозапасов наледообразующих подземных вод и, как следствие, повышению размеров самих наледей.

Обсуждение результатов

На участке «Горбыллах» наледь формируется за счет грунтовых вод и подземных вод глубокой циркуляции. Косвенно об этом свидетельствует геологическое строение участка (рис. 7). Долина р. Горбыллах протягивается вдоль тектонического разлома, дренирующего подземные воды глубокого залегания, а четвертичные аллювиальные отложения являются коллектором грунтовых вод.

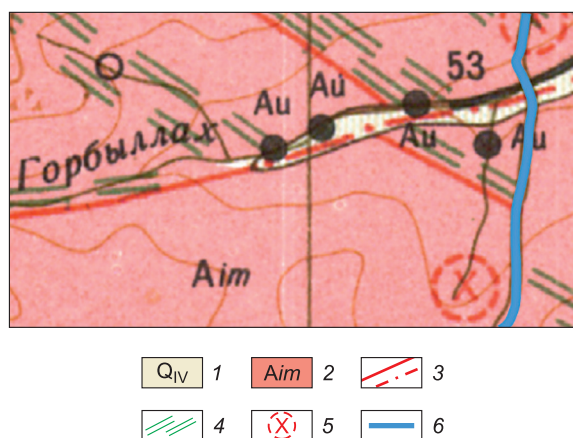


Рис. 7. Фрагмент геологической карты листа О-51-XXXV [18].

1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – архейские метаморфические горные породы; 3 – тектонические разломы; 4 – дифторированные породы; 5 – хлоритизация; 6 – автодорога «Лена»

Fig. 7. Fragment of the geological map corresponding to sheet O-51-XXXV [18].

1 – Quaternary alluvial deposits; 2 – Archean metamorphic rocks; 3 – tectonic faults; 4 – difluorinated rocks; 5 – chloritization; 6 – Lena Highway

Сооружение дорожной насыпи привело к изменению формы наледи в долине реки на данном участке [9, 13]. Наледь, достигая насыпи, стала формироваться вдоль нее в виде полосы шириной до 500 м, покрывая участки долины, где ранее не отмечалось наледообразования.

В настоящее время стало также наблюдаться формирование наледи около мостового перехода ФАД «Лена». Так в апреле 2021 г. длина наледи составляла 405 м, а в апреле 2022 г. – 478 м. Динамика ареалов появления наледообразующих вод в долине реки в течение всей зимы свидетельствует о существенной разгрузке подземных вод на данном участке. Это косвенно свидетельствует о высоких влагозапасах подрусловых таликов и значительных их ресурсах (рис. 8, а, б).

На участке «Горбыллах» в 17 апреля 2021 г. кумулятивная площадь наледи по NDWI составила 73 607 м², а в 22 апреля 2022 г. – 121 752 м². По снежному индексу NDSI 01.06.2021 г. площадь наледи равнялась 36 905 м², а 19.05.2022 г. – 135 328 м². В 2021 г. различие величин площади ПТН, полученных с помощью индексов NDSI и NDWI, можно объяснить отсутствием пригодных для дешифрирования майских снимков 2021 г. из-за высокой облачности на них. Разница дат рассчитанных величин площадей ПТН по NDWI и NDSI составила 45 дней. Учитывая небольшую мощность наледи в 2021 г. (1,6 м) и ее абляцию, начатую с 1 мая, можно предположить, что величины площади наледи, рассчитанные по индексам NDSI и NDWI, имеют удовлетворительную сходимость. В 2022 г. значение площади ПТН, рассчитанное по NDWI, меньше на 10 % (или на 13 576 м²), чем таковая по индексу NDSI. Учитывая, что пространственное разрешение каналов, используемых при расчете NDWI и NDSI, различается в 2 раза, то расхождение величин площадей в 10 % является весьма удовлетворительным (рис. 8, в, г).

