

УДК 551.345; 556.3

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., д. 7–9, Россия;*

²*ООО «АФС Лидер»*

E-mail: andrey.ostashov@gmail.com

Наледи широко распространены в криолитозоне. Морфометрические характеристики являются показателями динамики развития наледей и могут быть использованы в теоретических исследованиях и практических целях. Их оценка связана с техническими трудностями, значительными временными и трудовыми затратами при использовании контактных полевых методов. В настоящей работе предложена 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 был произведен расчет площадей и объемов объекта на даты съемок. Максимальный объем наледи изменялся от 6,71 млн м³ 30.03.2023 до 5,17 млн м³ 24.03.2022, и составил 5,41 млн м³ 24.05.2021. 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%.

Наледь, Анмангындинская наледь, беспилотные авиационные системы, аэрофотосъемка, объем наледи, площадь наледи

Ссылка для цитирования: // **А.А. Осташов, О.М. Макарьева, А.В. Мазурок, Н.В. Нестерова, А.А. Землянскова.** Методика применения беспилотных авиационных систем для оценки морфометрических характеристик наледей. Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 4, с. ? - ?. DOI: 10.15372/KZ20250202. EDN: BTSGON.

METHOD OF USING UNMANNED AERIAL SYSTEMS FOR ANALYSIS OF MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF AUFEIS

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

1 Saint Petersburg State University, 199034, Saint Petersburg, Universitetskaya nab., 7–9, Russia;

2 AFS Lider LLC

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

Aufeis are widespread in the permafrost zone. Morphometric characteristics are indicators of the aufeis dynamics and can be used in theoretical research and 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 aufeis by aerial photography using post-processing of data from global navigation satellite

systems. It makes 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 Anmangynda aufeis during 2021-2023. A total of 21 aerial photographs were processed during both the formation and melting periods of aufeis 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 average weighted aufeis thickness varies from 0.50 to 1.69 m. The average error in determining the average aufeis thickness by aerial photography compared to ground-based geodetic measurements is 11% after identifying and adjusting for the systematic error. A comparative analysis of the ice 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%.

Aufeis, Anmangynda 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 внутригодовое 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 наледобразования 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]. Важнейшими характеристиками, позволяющими судить о динамике наледных процессов, являются площадь и объем наледи. Оценка динамики объема льда наледей наземными методами является трудоемкой задачей, использование беспилотных авиационных систем (БАС) позволяет упростить ее решение.

В последнее время БАС все чаще используют при исследовании различных географических объектов [Черноморец, 2018; Colomina, 2014; Sheremetskaaya, 2018] благодаря относительной доступности, высокой скорости съемки и качеству получаемой информации. Метод применяют и для проведения наблюдений за наледями [Гагарин, 2017; Gagarin, 2020]. Оценка погрешности определения морфометрических характеристик наледей при помощи БАС приведены в [Gagarin, 2020]. В исследовании [Grib, 2020] произведен мониторинг площади наледи с помощью БАС в период нарастания. В [Alfredsen, 2018; Rødtang, 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, 2020]. БАС является существенным дополнением при комплексном исследовании объекта. Первичная разведка на основе БАС позволяет определить расположение источников и бугров пучения для формирования и корректирования

программы исследований, включающей отбор проб, точечные наблюдения за нарастанием и стаиванием льда и др. [Makarieva, 2021]. Данные БАС также используются для заверки спутниковых данных.

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

Цель исследования – усовершенствовать и апробировать методику применения БАС для мониторинга процессов формирования и стаивания 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 полей;
- оценка русловых процессов в зоне наледообразования;
- идентификация мест разгрузки наледообразующих вод путем дешифрирования бугров пучения.

Факторы, определяющие качество съемки

Значительными 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, особенно это 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 засвечена и при обработке алгоритм не будет находить общих точек поверхности на смежных снимках. Такая же проблема может быть при выпадении на поверхность наледи снега, создающего монотонную сложно дешифрируемую поверхность.

Подготовка к съемке

Границы съемки определяются исходя из конфигурации наледной поляны с условием, 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/>, 2021], создается проект (рис. 1а), в котором рассчитывается покрытие зоны исследования маршрутами беспилотника, учитывая боковое и продольное перекрытие кадров, скорость беспилотника, частоту съемки, высоту полета. Значение этих параметров задается, исходя из площади и формы наледи, требуемой точности получаемых в процессе съемки данных, инструкции по применению БАС, временных и человеческих ресурсов.

