

КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 4, с. 64–74

<https://www.sibran.ru>

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 551.345; 556.3
DOI: 10.15372/KZ20250405
EDN: UVONNY

**МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ ОЦЕНКИ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАЛЕДЕЙ**

А.А. Осташов^{1,*}, О.М. Макарьева¹, А.В. Мазурок², Н.В. Нестерова¹, А.А. Землянскова¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

² ООО “АФС Лидер”, 195277, Санкт-Петербург, Пироговская наб., 21, Россия

** Автор для контакта; e-mail: andrey.ostashov@gmail.com*

Наледи широко распространены в криолитозоне. Оценка их морфометрических характеристик связана с техническими трудностями, значительными временными и трудовыми затратами при использовании контактных полевых методов. В статье предлагается методика определения площади и объема наледи методом аэрофотосъемки с использованием постобработки данных с глобальных навигационных спутниковых систем, которая позволяет достигать сантиметровой точности определения высотных и плановых координат. На основе данных полевых работ на Анмангындинской наледи в 2021–2023 гг., включающих результаты 21 аэрофотосъемки как в период образования, так и в период стаивания наледи при помощи беспилотных авиационных систем, а также материалов наземных геодезических высокоточных профилей были рассчитаны площади и объемы объекта на даты съемок. Максимальный объем наледи изменялся от 6.71 млн м³ 30.03.2023 г. до 5.17 млн м³ 24.03.2022 г. и составил 5.41 млн м³ 24.05.2021 г. Рассчитанная средневзвешенная толщина льда варьируется от 0.50 до 1.69 м. Средняя погрешность определения средней толщины наледи методом аэрофотосъемки по сравнению с наземными геодезическими измерениями после выявления и корректировки систематической ошибки составляет 11 %. Сравнительный анализ площади наледи по спутниковым снимкам Sentinel-2 и аэрофотосъемке показал, что погрешность определения площади по космическим снимкам в бесснежный период составляет 11 %, в период залегания снежного покрова – 38 %.

Ключевые слова: наледь, Анмангындинская наледь, беспилотные авиационные системы, аэрофотосъемка, объем наледи, площадь наледи.

Ссылка для цитирования: Осташов А.А., Макарьева О.М., Мазурок А.В., Нестерова Н.В., Землянскова А.А. Методика применения беспилотных авиационных систем для оценки морфометрических характеристик наледей // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 4, с. 64–74. DOI: 10.15372/KZ20250405. EDN: UVONNY.

**METHOD OF USING UNMANNED AERIAL SYSTEMS FOR ASSESSMENT
OF MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF AUFÉIS**

A.A. Ostashov^{1,*}, O.M. Makarieva¹, A.V. Mazurok², N.V. Nesterova¹, A.A. Zemlianskova¹

¹ Saint Petersburg State University, Universitetskaya nab.,

7–9, Saint Petersburg, 199034 Russia

² AFS Lider LLC, Pirogovskaya nab. 21, Saint Petersburg, 195277 Russia

**Corresponding author; e-mail: andrey.ostashov@gmail.com*

Auféis are widespread in the permafrost zone. Morphometric characteristics are indicators of the auféis dynamics and can be used in theoretical research and for practical purposes. Their assessment is associated with technical difficulties, significant time and labor costs when using contact field methods. In this paper, we propose a technique for determining the area and volume of auféis by aerial photography using post-processing of data from global navigation satellite systems. It makes it possible to achieve centimeter accuracy in determining altitude and plan coordinates. The areas and volumes of the object on the dates of surveys were calculated based on the data of field work at the Anmangyndinskaya auféis during 2021–2023. A total of 21 aerial photographs were processed during both the formation and melting periods of auféis using unmanned aerial systems and materials from high-precision ground geodetic profiles. The maximum ice volume varied from 6.71 million m³ on 30.03.2023 to 5.17 million m³ on 24.03.2022, and amounted to 5.41 million m³ on 24.05.2021. The calculated weighted average of ice thickness varies from 0.50 to 1.69 m. The mean error in determining the average auféis thickness by aerial photography compared to ground-based geodetic measurements is 11 % after identifying and

© А.А. Осташов, О.М. Макарьева, А.В. Мазурок, Н.В. Нестерова, А.А. Землянскова, 2025

adjusting for the systematic error. A comparative analysis of the aufeis area was performed using Sentinel-2 satellite images and aerial photography. The error in determining the area using space images during the snow-free period is 11 %, and during the period of snow cover – 38 %.

Keywords: aufeis, Anmangyndinskaya aufeis, unmanned aerial systems, aerial photography, aufeis volume, aufeis area.

ВВЕДЕНИЕ

На территории многолетней мерзлоты широкое распространение получили наледи подземных вод – слоистые ледяные массивы, образующиеся при замерзании природных вод у постоянно действующих родников в пределах одних и тех же участков земной поверхности [Алексеев и др., 2021]. Наледи влияют на внутри- и межгодовое перераспределение речного стока [Соколов, 1975], а также являются участками развития опасных явлений, оказывающих влияние на жизнедеятельность человека, таких как термокарст, термоэрозия, криогенное пучение и т. д. Кроме того, наледи представляют собой важный возобновляемый водно-ледовый ресурс [Алексеев и др., 2021].

В последнее десятилетие отмечается изменчивость процессов наледеобразования в различных природно-климатических условиях, признаки которой можно использовать для индикации комплексного состояния многолетней мерзлоты в труднодоступных районах [Алексеев, 2016; Makarieva et al., 2019; Gagarin et al., 2020]. Важными характеристиками, позволяющими судить о динамике наледных процессов, являются площадь и объем наледи. Оценка динамики объема льда наледей наземными методами является трудоемкой задачей, применение беспилотных авиационных систем (БАС) позволяет упростить ее решение.

В последнее время БАС все чаще используют при исследовании различных географических объектов из-за относительной доступности, высокой скорости съемки и качества получаемой информации [Черноморец, 2018; Colomina, 2014; Sheremetskaya, 2018]. Метод применяют и для проведения наблюдений за наледями [Гагарин и др., 2017; Gagarin et al., 2020]. Оценка погрешности определения морфометрических характеристик наледей при помощи БАС приведены в [Gagarin et al., 2020]. В исследовании [Grib et al., 2020] произведен мониторинг площади наледи с помощью БАС в период нарастания. В работах [Alfredsen et al., 2018; Rødtang et al., 2021] представлен опыт использования БАС для оценки ледовой обстановки на реках.