Наледь на участке «Дурай» стала ежегодно формироваться после строительства автодороги. Питание наледи осуществляется за счет грунтовых вод, приуроченных к подрусловому талику. Основной причиной ее формирования явилось существенное снижение площади поперечного сечения подруслового потока в результате возведения автодороги. Ширина простирающейся наледи вдоль дорожной насыпи в апреле 2021 м составила 194 м, а в апреле 2022 г. – 216 м. Сезонное промерзание увлажненных грунтов служит причиной деформаций

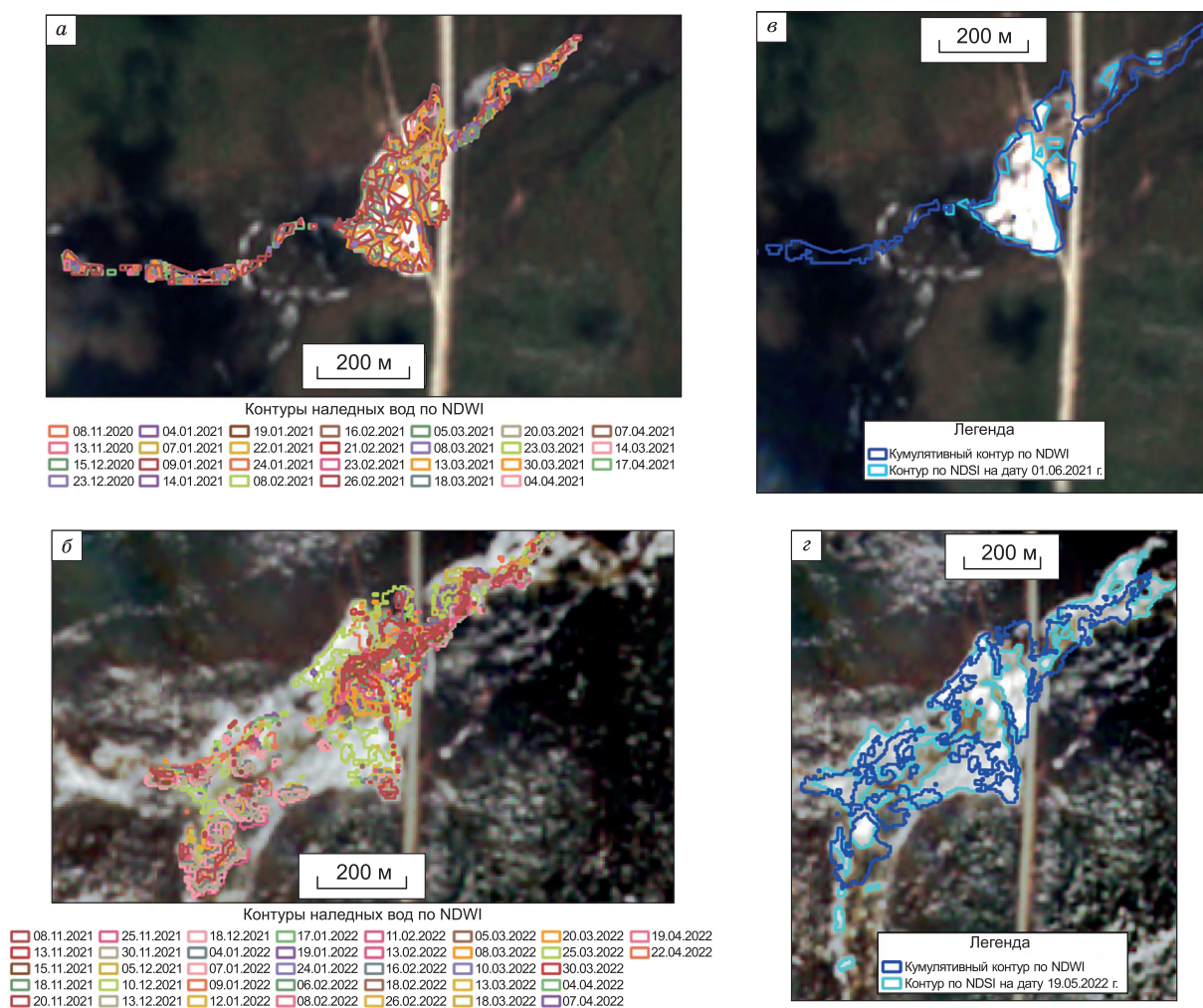


Рис. 8. Контуры наледеобразующих вод, выпшедшие на дневную поверхность в зимы 2020–2021 (а) и 2021–2022 гг. (б). Кумулятивные контуры по NDWI в зимы 2020–2021 (в), 2021–2022 гг. (з) и контуры по NDSI на даты 01.06.2021 г. (в), 19.05.2022 г. (з). Космоснимки Sentinel-2 на даты 01.06.2021 г. (а, в) и 19.05.2022 г. (б, з)