Для проведения данного исследования была использована высота съемки 150 м над точкой взлета. Итоговое разрешение ортофотоплана составляло 4,1 см, что позволяло рассчитать морфометрические характеристики с высокой точностью. Поперечное перекрытие составляло 55 %, а 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.

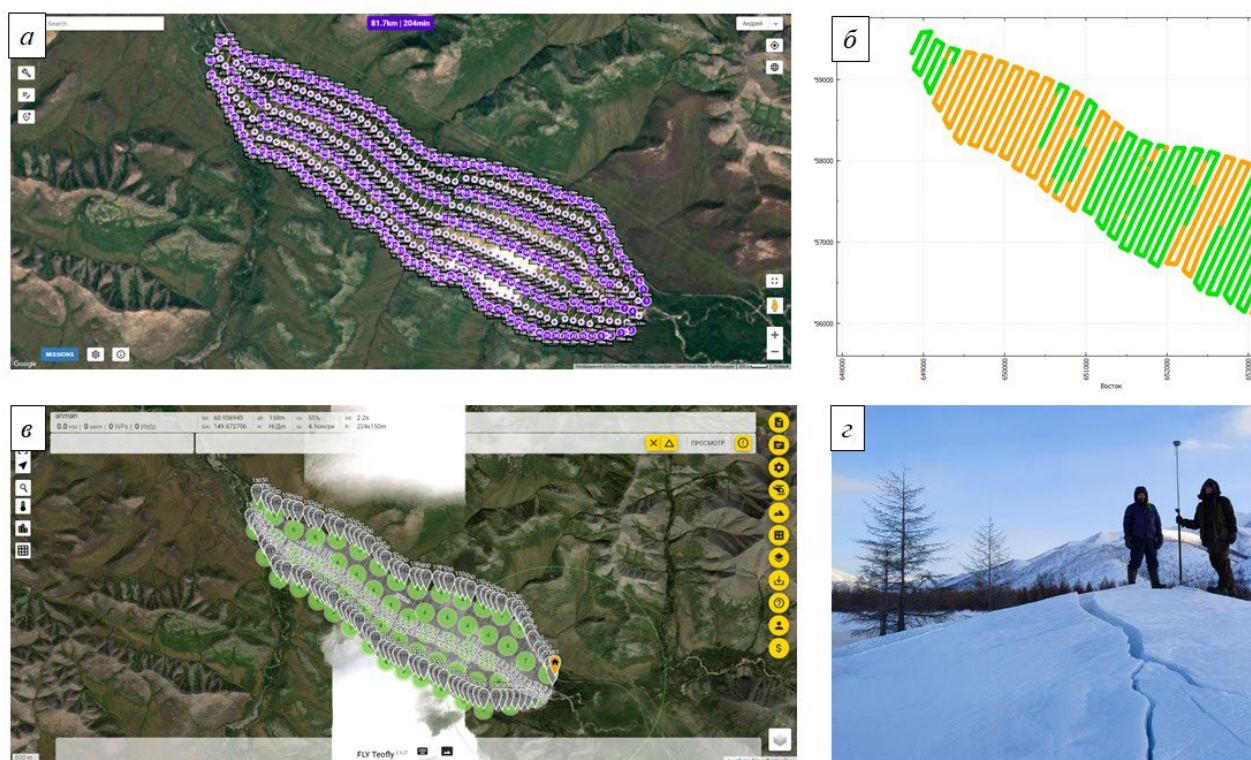


Рис. 1а – формирование полетного задания в веб-интерфейсе [https://fly.teofly.com, 2021]; 1б – скриншот из программы Teobox, присваивание уточненных координат центрам снимков; 1в – скриншот из полетной программы Litchi с проектом Анмангындинской наледи; 1г – проведение геодезического профилирования на Анмангындинской наледи, 2022 г.

Производство съемки

Съемка производится в полетном программном обеспечении (ПО), например, авторами использовалась программа Litchi (рис. 1в). Для проведения работ необходимо выбрать подходящие условия освещения и погодные условия (отсутствие сильного ветра, осадков, тумана, температуры воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). 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, внутрь которого закладывались химические тепловые стельки, также осуществлялась «горячая» замена аккумуляторов в ГНСС приемнике спустя 2,5 часа работы. На антенне беспилотника при этом задается запись с частотой 5 Гц 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 °С). Для корректной работы температура аккумулятора должна быть выше 0 °С, при необходимости аккумулятор нужно прогреть.