Благодаря использованию фотограмметрических технологий с помощью БАС можно получить объективные геометрические характеристики наледи. Периодичность съемки позволяет обеспечивать мониторинг изучаемого процесса или явления [Grib et al., 2020]. Также БАС является существенным дополнением при комплексном исследовании объекта. Первичной разведкой на основе

БАС можно определить расположение источников и бугров пучения для формирования и корректирования программы исследований, включающей отбор проб, точечные наблюдения за нарастанием и ставлением льда и др. [Макарьева и др., 2021]. Данные БАС также используются для заверки спутниковых данных.

Изучение наледей чаще всего происходит в арктической зоне или на приравненных к ней по климатическим условиям территориях, что накладывает дополнительные ограничения и создает специфические условия для работы [Ходак и др., 2021].

Цель исследования – усовершенствовать и апробировать методику применения БАС для мониторинга процессов формирования и ставления гигантских наледей на примере Анмангындинской наледи (Магаданская область).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

К основным задачам, решаемым с помощью БАС в вопросах наледеведения, можно отнести: определение морфометрических характеристик и их динамики в пространстве и времени; составление ландшафтных карт наледных полян; оценку русловых процессов в зоне наледеобразования; идентификацию мест разгрузки наледеобразующих вод путем дешифрирования бугров пучения.

Факторы, определяющие качество съемки. Важными факторами качества получаемой информации являются степень перекрытия кадров, скорость движения беспилотника, модель камеры, время суток и погодные условия.

Высота съемки определяет пространственное разрешение получаемых в результате обработки ортофотоплана и цифровой модели рельефа (ЦМР). Съемка по заранее запланированным маршрутам обеспечивает равномерность покрытия объекта кадрами, повышая надежность получаемого результата, что особенно важно для мониторинга объекта.

Контроль светочувствительности (ISO) обеспечивает отсутствие засветов и достаточную детализацию снимков. При $ISO > 500$ (применимо к камере DJI Phantom 4 pro v.2) с высокой долей вероятности наледь будет засвеченна, и при обработке алгоритм не будет находить общих точек поверхности на смежных снимках. Такая же проблема возникает при выпадении на поверхность наледи снега, создающего монотонную сложно дешифрируемую поверхность.

Подготовка к съемке. Границы съемки определяются исходя из конфигурации наледной поляны при условии, что на границу наледной поляны приходится несколько снимков. Это можно сделать с помощью дешифрирования спутниковых снимков. Далее, в проектировщике полетных заданий (например, [<https://fly.teofly.com/>]) создается проект (рис. 1, а), в котором рассчитывается покрытие зоны исследования маршрутами беспилотника с учетом бокового и продольного перекрытия кадров, скорости беспилотника, частоты съемки, высоты полета. Значения этих параметров задаются исходя из площади и формы наледи, требуемой точности получаемых в процессе съемки данных, инструкции по применению БАС, временных и человеческих ресурсов.

Для проведения настоящего исследования была использована высота съемки 150 м над точкой взлета. Итоговое разрешение ортофотоплана составляло 4.1 см, что позволяло рассчитывать морфометрические характеристики с высокой точностью. Поперечное перекрытие составляло 55 %, продольное – 89 %. Съемка производилась в надире. Средняя скорость движения БАС составляла 9 м/с. В качестве БАС использовался DJI Phantom 4 pro, модернизированный набором Teokit.

Производство съемки. Съемка производилась в полетном программном обеспечении (ПО),

была использована программа Litchi (см. рис. 1, в). Для проведения работ необходимо выбрать подходящие условия освещения и погодные условия (отсутствие сильного ветра, осадков, тумана, температуры воздуха ниже -40°C). Перед съемкой устанавливается антенна, использующая глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), на запись статических наблюдений с частотой 1 Гц или чаще, при этом необходимо обеспечить ее работоспособность в течение всего периода съемки. Для статических наблюдений авторами использовался приемник PrinCe i50. При низких температурах воздуха для непрерывности данных стационарный приемник утеплялся специальным чехлом, внутри которого закладывались химические тепловые стельки, также осуществлялась “горячая” замена аккумуляторов в ГНСС-приемнике спустя 2.5 часа работы. На антенну беспилотника при этом задается запись с частотой 5 или 10 Гц. При отсутствии внештатных ситуаций съемка происходит по полетному заданию с возвращением на точку взлета для замены аккумуляторов при необходимости. В зимний период расход энергии аккумуляторов остается прежним (даже при температуре -50°C). Для корректной работы температура аккумулятора должна быть выше 0°C , при необходимости аккумулятор следует прогреть.

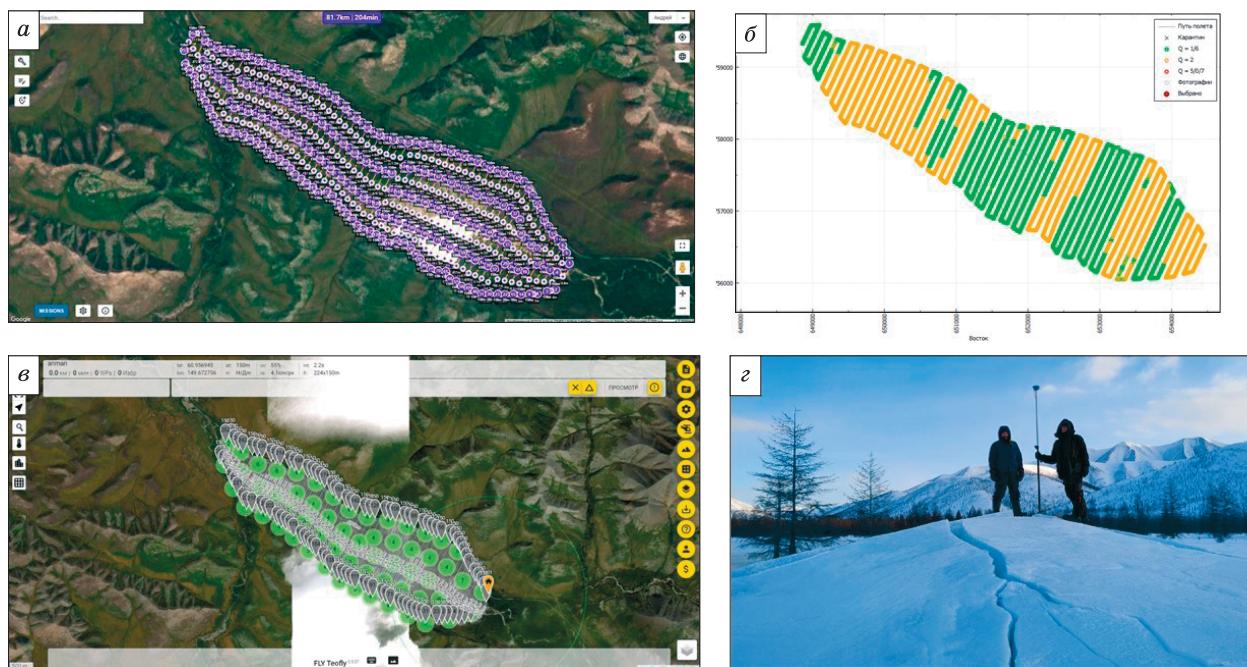


Рис. 1. Подготовка к проведению исследований, обработка результатов и геодезическое профилирование Аймангандинской наледи.