Fig. 8. The contours of aufeis-forming waters that emerged at the surface in the daytime during the winters of 2020–2021 (a) and 2021–2022 (б). Cumulative contours based on the NDWI for the winters of 2020–2021 (в), 2021–2022 (з) and contours derived from the NDSI dated June 1, 2021 (в), and May 19, 2022 (з). Sentinel-2 satellite images dated June 1, 2021 (a, в) and May 19, 2022 (б, з)

дорожного полотна на данном участке. Основными проблемами эксплуатации автодороги являются образование просадок ее поверхности и формирование трещин бортового отпора. Наледь здесь формируется в течение всей зимы, но в отличие от участка «Горбыллах» ее размеры значительно меньше. Динамика формирования этой наледи в течение всей зимы указывает на интенсивную разгрузку наледеобразующих вод в марте–апреле и реже в феврале (рис. 6 и 9, а, б).

На участке «Дурай» 14 апреля 2021 г. кумулятивная площадь наледи по NDWI составила 14 505 м², а в апреле 2022 г. – 35 676 м². По снежному индексу NDSI 19.05.2021 г. площадь наледи

равнялась 6 948 м², а 19.05.2022 г. – 14 268 м² (рис. 9, в, з). Разница дат рассчитанных величин площадей по NDWI и NDSI составила 35 дней. Разница величин площадей, рассчитанных по NDWI и NDSI, на 50–60 % связана с резким уменьшением площади наледи (рис. 9, д, е) и накоплением талых вод над ним (рис. 9, ж, з). Для более детальной оценки этих факторов необходимо проведение дополнительных исследований.

Закключение

В результате проведенных исследований впервые доказана возможность применения индекса