Для оценки точности назначаются опорные точки и измеряются их координаты с помощью ГНСС съемки в режиме Real Time Kinematic (RTK). Для данной 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 опознаков следует быть осторожным из-за возможного протаивания льда при сильном нагревании поверхности опознака.

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 данных). По окончании работы данные с БАС переносятся на жесткий диск компьютера или внешний жесткий диск. В программе Agisoft Metashape, не покидая 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 часа. Съемка производится с использованием автомобиля путем движения 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, имели общий размер около 40 Гб и количество около 5000 шт. Данные 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 часов 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 2 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 цифровых моделей рельефа. Первый этап (PPK – post processing kinematic) производится в ТЕОВОХ РРК ВОТ и Teobox (рис. 16) или аналогах.

Камеральная обработка результатов съемки производится в фотограмметрическом программном обеспечении ПО, например, Agisoft Metashape. Для определения площади наледи рассчитывается ортофотоплан наледи, а для определения объема – цифровая модель рельефа, включающая

в себя 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 ортофотоплану. В данном 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 значение 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 для данного исследования).

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 необходимо использовать данные наземных наблюдений. В данном исследовании использовались профили, выполненные посредством ГНСС съемки в режиме RTK (Real Time Kinematic) (рис. 1г). При съемке приемник устанавливается на земную поверхность, и измеряются плановые координаты и высотная отметка. Одновременно производится фиксация типа подстилающей поверхности (лед, земля), измеряется 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. ЦМР 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 растр 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 формуле: $W=hSn$, где W – объем наледи, h – средняя толщина льда в теле наледи, Sn – площадь наледи на дату съемки.

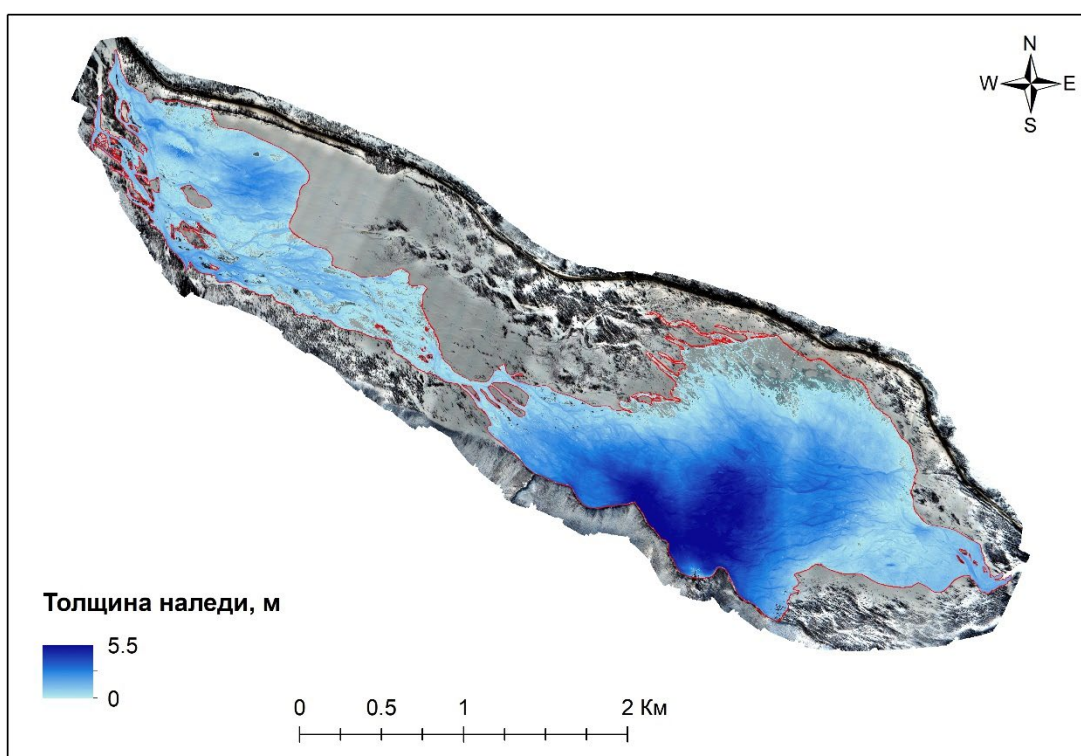


Рис. 2. Вид ортофотоплана с толщиной Анмангыдинской наледи за 13.04.2023 Красной линией обозначена граница наледи

