

Морские, речные и озёрные льды

УДК 556.5

DOI: 10.31857/S2076673422030139, EDN: EQOAXQ

Аномальный рельеф дна малого озера в оазисе Ларсерманн (Восточная Антарктида)

© 2022 г. С.Д. Григорьева^{1,2*}, М.Р. Кузнецова^{1,2}, М.В. Шитов³,
Г.В. Пряхина², М.П. Кашкевич²

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

³Всероссийский геологический институт имени А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

*grigoreva.svetl@gmail.com

Anomalous bottom topography of a small lake in the Larsemann Hills Oasis (East Antarctica)

S.D. Grigorieva^{1,2*}, M.R. Kuznetsova^{1,2}, M.V. Shitov³, G.V. Priakhina², M.P. Kashkevich²

¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia; ²Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

³A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

*grigoreva.svetl@gmail.com

Received February 18, 2022 / Revised May 11, 2022 / Accepted July 11, 2022

Keywords: *Broknes Peninsula, glacial lakes, hydrological regime, lake basin, Larsemann Hills, underwater relief.*

Summary

Results of studying the bottom relief of a unique small reservoir (lake) located in the south of the Broknes peninsula, the oasis of the Larsemann Hills (East Antarctica) are presented. The first reliable depth measurements carried out in January 2022 demonstrated that within the shallow basin of the lake (average depth of 1 m or less) there are four narrow depressions (canyons) with a width of 5.5 m or less and a depth reaching 27.7 m. Such a character of bottom relief has not been found before in any of the more than 150 known lakes of this oasis. To study this phenomenon, we performed fieldwork including hydrological observations, measurements of water temperature and mineralization at different horizons, high-precision bathymetric survey, and the underwater photography together with geological and geophysical investigations of the lake bank slope. A working hypothesis explaining the origin of such unusual bottom relief suggests a version of frost cracking that propagates along the fracture zone in the bedrock followed by the formation of cryoeluvium and the removal fine-grained particles (suffusion).

Citation: Grigoreva S.D., Kuznetsova M.R., Shitov M.V., Priakhina G.V., Kashkevich M.P. Anomalous bottom topography of a small lake in the Larsemann Hills Oasis (East Antarctica). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (3): 377–386. [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673422030139, edn: eqoaxq.

Поступила 18 февраля 2022 г. / После доработки 11 мая 2022 г. / Принята к печати 11 июля 2022 г.

Ключевые слова: *гидрологический режим, ледниковые озёра, озёрная котловина, подводный рельеф, полуостров Брокнес, Холмы Ларсеманн.*

В результате полевых работ 2021/22 г. в оазисе Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) описан малый водоём с уникальными для данного региона морфометрическими характеристиками. При размерах 143 × 53 м и средней глубине большей части котловины около 1 м в его котловине развита четыре узких впадины, ширина которых не превышает 5,5 м, а глубина достигает 27,7 м. Приведены результаты гидрологических работ на этом озере, геолого-геофизического обследования его котловины, а также предварительная гипотеза о механизме его формирования.

Введение

В оазисе Холмы Ларсеманн известно более 150 пресных озёр. Наиболее систематическое их описание, включающее в себя основные морфометрические характеристики, приведено в Атласе, составленном по результатам работ Австралийской антарктической экспедиции (Gillieson

et al., 1990). Более подробные сведения о строении и гидрологическом режиме некоторых из этих озёр изложены в материалах современных исследований. К настоящему времени достаточно полно изучены озёра п-ова Брокнес. Именно в этой части оазиса известны наиболее крупные и глубокие водоёмы: озеро Прогресс (наибольшая приводимая в публикациях площадь водной