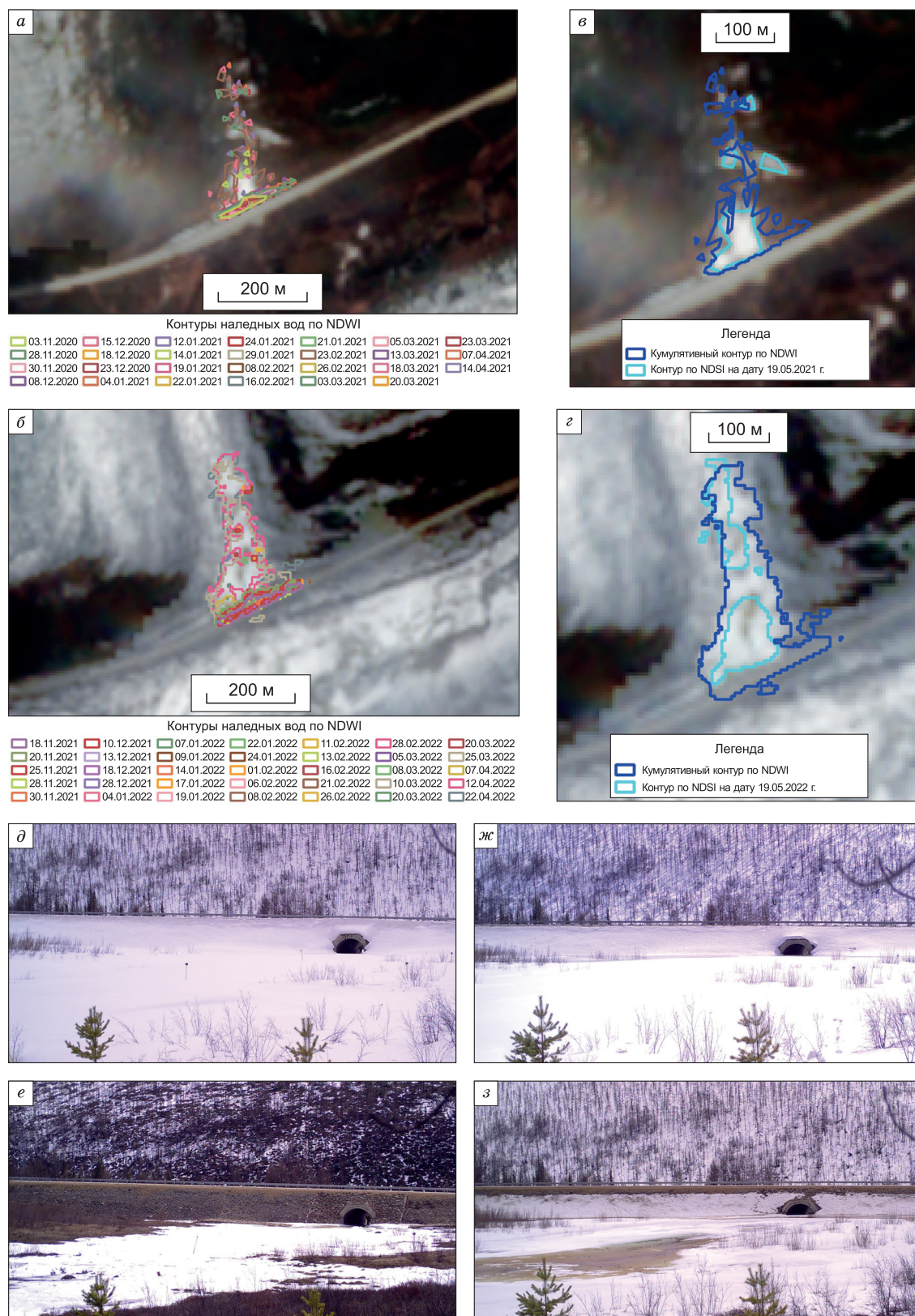


Рис. 9. Космоснимки Sentinel-2 на даты 19.05.2021 г. (а, в) и 19.05.2022 г. (б, г). Контурь наледообразующих вод, вышедшие на дневную поверхность в зимы 2020–2021 гг. (а) и 2021–2022 гг. (б). Кумулятивные контурь по NDWI в зимы

2020–2021 гг. (б), 2021–2022 гг. (з) и контуры по NDSI на даты 19.05.2021 г. (б), 19.05.2022 г. (з). Фотографии KG 762 NV на участке «Дурай» на даты 01.05.2021 г. (д), 19.05.2021 г. (е), 01.05.2021 г. (ж) и 19.05.2022 г. (з).

Fig. 9. Sentinel-2 satellite images dated May 19, 2021 (a, б) and May 19, 2022 (б, з) illustrate the contours of aufeis-forming waters that surfaced during the daytime in the winters of 2020–2021 (a) and 2021–2022 (б). The cumulative NDWI contours for the winters of 2020–2021 (б) and 2021–2022 (з) and NDSI contours dated of May 19, 2021 (б) and May 19, 2022 (з). The photographs of KG 762 NV at the “Durai” site dated May 1, 2021 (д), May 19, 2021 (е), May 1, 2022 (ж), and May 19, 2022 (з).

NDWI для определения площадей наледей, выполнено сравнение их величин с рассчитанными по индексу NDSI.

Преимуществами использования индекса NDWI являются независимость идентификации границ наледей от наличия или отсутствия снежного покрова на космоснимках, возможность выявления внутригодовой динамики роста наледей и установление контуров растекания наледебразующих вод.

К недостаткам использования этого водного индекса стоит отнести наличие облачности на космических изображениях, перекрывающей объект исследования, неоднозначную интерпретацию затененных участков наледей поляны, где индекс NDWI интерпретирует наличие воды на поверхности ландшафта. Вдобавок данный водный индекс при наличии обводненного слоя в нижней части разреза снежного покрова не позволяет обнаружить воду при дешифрировании.

По данным расчетов площадей наледей на двух участках «Горбыллах» и «Дурай» в зимы 2020–2021 гг. и 2021–2022 гг. с применением индексов NDWI и NDSI разница их значений составила от 10 до 60 %. Для получения более точных результатов необходимо проведение дополнительных натурных исследований, включающих оценку скорости абляции наледей, установление пространственных границ наледевого льда и растекавшихся наледебразующих вод под снежным покровом.

Использование индекса NDWI показало весьма хорошую перспективу при идентификации границ и картирования наледей как самостоятельный или дополнительный метод.