Объект исследования

Объектом исследования, репрезентативным для территории Северо-Востока России, является Анмангыдинская наледь, расположенная в Магаданской области в районе 152-159 км Тенькинской трассы в 30 км к юго-востоку от пос. Усть-Омчуг. В 60-90 гг. прошлого века 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 года по настоящий момент [Землянскова, 2023; Olenchenko et al., 2023; Makarieva, 2021].

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 выполнены в период формирования наледи. Пригодными к расчету площади оказались 18 АФС, а рассчитать объем льда удалось для 15 АФС. Невозможность расчета площади и объема для нескольких съемок связаны по большей части 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 таблице 1.

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

№ п/п	Дата	Средняя толщина льда, м	Площадь наледи, млн м²	Объем наледи, млн м³
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

Наблюдения выполнялись на протяжении трех лет, особо подробно оказались освещены период таяния наледи летом 2021 и период формирования 2022 года. 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 за 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 стаивании мощность наледи сначала равномерно убывает до момента, когда начинают таять тонкие участки наледи (<1м). 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 процесс убывания замедляется, график таяния напоминает форму гиперболы (рис. 3).

Наращение наледи обуславливается равномерным увеличением средней толщины наледи и объема. Площадь наледи растет пока не достигнуты границы наледной поляны или пределы роста, после этого перестает расти, объем и средняя толщина при этом увеличивается. Подробно изменение морфометрических характеристик Анмангындинской наледи описано в [Землянскова, 2023]

На рисунке 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, впоследствии, объема.