а – формирование полетного задания в веб-интерфейсе [<https://fly.teofly.com/>]; б – скриншот из программы Teobox, присваивание уточненных координат центрам снимков; в – скриншот из полетной программы Litchi с проектом Аймангандинской наледи; г – проведение геодезического профилирования на Аймангандинской наледи, 2022 г.

Для оценки точности назначаются опорные точки и измеряются их координаты с помощью ГНСС-съемки в режиме Real Time Kinematic (RTK). Для этой задачи использовался приемник PrinCe i30. В качестве опорных точек на наледи можно использовать нанесение отличительного знака баллончиком с краской на поверхность льда при условии выполнения съемки в тот же день, однако при использовании опознавателей необходимо учитывать возможное протаивание льда при сильном нагревании поверхности опознавателя.

По завершении первой половины съемки производится скачивание фотографий с БАС и замена карты памяти на пустую для беспрепятственной записи новых данных (заполненность карты памяти не должна превышать 50 % во избежание пропуска записи). По окончании работы данные с БАС переносятся на жесткий диск компьютера или внешний жесткий диск. В программе Agisoft Metashape непосредственно с места съемки производится проверка полноты записи данных. В случае пропусков отдельные части полетного задания выполняются повторно.

Продолжительность съемки Анмангындинской наледи при отсутствии технических проблем в среднем составляет 4 ч. Съемка производится с использованием автомобиля при движении вдоль трассы, на которой размечены точки взлета БАС. Оптимальным является выполнение съемки командой в составе двух человек. Для полного выполнения маршрута съемки используются 8 аккумуляторов для БАС. Фотографии, полученные по результатам съемки (около 5000 шт.), имели общий размер около 40 Гб. Результаты статических наблюдений и данные с ГНСС-платы дрона также скачиваются с приборов на компьютер для последующей обработки. Вес данных файлов составляет не более 2 Гб. Зимой диапазон времени, пригодный для съемки, сильно ограничивается временем захода солнца, и в декабре составляет 6 ч (с 9:00 до 15:00). Наличие орографических препятствий еще больше усугубляет проблему нехватки света, а длинные тени негативно влияют на обработку аэрофотосъемки (АФС).

Обработка аэрофотосъемки. Камеральную обработку можно разделить на две части: геодезическую и фотограмметрическую. Первая часть представляет собой совместную обработку данных с ГНСС-приемника и ГНСС-устройства беспилотника, позволяющую уточнить координаты центров снимков для повышения точности получаемых ЦМР. Первый этап (PPK – post processing kinematic) производится в TEODOBOX PPK BOT и Teobox (см. рис. 1, б) или аналогах.

Камеральная обработка результатов съемки производится в фотограмметрическом программном обеспечении, например, Agisoft Metashape. Для определения площади наледи рассчитывается

ортофотоплан наледи, а для определения объема – цифровая модель рельефа, включающая поверхность наледи и земли. Характеристики полученных ЦМР и ортофотопланов зависят от задаваемой точности расчетов, высоты съемки, качества кадров. При наличии на наледи растительности (затопленный лес) и других препятствий необходимо выполнить фильтрацию данных (плотного облака точек), чтобы исключить влияние растительности на результат расчета ЦМР.

Поверхности полученных ЦМР сравниваются с отметками опорных точек. По результатам сравнения рассчитывается ошибка съемки, включая точность съемки опорных точек, систематические и случайные погрешности, проводится оценка условий съемки и задаваемых параметров с точки зрения влияния на точность ЦМР.

Расчет площадей. Средствами геоинформационных систем (ГИС) рассчитывается площадь объекта по дешифровочному признаку по ортотоплану. В исследовании для анализа использовалось ПО ArcGIS 10.6. Для выделения льда используется классификация пикселей раstra на кластеры по ISO и цвету. Для определения границ наледи на летних съемках применяется инструмент “Maximum Likelihood Supervised Classification”, учитывающий статистическое распределение и значения цветовых каналов в рамках одного кластера. Для его использования необходимо обучить модель распознавания при помощи оцифровки эталонных участков наледи и других определяемых объектов (лес, аллювиальные отложения, горные массивы, водная поверхность). Результатом работы инструмента является растр, разделенный на кластеры по параметрам, полученным в процессе обучения. Кластеры, относящиеся к наледи, конвертируются в векторный полигональный слой, который вручную очищается от ошибок, допущенных автоматическим методом обработки. После проверки и внесения исправлений определяется площадь полигона наледи методами пространственного анализа в прямоугольной системе координат, подходящей для данной местности (WGS_1984_UTM_Zone_55N в нашем случае).

При определении площади наледи в зимний период для уточнения границ необходимо учитывать несколько факторов. С помощью инструмента классификации можно выделить обводненные участки и участки льда без снега. На большей части наледи лед при наличии снежного покрова методом дешифрирования или классификации определить невозможно. Для дальнейшего уточнения границы следует использовать данные наземных наблюдений. В настоящем исследовании использовались профили, выполненные посредством ГНСС-съемки в режиме RTK (Real Time Kinematic) (см. рис. 1, г). При съемке приемник устанав-

ливается на земную поверхность, измеряются плановые координаты и высотная отметка. Одновременно производится фиксация типа подстилающей поверхности (лед, земля), измеряются толщина снежного покрова и глубина воды на поверхности в точке съемки.

Расчет объемов. Для расчета объема наледи предусмотрен алгоритм сравнения ЦМР, полученных по результатам двух съемок – с наледью и без наледи. Модели вычитаются друг из друга с целью получения растра значений, содержащих мощность наледи на дату съемки. Для этого используется инструмент геообработки в среде ArcGIS – “Raster calculator”. Для ускорения расчета можно изменять разрешение выходного растра и проводить расчет только в границе наледи на конкретную дату. При наличии на поверхности льда снежного покрова необходимо вычесть его толщину из полученного растра. Поскольку распределение снежного покрова на наледной поляне зимой крайне неравномерное, рекомендуется делать ручные замеры по маршрутам, отмечая геопозицию точки измерений. На основе интерполяции толщины снежного покрова можно получить его приближенное распределение, которое используется для корректировки объема льда. Для этого посредством интерполяции данных ГНСС-профилей формируется растер толщины снежного покрова, который вычитается из ЦМР по АФС. Для результирующего растра (рис. 2) оценивается средневзвешенное значение толщины. Данное значение умножается на площадь наледи, результатом является объем наледи, рассчитываемый по фор-

муле: $W = hS_n$, где W – объем наледи; h – средняя толщина льда в теле наледи; S_n – площадь наледи на дату съемки.