Список литературы / References

1. Шепелев В.В. Наледи. В кн.: Иванов В.Н. (ред.) *Якутия: Природа. История. Этнография. Современность: историко-культурный атлас*. М.: Феория: Дизайн. Информация. Картография; 2007. С. 88–89.
2. Shepelev V.V. Aufeis. In: Ivanov V.N. (ed.) *Yakutia: Nature. History. Ethnography. Modernity: historical and cultural atlas*. Moscow: Feoria: Design. Information. Cartography; 2007, pp. 88–89. (In Russ.)
3. Иванова Л.Д., Самсонова В.В. Формирование техногенных наледей на линейных сооружениях в пре-

делах Приленского плато. В кн.: Осипов В.И., Максимович Н.Г., Барях А.А. и др. (ред.) *Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, г. Пермь, 2–4 апреля 2019*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2019. С. 423–427.

Ivanova L.D., Samsonova V.V. Formation of technogenic aufeis on linear structures within the Lena plateau. In: Osipov V.I., Maksimovich N.G., Baryax A.A., et al. (eds.) *Sergeev readings: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology, Perm, April 2–4, 2019*. Perm: Perm State University; 2019, pp. 423–427. (In Russ.)

3. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным. *Лёд и Снег*. 2019;59(2):201–212. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>

Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Aufeis of the Indigirka River Basin according to the recent Landsat satellite images and historical data. *Ice and Snow*. 2019;59(2):201–212. (In Russ.) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>

4. Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н. и др. *Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России*. Новосибирск: СО РАН; 2021. 302 с.

Alekseev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N., et al. *Atlas of giant aufeis-taryn of the North-East of Russia*. Novosibirsk: SB RAS; 2021. 302 p. (In Russ.)

5. Gagarin L., Wu Q., Cao W., Jiang G. Icings of the Kunlun Mountains on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, Western China: origins, hydrology and distribution. *Water*. 2022;14(15):2396. <https://doi.org/10.3390/w14152396>

6. Рылов С.А., Пестунов И.А. Определение площадей озер по данным со спутников серии Sentinel-2. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2019;12(5):526–535. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0108>

Rylov S.A., Pestunov I.A. Assessment of lakes areas by Sentinel-2 satellite data. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2019;12(5):526–535. (In Russ.) <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0108>

7. Долгополов Д.В. Методика обнаружения водных объектов в зоне трубопроводов при паводках по данным космического мониторинга. *Мониторинг. Наука и технологии*. 2021;1(47):75–83 <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.47.009>

Dolgoplov D.V. Methods for detecting water objects in the pipelines zone during floods based on space monitoring data. *Monitoring. Science and technologies*. 2021; 1(47):75–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.47.009>

8. Петров В.Г. *Наледи на Амурско-Якутской магистрали, с альбомом планов наледей*. Л.: АН СССР; 1930. 177 с.

Petrov V.G. *Aufeis on the Amur-Yakutsk highway, with an album of plans for aufeis*. Leningrad: USSR Academy of Sciences; 1930. 177 p. (In Russ.)

9. Алексеев В.Р., Усов В.А. Влияние наледей на инженерные сооружения Амуро-Якутской магистрали. В кн.: Пальшин Г.Б. (ред.) *Материалы по мерзлотоведению Сибири и Дальнего Востока*. Иркутск; М.; 1964. С. 93–97.

Alekseev V.R., Usov V.A. The influence of aufeis on engineering structures of the Amur-Yakutsk highway. In: Palshin G.B. (ed.) *In: Materials on permafrost science of Siberia and the Far East*. Irkutsk; Moscow; 1964, pp. 93–97.

10. Бойцов А.В. Об особенностях развития многолетнемерзлых пород и наледей подземных вод в бассейне р. Иенгры (трасса БАМа). В кн.: Некрасов И.А. (ред.) *Региональные и криолитологические исследования в Сибири*. Якутск : Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1979. С. 98–107.

Boytsov A.V. The distinctive characteristics of permafrost and groundwater aufeis development. In: Nekrasov I.A. (ed.) *Regional and cryolithological studies in Siberia*. Yakutsk: Permafrost Institute, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1979, pp. 98–107. (In Russ.)

11. Вельмина Н.А., Узембло В.В. *Гидрогеология центральной части Южной Якутии*. М.;Л.: АН СССР; 1959. 179 с.