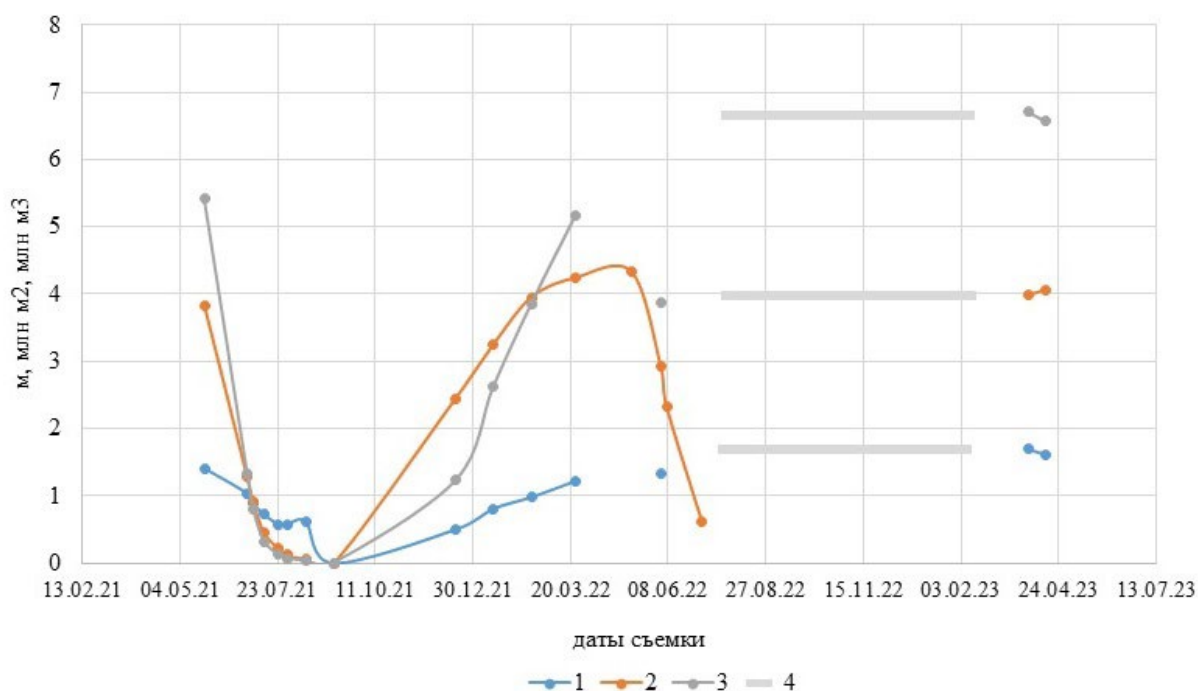


Рис. 3. Сводный график морфометрических характеристик, определенных по результатам обработки аэрофотосъемки за 2021-2023 гг. 1 - Средняя толщина льда, м; 2 – Площадь наледи, млн м³; 3 – объем наледи, млн м³; 4 – нет данных.

На ортофотоплане 07.09.21 наледного льда обнаружено не было, соответственно датой полного стаивания следует считать конец августа – начало сентября. В 2022 году дата полного исчезновения льда приходится на первую декаду августа. 2023-2024 гг. характеризуются 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 варьируется 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, свежевывпавший 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 PPK требует внимательного заполнения геодезической информации, выбора методики обработки, аккумуляции нужных данных и их предобработки. Расчет раstra средней толщины наледи может быть затруднен исключением снежного покрова из-за пестроты его распределения, что может вносить субъективность в расчет.

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

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 (ровер) устанавливался на поверхность наледи/земли, минуя снежный покров. Точность измерения высотной отметки в режиме РТК составляет до 3 см, что позволяет использовать данный вид измерений в качестве эталона.

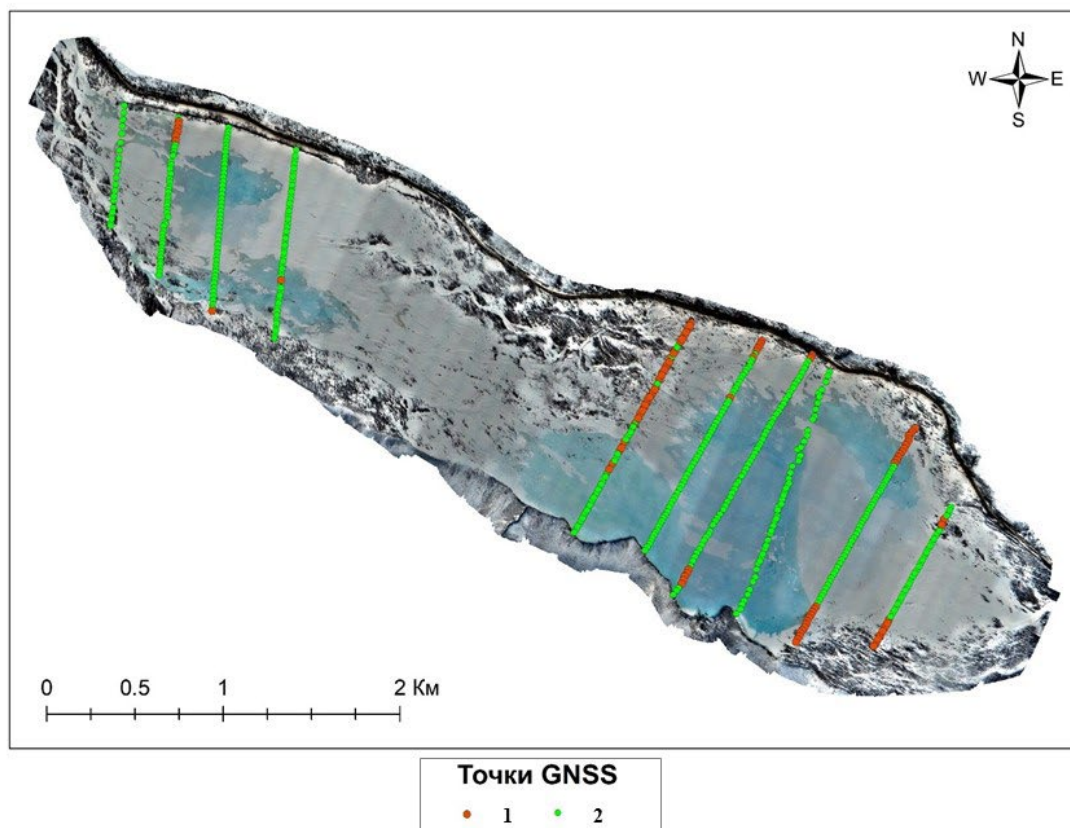


Рис. 4. Расположение GNSS профилей на ортофотоплане за 13.04.2023. 1 – земля; 2 – наледь.