Объект исследования. Объектом исследования, репрезентативным для территории Северо-Востока России, является Анмангынданская наледь, расположенная в Магаданской области в районе 152–159 км Тенькинской трассы, в 30 км к юго-востоку от пос. Усть-Омчуг. В 1960–1990-е годы на ней проводились исследования и мониторинг наледных процессов, что позволяет восстановить исторический ряд наблюдений и оценить изменения, произошедшие под влиянием потепления климата. Площадь наледной поляны составляет 7.2 км². Максимальная мощность наледи, по историческим сведениям, достигала 7 м [Букаев, 1969]. Комплексные исследования на ней проводятся с июля 2020 г. по настоящее время [Макарьева и др., 2021; Землянкова и др., 2023; Olenchenko et al., 2023].

На наледи проводятся регулярные детальные крупномасштабные аэрофотосъемки в целях фиксации и изучения процессов образования наледи, формирования бугров пучения, миграции источников изливающихся вод, а также для определения площади и объема наледного льда.

В настоящей работе проанализированы данные 21 детальной съемки в разные фазы развития наледи. Из них 14 съемок выполнено в теплый период года во время активного таяния наледи, а 7 съемок – в период формирования наледи. Пригодными к расчету площади оказались 18 АФС, а рассчитать объем льда удалось для 15 АФС. Не-

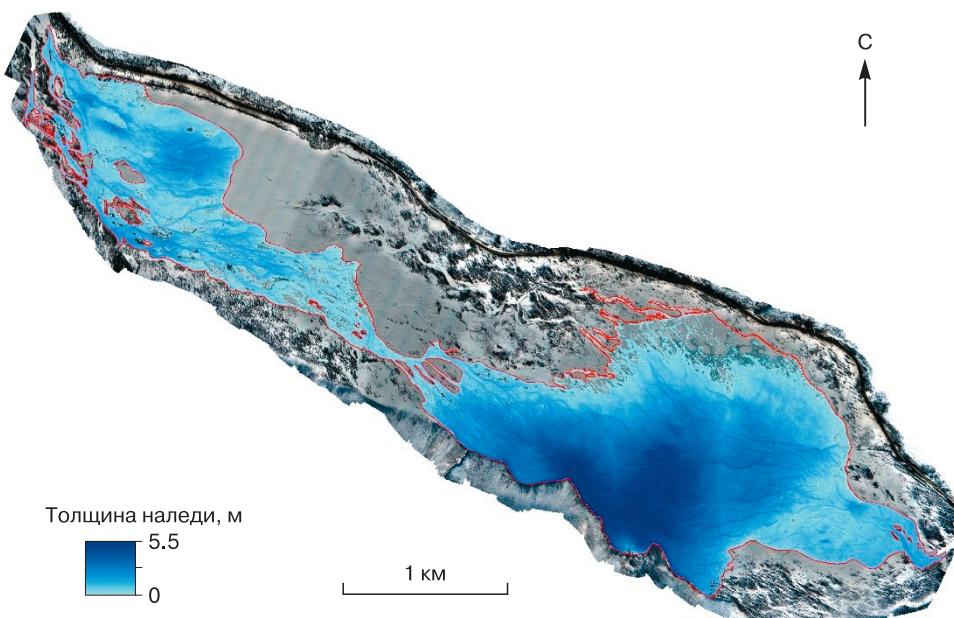


Рис. 2. Вид ортофотоплана с толщиной Анмангындинской наледи за 13.04.2023 г.

Красная линия – граница наледи.

возможность расчета площади и объема для нескольких съемок связана в основном с техническими неполадками используемого оборудования и человеческим фактором.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ НА АНМАНГЫНДИНСКОЙ НАЛЕДИ

На основе представленной методики были рассчитаны морфометрические характеристики Анмангындинской наледи, а именно площадь и объем наледного льда, за разные даты. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Наблюдения выполнялись на протяжении трех лет, особо подробно оказались освещены период таяния наледи летом 2021 г. и период ее формирования в 2022 г. Максимальный объем наледи был получен за 30.03.2023 и составил 6.71 млн м³. Максимальный объем за 2021 год составил 5.41 млн м³ (24.05.2024), за 2022 год – 5.17 млн м³ (24.03.2022). Рассчитанная средневзвешенная толщина льда варьируется от 0.50 до 1.69 м. По данным съемок БАС максимальной площади наледь достигла 09.05.2022 и была равна 4.33 м².

При ставлении мощность наледи сначала равномерно убывает до момента, когда начинают таять тонкие участки наледи (<1 м). Затем средняя толщина начинает выравниваться и может даже увеличиться по мере исчезновения тонких участков при наличии мощного куполообразного блока, затем резко убывает. Площадь и объем наледи при таянии убывают сначала быстро, затем этот процесс замедляется, график таяния напоминает форму гиперболы (рис. 3).

Таблица 1. Морфометрические характеристики Анмангындинской наледи по результатам аэрофотосъемки с 2021 по 2023 г.

№ п/п	Дата	Средняя толщина льда, м	Площадь наледи, млн м ²	Объем наледи, млн м ³
1	24.05.2021	1.41	3.83	5.41
2	28.06.2021	1.04	1.29	1.34
3	03.07.2021	0.89	0.91	0.80
4	12.07.2021	0.72	0.45	0.32
5	24.07.2021	0.58	0.22	0.12
6	31.07.2021	0.58	0.12	0.07
7	15.08.2021	0.62	0.06	0.03
8	07.09.2021	0	0	0
9	16.12.2021	0.50	2.45	1.23
10	16.01.2022	0.81	3.25	2.63
11	16.02.2022	0.98	3.95	3.86
12	24.03.2022	1.22	4.24	5.17
13	09.05.2022	–	4.33	–
14	02.06.2022	1.32	2.93	3.88
15	07.06.2022	–	2.32	–
16	06.07.2022	–	0.61	–
17	17.07.2022	–	–	–
18	04.08.2022	–	–	–
19	22.12.2022	–	–	–
20	30.03.2023	1.69	3.98	6.71
21	13.04.2023	1.62	4.06	6.58

Нарастание наледи обусловливается равномерным увеличением средней толщины наледи и объема. Площадь наледи растет пока не достигнуты границы наледной поляны или пределы роста,