Velmina N.A., Uzemblo V.V. *Hydrogeology of the central part of South Yakutia*. Moscow-Leningrad: USSR Academy of Sciences; 1959. 179 p. (In Russ.)

12. Фотиев С.М. *Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна*. М.: Наука; 1965. 230 с.

Fotiev S.M. *Groundwater and frozen rocks of the South Yakut coal basin*. Moscow: Nauka; 1965. 230 p. (In Russ.)

13. Алексеев В.Р. Наледи района трассы Амуро-Якутской магистрали. *Записки Забайкальского филиала Географического общества СССР*. 1972;85:62–81.

Alekseev V.R. Aufeis area of the Amur-Yakutsk highway. *Notes of the Transbaikalian Branch of the Russian Geographical Society*. 1972;85:62–81. (In Russ.)

14. *Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири. Масштаб 1:2 500 000*. Мельников П.И. (ред.) Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1980.

Map of permafrost and hydrogeological zoning of Eastern Siberia. Scale 1:2 500 000. Melnikov P.I. (ed.) Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1980. (In Russ.)

15. Алексеев В.Р., Соколов Б.Л. *Полевые исследования наледей*. Л.: Гидрометеониздат; 1980. 151 с.

Alekseev V.R., Sokolov B.L. *Field research of aufeis*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1980. 151 p. (In Russ.)

16. Топчиев А.Г., Гаврилов А.В. Космические методы изучения и картирования наледей (На примере Южной Якутии). В кн.: *Наледи Сибири и Дальнего Востока*. Новосибирск: Наука; 1981. С. 64–71.

Topchiev A.G., Gavrilov A.V. Space methods for studying and mapping aufeis (Case study of Southern Yakutia). In: *Aufeis of Siberia and the Far East*. Novosibirsk: Nauka; 1981, 64–71 pp. (In Russ.)

17. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. *Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR)*. Доступно: <http://meteo.ru> (дата обращения: 22.03.2023)

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. *Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR)*. Available: <http://meteo.ru> (date of access: 22.03.2023)

18. *Геологическая карта СССР. Масштаб: 1:200000. Серия Алданская. Лист О-51-XXXV*. Дзевановский Ю.К. (ред.) Л.: Ленинградская картфабрика ВАГТ; 1965.

Geological map of the USSR. Scale: 1:200000. Aldan series. Sheet O-51-XXXV. Dzevanovsky Yu.K. (ed.) Leningrad: Leningrad Cart Factory VAGT; 1965.

Об авторах

БАИШЕВ Нюргун Егорович, аспирант, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7135-3899>, ResearcherID: AAF-6965-2021, SPIN: 5657-7610, e-mail: nyurgunbaishev@mail.ru

ГАГАРИН Леонид Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5354-084X> ResearcherID: AAF-8768-2021, Scopus Author ID: J-4238-2018, SPIN: 5751-8293, e-mail: gagarinleo@yandex.ru

ШЕПЕЛЕВ Виктор Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3434-6969>, ResearcherID: P-8179-2018, Scopus Author ID: 7003566339, SPIN: 7114-0941, e-mail: sheply@mpi.ysn.ru

Вклад авторов

Баишев Н.Е. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация; **Гагарин Л.А.** – редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования; **Шепелев В.В.** – редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

BAISHEV, Nyurgun Egorovich, Post-Graduate Student, Junior Scientific Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7135-3899>, ResearcherID: AAF-6965-2021, SPIN: 5657-7610, e-mail: nyurgunbaishev@mail.ru

GAGARIN, Leonid Aleksandrovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Scientific Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5354-084X>, ResearcherID: AAF-8768-2021, Scopus Author ID: J-4238-2018, SPIN: 5751-8293, e-mail: gagarinleo@yandex.ru

SHEPELEV, Viktor Vasilyevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3434-6969>, ResearcherID: P-8179-2018, Scopus Author ID: 7003566339, SPIN: 7114-0941, e-mail: sheply@mpi.ysn.ru

Authors' contribution

Baishev N.E. – conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, data curation, writing – original draft, visualization; **Gagarin L.A.** – writing – review & editing, supervision, project administration, funding acquisition; **Shepelev V.V.** – writing, review & editing, visualization, supervision

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 29.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 28.05.2024

Принята к публикации / Accepted 26.06.2024