Для каждой съемки выполнялся сравнительный анализ высот, полученных из GNSS 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 рисунке 5 и в таблице 2.

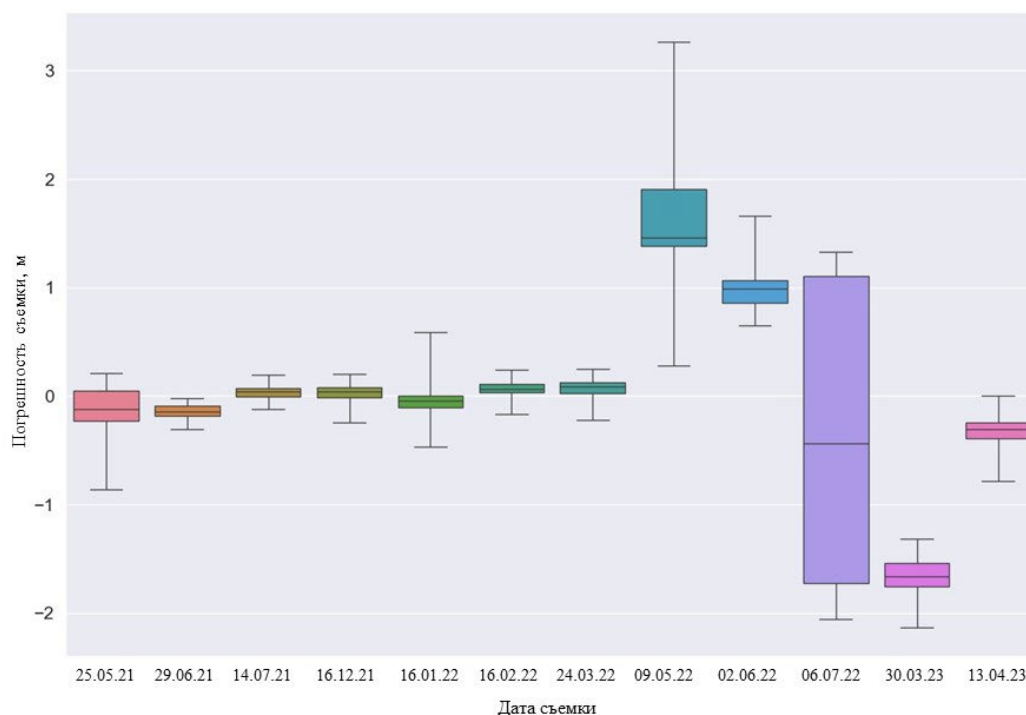


Рис. 5. Диаграмма размаха погрешности определения толщины наледи по результатам обработки АФС по результатам сравнительного анализа с ГНСС профилями.

На рисунке 5 можно заметить разноплановую картину. Съёмки до 24.03.22 включительно характеризуются небольшим среднеквадратичным отклонением (СКО), не превышающим 0,22 м. Максимальная ошибка при этом не превышает -0,86 м. СКО съёмки 14.07.2021 составляет всего 0,07 м, а максимальная ошибка составляет 0,19 см, что является лучшим результатом при обработке.

Начиная со съёмки 09.05.2022 наблюдается большое значение СКО, равное 0,71 м и среднее значение ошибки, составляющее 1,7 м. Аналогичная ситуация со съёмкой 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 с плохими ГНСС данными, получаемыми дроном с помощью AGNSS платы. При расчете РПК 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 м до 1,00 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. Данная ошибка была устранена путем корректировки значений ЦМР на величину ошибки.

Таблица 2. Анализ погрешностей аэрофотосъемки по данным наземных наблюдений

№ п/п	Дата съемки	Количество точек	Среднее значение ошибки, 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	0.17	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.

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). [Makarieva, 2019, Алексеев, 2021] 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 период 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 представлены в таблице 3.

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

дата снимка	площадь наледи ДЗЗ, км2	дата съемки БАС	площадь наледи БАС, км2	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

Примечание. ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли, БАС – беспилотные авиационные системы, АФС – аэрофотосъемка

По результатам, представленным в таблице 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. Вышеперечисленные 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.