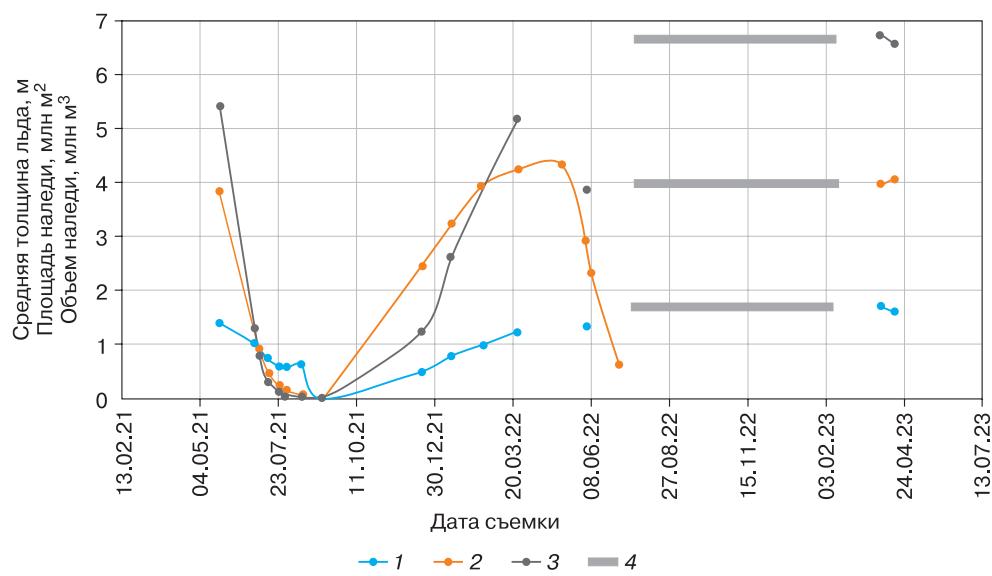


Рис. 3. Сводный график морфометрических характеристик, определенных по результатам обработки аэрофотосъемки за 2021–2023 гг.

1 – средняя толщина льда; 2 – площадь наледи; 3 – объем наледи; 4 – нет данных.

после этого перестает расти, объем и средняя толщина при этом увеличиваются. Подробно изменение морфометрических характеристик Анмангындинской наледи описано в [Землянкова и др., 2023].

На рис. 3 можно заметить, что объем и средняя толщина наледи за дату 30.03.2023 больше, чем за 13.04.2023, при этом площадь наледи меньше. Это может быть связано с погрешностью определения средней толщины льда и, следовательно, объема.

На ортофотоплане 07.09.21 наледного льда обнаружено не было, соответственно датой полного стаивания следует считать конец августа – начало сентября. В 2022 г. дата полного исчезновения льда приходится на первую декаду августа. Период 2023–2024 гг. характеризуется образованием наледи-перелетка.

Оценка точности расчета площади и объемов. Погрешности измерения объема льда состоят из погрешностей определения площади наледи и средней толщины льда. В летний период погрешность измерения площади наледи из-за хорошо дешифрируемых признаков льда на наледной поляне, а также высокого разрешения ортофотоплана и правильно выбранной картографической проекции составляет меньше 1 %. В зимний период она изменяется в зависимости от детальности наземных уточняющих наблюдений и перекрытия льда снежным покровом. К сожалению, работа по оценке погрешности определения площади наледи в зимний период комплексным методом не была

проведена из-за трудоемкости поиска границы наледи под снегом.

Расчет средней толщины наледи приносит больше неопределенности в формирование конечной погрешности расчета. Ошибки могут появляться на нескольких этапах:

- условия съемки;
- эксплуатация дрона и ГНСС-оборудования;
- расчет Post Processing Kinematic (PPK);
- расчет АФС;
- расчет площади наледи;
- расчет средней толщины наледи.

На каждом из этих этапов можно допустить ошибку, связанную с человеческим фактором. При неблагоприятных условиях съемки, к которым относится недостаточное освещение, туман, осадки, сильный ветер, свежевыпавший снежный покров, может расти ошибка независимо от остальных стадий обработки. В процессе съемки есть вероятность падения дрона из-за некорректного управления или суровых погодных условий. Расчет РРК требует внимательного заполнения геодезической информации, выбора методики обработки, аккумуляции нужных данных и их предобработки. Расчет растра средней толщины наледи может быть затруднен исключением снежного покрова из-за пестроты его распределения, что вносит субъективность в расчет.

На всех этапах, исключая первый, есть вероятность уменьшения точности за счет технических особенностей эксплуатации оборудования и программного обеспечения.

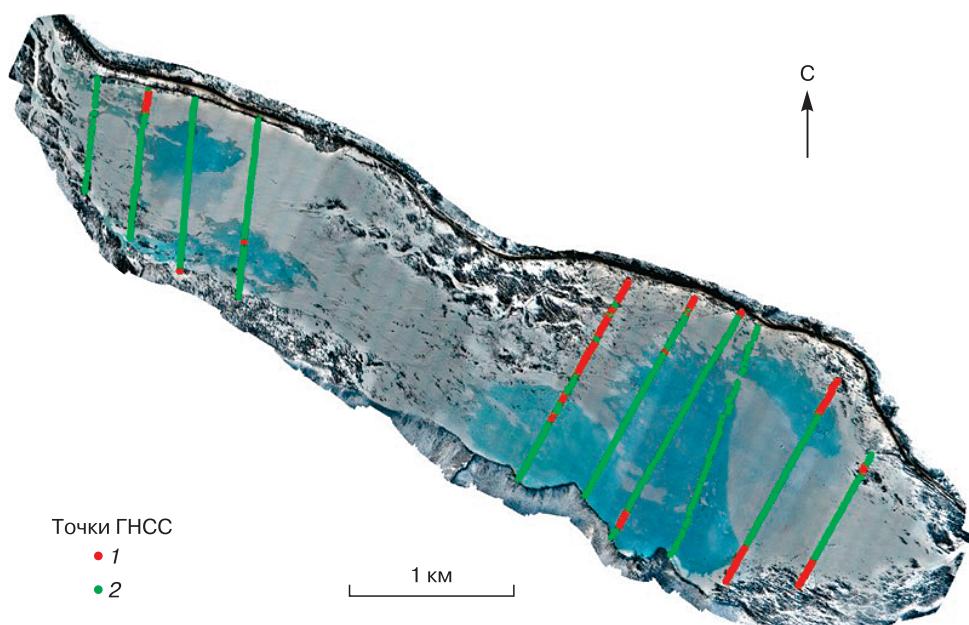


Рис. 4. Расположение профилей ГНСС (глобальной навигационной спутниковой системы) на ортофотоплане за 13.04.2023 г.

1 – земля; 2 – наледь.

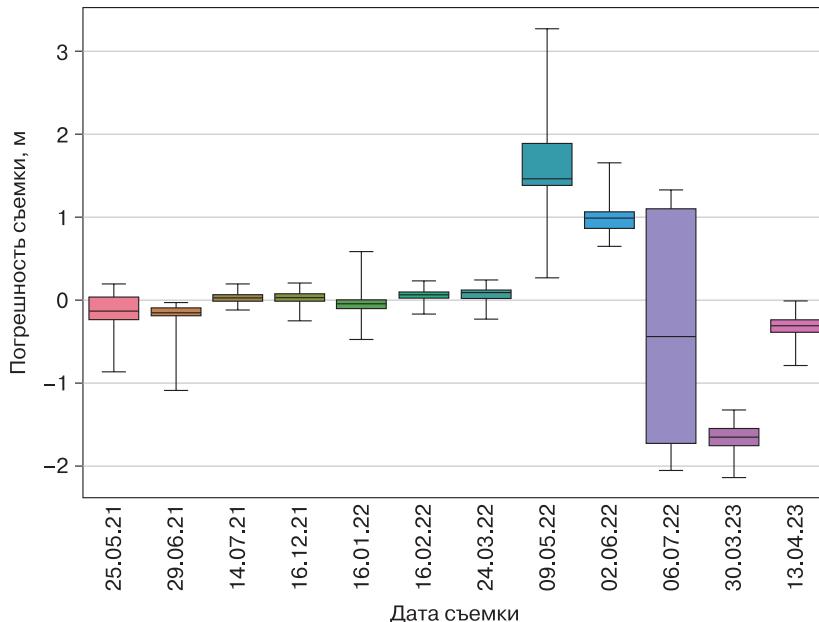


Рис. 5. Диаграмма размаха погрешности определения толщины наледи по результатам обработки данных аэрофотосъемки при сравнительном анализе с ГНСС-профилями.

Для анализа погрешности определения объема наледи использовались наземные наблюдения толщины льда при помощи ГНСС-оборудования. Было назначено 10 профилей поперек наледи (рис. 4), содержащих в среднем по 55 точек. Дата съемки отличалась от даты производства профилей не больше, чем на 7 дней. Профили имели закрепленные точки на местности, и измерение каждый раз производилось в одном и том же месте с пространственной точностью 10 см. Помимо высотной и плановых отметок фиксировалась толщина снежного покрова, а также наличие или отсутствие наледи в данной точке. ГНСС-приемник (рover) устанавливался на поверхность наледи/земли, минуя снежный покров. Точность измерения высотной отметки в режиме RTK составляет до 3 см, что позволяет использовать данный вид измерений в качестве эталона.

Для каждой съемки выполнялся сравнительный анализ высот, полученных из ГНСС-профилей и извлеченных из ЦМР по результатам обработки АФС. Анализировались только точки с наледью. Толщина снежного покрова прибавлялась к высотной отметке профиля для проведения анализа. Разброс ошибок для каждой съемки представлен на рис. 5 и в табл. 2.

На рис. 5 наблюдается разноплановая картина. Съемки до 24.03.2022 включительно характеризуются небольшим среднеквадратичным отклонением (СКО), не превышающим 0.22 м. Максимальная ошибка при этом не превышает −0.86 м. Для съемки 14.07.2021 СКО составляет всего

0.07 м, а максимальная ошибка равна 0.19 см, что является лучшим результатом при обработке.

Начиная со съемки 09.05.2022 значение СКО равно 0.71 м, среднее значение ошибки составляет 1.7 м. Аналогичная ситуация со съемкой 06.07.2022, где значение СКО составляет 1.41 м, а средняя ошибка −2.06. По распределению ошибок можно заметить, что размах значений в этих двух съемках больше всех остальных, равно как и величина выбросов. Большая величина ошибки связана

Таблица 2. Анализ погрешностей аэрофотосъемки по данным наземных наблюдений

№ п/п	Дата съемки	Количество точек	Средняя ошибка, м	СКО, м	Максимальная ошибка, м
1	25.05.2021	105	−0.12	0.22	−0.86
2	29.06.2021	109	−0.14	0.07	−0.31
3	14.07.2021	59	0.04	0.07	0.19
4	16.12.2021	121	0.03	0.09	−0.24
5	16.01.2022	142	−0.04	0.12	0.59
6	16.02.2022	399	0.06	0.07	0.24
7	24.03.2022	428	0.07	0.08	0.25
8	09.05.2022	454	1.7	0.71	3.26
9	02.06.2022	136	1.0	0.17	1.66
10	06.07.2022	50	−0.33	1.41	−2.06
11	30.03.2023	159	−1.65	0.15	−2.13
12	13.04.2023	106	−0.31	0.14	−0.78

Примечание. СКО – среднеквадратичное отклонение.

на с плохими ГНСС-данными, получаемыми дроном с помощью AGNSS-платы. При расчете РРК большинство решений для уточненной координаты снимков были плавающими, что и повлияло на общую точность расчета. Плавающие решения, в свою очередь, являлись следствием неправильного крепления AGNSS-антенны к разъему дрона, что приводило к нарушению работы системы позиционирования и некачественным исходным данным. По результатам обработки таких съемок надежно можно получить только площадь наледи.

Съемки 02.06.2022, 30.03.2023 и 13.04.2023 имеют большое среднее значение ошибки от -1.65 до 1.0 м, но небольшое СКО < 0.17 м. При этом СКО характеризует разброс значений друг относительно друга, а среднее значение ошибки характеризует смещение полученных значений от "0" – эталонных данных. Таким образом, был сделан вывод, что есть систематическая ошибка, связанная с вертикальным смещением диапазона данных на условную величину, которая близка к среднему значению ошибки. Эта ошибка была устранена путем корректировки значений ЦМР на величину ошибки.

Подводя итог, можно утверждать, что средняя ошибка вычисления высотных отметок на поверхности наледи в съемках без влияния объективных и субъективных факторов составляет 0.12 м. Относительная ошибка определения средневзвешенной толщины наледи составляет 11% .

Площадь наледи определяется значительно проще, чем объем. Для этого используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [Алексеев и др., 2021; Makarieva et al., 2019]. Однако при использовании спутниковых снимков существуют погрешности, связанные с качеством и разрешением снимков, а также наличием четких дешифровочных признаков наледи. Препятствовать надежному распознаванию наледи на спутниковом снимке может снежный покров. Для оценки

погрешности определения площади наледи по спутниковым снимкам за холодный и теплый периоды года был проведен сравнительный анализ определения площади наледи по спутниковым снимкам и АФС.