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 варьирует. Для сравнения было выбрано 7 съемок, отвечающих вышеприведенным 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 таблице 4.

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

при отсутствии снежного покрова					
дата снимка	площадь наледи ДЗЗ приведенная, км ²	дата съемки БАС	площадь наледи БАС, км ²	ошибка определения площади по ДЗЗ по приведенной площади, %	промежутки к времени между ДЗЗ и БАС, дни
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

Примечание. ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли, БАС – беспилотные авиационные системы, АФС – аэрофотосъемка.

Согласно таблице 4, средняя ошибка определения площади по ДЗЗ составляет 11%, минимальная составляет 3%, максимальная – 18%. Ошибку больше 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. АФС при этом имеет разрешение ортофотоплана до 10 см/пикс. Разрешение открытых спутниковых данных обычно составляет первые десятки м/пикс, 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 данного метода 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 в себя 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 Анмангыдинской 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 равномерном снежном покрове можно по общей разнице с летним ЦМР определить расположение 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 натеклов, 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 опознаки. Для периода нарастания наледи метод является применимым 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 полей, процессов наледообразования, 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., Осташов А.А. и др. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / Новосибирск, издательство 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 геофизиологических исследованиях // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона, материалы II международного научно-практического форума. Том Выпуск 2, 2017, 13-16 стр.

Землянскова 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.

Соколов Б. Л. Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 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, том 22, № 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*, No.12, pp. 627–633, <https://doi.org/10.5194/tc-12-627-2018>, 2018.
- Colomina I., Molina P.** Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, V. 92, pp. 79-97, ISSN 0924-2716, <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
- Gagarin L., Wu Q., Melnikov A. 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, V. 192, p. 8, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019204006>
- 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. Earth Sciences*. 2021, V. 66, № 1, P. 74–90. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.105>
- 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. EDN RUCExc.

Rødtang E., Alfredsen K. and Juárez A. Drone Surveying of Volumetric Ice Growth in a Steep River // Remote Sens, 2021, V. 2, p. 11, doi: 10.3389/frsen.2021.767073

Sheremetskaya E.D., Ivanov M.M., Voroshilov E.V. et al. Using UAV large-scale aerial photography for studying hazardous geomorphological processes // Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”. 2018 V. 24, No. 2, pp. 158–170

URL: <https://fly.teofly.com>, 2021

References

Alexeev V.R. Long-term variability of the spring taryn-aufeises.

Led i Sneg [Ice and Snow], 2016, No. 56 (1), p. 73–93 (in Russian).

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

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

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) // Aufeis of Siberia. Moscow: Nauka, 1969, Pp. 62–78 (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. V. 22. No 2. pp. 61-70. (in Russian).

Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, V. 92, 79-97, pp. 79-97 ISSN 0924-2716, <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013> (in Russian).

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>

Gagarin L.A., Volgusheva N.E., Basharin N.I. Use of unmanned aerial vehicles in geocryological studies // Natural resources and ecology of the Far Eastern region, 2017, Proceedings of the II International Scientific and Practical Forum. Volume Issue 2 13-16 pp. (in Russian).

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, V. 192, p. 8, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019204006>

Khodak A.V., Sivtsov V.A., Kurashov I.M. et al. Features of terrain mapping in extreme Arctic conditions using unmanned aerial vehicles // My professional career. 2021, V. 1, No. 26, P. 115-118. (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. Earth Sciences. 2021, V. 66, № 1, P. 74–90. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.105>

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. EDN RUCEXC.

Rødtang E., Alfredsen K. and Juárez A. Drone Surveying of Volumetric Ice Growth in a Steep River // Remote Sens, 2021, V. 2, p. 11, doi: 10.3389/frsen.2021.767073

Sheremetskaya E.D., Ivanov M.M., Voroshilov E.V. et al. Using UAV large-scale aerial photography for studying hazardous geomorphological processes // Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”. 2018 V. 24, No. 2, pp. 158–170 (in Russian).

Sokolov B. L. Aufeis and River Runoff. Gidrometeoizdat, Leningrad, 1975, 190 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) // Lёд i sneg. - 2023. - Vol. 63. - N. 1. - P. 71-84. doi: 10.31857/S2076673423010167 (in Russian).

URL: <https://fly.teofly.com>, 2021