Для сравнения были отобраны АФС и спутниковые снимки, даты которых отличаются не более чем на 3 дня для летнего периода и не более 6 дней для зимнего.

На зимних снимках в качестве дешифровочного признака наличия наледи использовались области голубого цвета, подтверждающие наличие ледового покрова. Комбинированный метод определения площади с помощью БАС и наземных наблюдений был принят за эталон. Результаты приведены в табл. 3.

По результатам, представленным в табл. 3, можно сделать вывод, что ошибка определения площади в зимний период может достигать 59% . Минимальная ошибка равна 24% и относится к данным за май, когда негативное влияние снежного покрова снижается из-за активного снеготаяния. Средняя ошибка составляет 38% . Площадь наледи, полученная методом дешифрирования спутниковых снимков, всегда оказывается меньше величины, полученной на основе БАС. Это связано с невозможностью дешифрирования наледи с воздуха под снежным покровом с помощью визуальных признаков. Комбинированный метод предполагает наличие данных по изменению высоты земной поверхности в точке, по подстилающей поверхности из наземных наблюдений, по контурам наледи с предыдущих съемок. Указанные преимущества делают комбинированный метод более надежным, чем дешифрирование по ДЗЗ. При этом, используя только АФС, есть риск определить площадь некорректно из-за небольшой толщины наледи по краям наледной поляны и сильной вариативности толщины снежного покрова.

Таблица 3. Сравнительный анализ площадей, определенных методом АФС и ДЗЗ в период наличия снежного покрова

Дата снимка	Площадь наледи ДЗЗ, км ²	Дата съемки БАС	Площадь наледи БАС, км ²	Ошибка определения площади по ДЗЗ, %
12.01.2022	1.95	16.01.2022	3.25	40
16.02.2022	2.57	16.02.2022	3.95	35
26.03.2022	1.75	24.03.2022	4.24	59
05.05.2022	3.30	09.05.2022	4.33	24
28.03.2023	2.52	30.03.2023	3.98	37
07.04.2023	2.57	13.04.2023	4.06	37

П р и м е ч а н и е. ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли, БАС – беспилотные авиационные системы, АФС – аэрофотосъемка.

Таблица 4. Сравнительный анализ площадей, определенных методом АФС и ДЗЗ в бесснежный период

Дата снимка	Площадь наледи ДЗЗ приведенная, км ²	Дата съемки БАС	Площадь наледи БАС, км ²	Ошибка определения приведенной площади по ДЗЗ, %	Время между ДЗЗ и БАС, сут
16.07.2020	0.37	15.07.2020	0.31	-18	1
29.06.2021	1.33	28.06.2021	1.29	-3	1
06.07.2021	0.81	03.07.2021	0.91	11	3
21.07.2021	0.19	24.07.2021	0.22	13	-3
13.08.2021	0.07	15.08.2021	0.06	-18	-2
12.05.2022	4.13	09.05.2022	4.32	4	3
04.06.2022	3.06	02.06.2022	2.89	-6	2

Для бесснежного периода выбирались снимки, наиболее приближенные по времени к дате АФС, так как таяние наледи в летний период идет очень быстро, а толщина и площадь стаивания сильно изменяются. Для сравнения было выбрано 7 съемок, отвечающих вышеупомянутым условиям. Для устранения погрешности на таяние наледи между АФС и ДЗЗ к площади по ДЗЗ вводилась поправка. Она рассчитывалась исходя из средней скорости таяния на временном промежутке между смежными АФС. Результаты сравнительного анализа ДЗЗ и АФС для бесснежного периода представлены в табл. 4.

Согласно табл. 4, средняя ошибка определения площади по ДЗЗ составляет 11 %, минимальная составляет 3 %, максимальная – 18 %. Ошибку более 10 % содержат площади $<1 \text{ км}^2$, что свидетельствует об увеличении влияния разрешения снимков на результат при уменьшении определяемых площадей. При площади наледи $>1 \text{ км}^2$ ошибка не превышала 6 %.

В бесснежный период для надежного определения площади наледи можно использовать только визуальные признаки. При этом АФС имеет разрешение ортофотоплана до 10 см/пиксел. Разрешение открытых спутниковых данных обычно составляет первые десятки метров на пиксель, что и определяет основную погрешность при определении площади.

ВЫВОДЫ

Оценка морфометрических характеристик наледей (площадь и объем) методом фотограмметрии позволяет получить более точные результаты и требует меньших временных и трудовых затрат на выполнение мониторинга, чем методы наземной съемки. Одним из очевидных преимуществ использования метода фотограмметрии является скорость получения первичных данных. Эти обстоятельства указывают на продуктивность и целесообразность использования БАС для мониторинга морфометрических характеристик наледей.

В работе представлена методика использования БАС, включающая описание факторов, определяющих качество съемки, предполетную подготовку, производство съемки, обработку АФС, расчет площади и объема наледи.

Всего была выполнена 21 съемка, по всем съемкам удалось определить площадь наледи и для 15 съемок – объем наледи.

Анализ погрешностей определения объема на примере Анмангындинской наледи показал, что метод имеет среднюю ошибку 11 %, что позволяет говорить о достаточно высокой точности расчета и применимости метода для определения морфометрических характеристик наледей. Определение площади наледи в период отсутствия снежного

покрова по результатам дешифрирования ортофотоплана происходит надежно из-за четко различимых границ наледи и высокого разрешения ортофотоплана.

Определение площади наледи в зимний период связано с проблемой перекрытия льда снежным покровом, поэтому дешифрирование может быть связано с большими погрешностями. При наличии точных высотных отметок и при равномерном снежном покрове можно по общей разнице с летней ЦМР определить положение границы наледного льда. Однако при сильной вариативности снежного покрова или при толщине льда, сопоставимой с толщиной снега, это может привести к погрешностям. Наилучшим вариантом определения площади наледи зимой является комплексный подход, сочетающий в себе учет прошлых АФС, хорошо дешифрируемых натеков, разницы с летней ЦМР и наземными наблюдениями.

Таким образом, при обработке АФС в режиме РРК в бесснежный период можно надежно определять площадь и объем наледи без дополнительных наземных наблюдений, однако для контроля рекомендуется использовать опознавки. Для периода нарастания наледи метод применим с условием, что снежный покров имеет небольшой разброс толщины в контуре наледной поляны или же будут проведены дополнительные исследования для получения распределения его толщины.

Ортофотопланы, получаемые в результате АФС, можно использовать для крупномасштабного картирования наледных полян, процессов наледеобразования, наледных ландшафтов.

Благодарности. Исследование проведено при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта “Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата” (ID PURE 103963992).

Литература

- Алексеев В.Р. Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лед и снег, 2016, т. 56, № 1, с. 73–93.
- Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н. и др. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2021, 302 с.
- Букаев Н.А. Основные закономерности режима гигантских наледей в верховьях р. Колымы (на примере Анмангындинской наледи) // Наледи Сибири. М., Наука, 1969, с. 62–78.
- Гагарин Л.А., Волгушева Н.Э., Башарин Н.И. Использование беспилотных летательных аппаратов в геокриологических исследованиях // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: Материалы II Междунар. науч.-практ. форума. Хабаровск, 2017, вып. 2, с. 13–16.
- Землянская 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.

Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Осташов А.А. и др. Перспективы развития комплексных междисциплинарных гидролого-мерзлотных исследований на Северо-Востоке России // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле, 2021, т. 66, № 1, с. 74–90.

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

Ходак А.В., Сивцов В.А., Курашов И.М. и др. Особенности картографирования местности в экстремальных условиях Арктики посредством беспилотных летательных аппаратов // Моя профессиональная карьера, 2021, т. 1, № 26, с. 115–118.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А. и др. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 2, с. 70–80.

Alfredsen K., Haas C., Tuhtan J.A. et al. Brief communication: Mapping river ice using drones and structure from motion // The Cryosphere, 2018, No. 12, p. 627–63.

Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing // J. Photogram. Remote Sens., 2014, vol. 92, p. 79–97.

Gagarin L., Wu Q., Melnikov A. et al. Morphometric analysis of groundwater icings: Intercomparison of estimation techniques // Remote Sens., 2020, No. 12, p. 18.

Grib N., Melnikov A., Grib G. et al. Use of unmanned aerial systems for assessing the dynamics of hazardous engineering and geocryological processes on linear facilities // E3S Web Conf., 2020, vol. 192, p. 8.

Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia) // Earth Syst. Sci. Data, 2019, vol. 11 (1), p. 409–420.

Olenchenko V., Zemlianskova A., Makarieva O., Potapov V. Geocryological structure of a giant spring aufeis glade at the Anmangynda River (Northeastern Russia) // Geosciences (Switzerland), 2023, vol. 13, No. 11, p. 328.

Rødtang E., Alfredsen K., Juárez A. Drone surveying of volumetric ice growth in a steep river // Remote Sens., 2021, vol. 2, p. 11.

Sheremetkaya E.D., Ivanov M.M., Voroshilov E.V. et al. Using UAV large-scale aerial photography for studying hazardous geomorphological processes // Proc. of the Int. Conf. "InterCarto. InterGIS". Petrozavodsk, 2018, vol. 24, No. 2, p. 158–170.

URL: <https://fly.teofly.com> (дата обращения: 20.03.2025).

References

Alexeev V.R. Long-term variability of the spring taryn-aufesises. Led i Sneg [Ice and Snow], 2016, vol. 56, No. 1, p. 73–93 (in Russian).

Alexeev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N. et al. Atlas gigantskikh naledei-tarynov Severo-Vostoka Rossii [Atlas of Giant Aufeis-Taryn of the North-East of Russia]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2021, 302 p. (in Russian).

Bukaev N.A. Basic patterns of the regime of giant aufeis in the upper reaches of the Kolyma River (using the Anmangyndinskaya aufeis as an example). In: Naledi Sibiri [Aufeis of Siberia]. Moscow, Nauka, 1969, p. 62–78 (in Russian).

Gagarin L.A., Volgusheva N.E., Basharin N.I. Use of unmanned aerial vehicles in geocryological studies. In: Natural resources and ecology of the Far Eastern region: Proc. of the II Int. Scientific and Practical Forum. Khabarovsk, 2017, iss. 2, p. 13–16 (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, No. 1, p. 71–84 (in Russian).

Makarieva O.M., Nesterova N.V., Ostashov A.A. et al. Perspectives of the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia. Vestnik of SPbSU [Bulletin of St. Petersburg University State Earth Sciences], 2021, vol. 66, No. 1, p. 74–90. – <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.105>

Sokolov B.L. Naledi i rechnoi stok [Aufeis and River Runoff]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1975, 190 p. (in Russian).

Khodak A.V., Sivtsov V.A., Kurashov I.M. et al. Features of terrain mapping in extreme Arctic conditions using unmanned aerial vehicles. Moya professionalnaya kar'era [My professional career], 2021, vol. 1, No. 26, p. 115–118 (in Russian).

Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleynikov A.A. et al. The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017. Earth's Cryosphere, 2018, vol. XXII, No. 2, p. 61–70.

Alfredsen K., Haas C., Tuhtan J.A. et al. Brief Communication: Mapping river ice using drones and structure from motion. The Cryosphere, 2018, No. 12, p. 627–633. – <https://doi.org/10.5194/tc-12-627-2018>, 2018

Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing. J. Photogram. Remote Sens., 2014, vol. 92, p. 79–97. – <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

Gagarin L., Wu Q., Melnikov et al. Morphometric analysis of groundwater icings: Intercomparison of estimation techniques. Remote Sens., 2020, No. 12, p. 18. – <https://doi.org/10.3390/rs12040692>

Grib N., Melnikov A., Grib G. et al. Use of unmanned aerial systems for assessing the dynamics of hazardous engineering and geocryological processes on linear facilities. E3S Web Conf., 2020, vol. 192, p. 8. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019204006>

Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia). Earth Syst. Sci. Data, 2019, vol. 11 (1), p. 409–420.

Olenchenko V., Zemlianskova A., Makarieva O., Potapov V. Geocryological structure of a giant spring aufeis glade at the Anmangynda River (Northeastern Russia). Geosciences (Switzerland), 2023, vol. 13, No. 11, p. 328. DOI: 10.3390/geosciences13110328.

Rødtang E., Alfredsen K., Juárez A. Drone surveying of volumetric ice growth in a steep river. Remote Sens., 2021, vol. 2, p. 11. DOI: 10.3389/frsen.2021.767073.

Sheremetkaya E.D., Ivanov M.M., Voroshilov E.V. et al. Using UAV large-scale aerial photography for studying hazardous geomorphological processes. In: Proc. of the Int. Conf. "InterCarto. InterGIS". Petrozavodsk, 2018, vol. 24, No. 2, p. 158–170.

URL: <https://fly.teofly.com> (last visited: 20.03.2025).

Поступила в редакцию 27 марта 2025 г.,
после доработки – 14 мая 2025 г.,
принята к публикации 14 июня 2025 г.