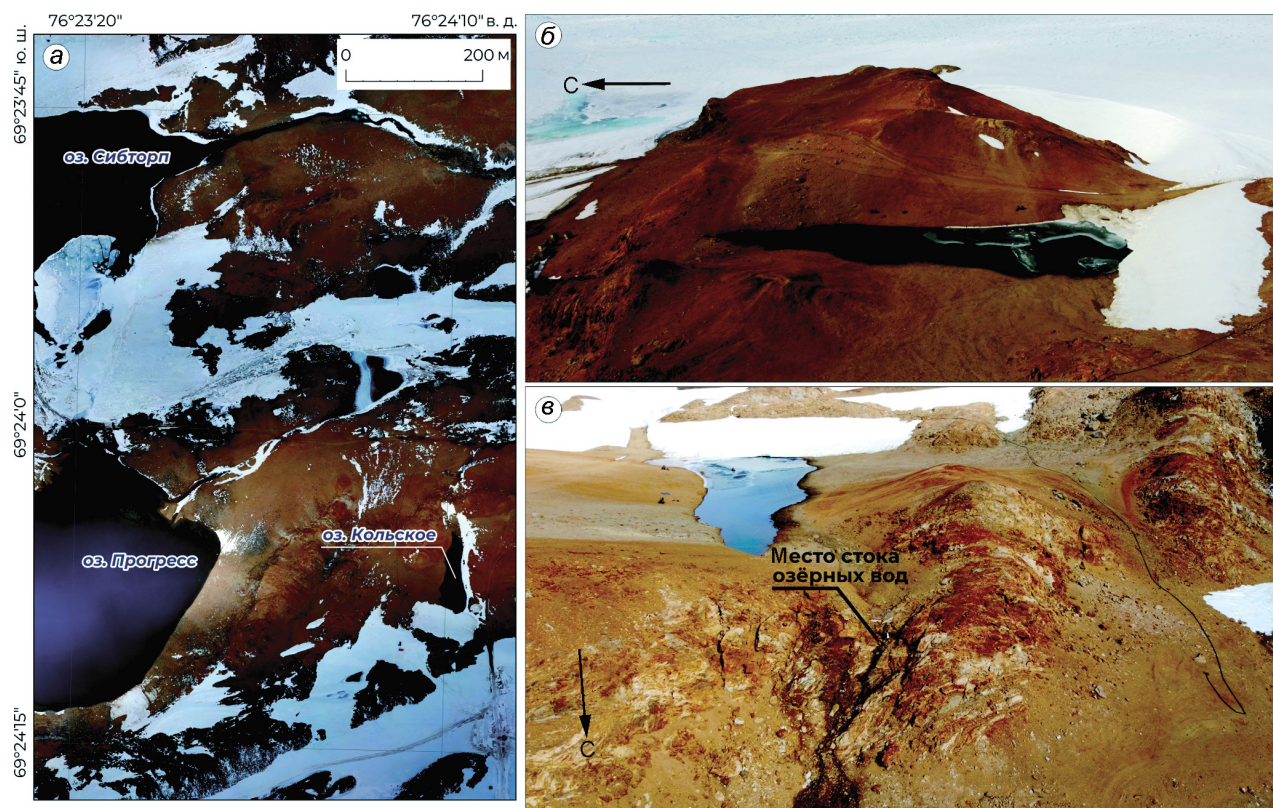


Рис. 1. Общая характеристика озера Кольское:

a – схема расположения (ортофотоплан по данным аэрофотосъёмки с применением БПЛА, выполненной 6 февраля 2020 г.); *б* – вид с запада; *в* – вид с севера

Fig. 1. General characteristics of the Kolskoe Lake:

a – location scheme (orthophoto on the data of the aerial survey with UAV performed on 6th February, 2020); *б* – view from the west; *в* – view from the north

поверхности – 160 тыс. м² (Shevnina, Kourzeneva, 2017) с максимальной глубиной 42 м (Пряхина и др., 2020); озеро Скандретт (площадь водной поверхности – 157,9 тыс. м², максимальная глубина – 17,6 м (Боронина и др., 2019); озеро Болдер, расположенное на границе оазиса и ледникового купола (площадь водной поверхности – 194,9 тыс. м², максимальная глубина – 45 м) (Boronina et al., 2021). Глубина остальных озёр оазиса не превышает 9 м (Артамонова и др., 2019).

Согласно опубликованным данным, общая черта для всех водоёмов оазиса – слаборасчлennый характер подводного рельефа. Даже в самых глубоких озёрах отсутствуют значительные уклоны и локальные перепады отметок дна: это показывают детальные батиметрические схемы (Боронина и др., 2019) или, при их отсутствии, рекогносцировочные профили глубин, приведённые в Атласе (Gillieson et al., 1990). Принципиально иной подводный рельеф описан автора-

ми в процессе сезонных работ 67-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ, 2021/22 г.) при изучении малого озера LH-54 – нумерация согласно Атласу (Gillieson et al., 1990) в южной части п-ова Брокнес. Первые результаты детальных гидрологических работ, выполненных на этом водоёме, приводятся в настоящей статье. Поскольку на топографических картах района работ официальное название у объекта исследования отсутствует, авторы используют для него в статье рабочее название «озеро Кольское».

Озеро Кольское вытянуто с юга на север и расположено в пологой котловине, развитой на останцовой возвышенности в краевой части оазиса, недалеко от полевой базы Прогресс-1 (рис. 1, *a*, *б*). По данным аэрофотосъёмки, выполненной авторами при помощи беспилотного летательного аппарата в сезон 65-й РАЭ, максимальная длина озера – 143 м, максимальная ширина – 53 м; площадь озера оценивает-

ся в 4385 м². Надводная часть озёрной котловины в летнее время преимущественно свободна от снежного покрова; исключение составляет многолетний снежник в южной части водоёма. Озеро относится к периодически сточному; разгрузка водных масс происходит в летний период по ложине, расположенной к северу от береговой линии (см. рис. 1, в). Гидрологические работы на оз. Кольское в сезон 67-й РАЭ выполнялись в рамках многолетней научно-прикладной программы изучения водных объектов оазиса, начатой в 2017 г. Основные задачи исследований — батиметрическая съёмка и наблюдения за гидрологическим режимом. Первые рекогносцировочные работы показали нехарактерные черты подводного рельефа водоёма, поэтому план работ был дополнен подводной фотосъёмкой и геолого-геофизическими работами в пределах берегового склона.

Методика исследований

Геодезическое обеспечение всех видов работ, в том числе определение абсолютных планово-высотных координат площадок водомерных постов и позиционирование точек промеров глубин, выполнялось при помощи высокоточного DGPS-приёмника EFT. Средняя точность определения плановых координат составила ± 6 мм, высотных — ± 3 мм.

Батиметрическую съёмку оз. Кольское вели с надувной вёсельной лодки. В зависимости от глубины водоёма в точке измерения применяли один из двух методов. Если глубина не превышала 2 м, то планово-высотные координаты точек дна находили путём непосредственной установки DGPS-приёмника на вехе на дно котловины. При таком способе промера первичной информацией служили координаты (в том числе абсолютная высота над уровнем моря) точки подводной котловины. Для пересчёта этой величины в глубину озера использовали данные об уровне водной поверхности на момент съёмки и абсолютные координаты водомерного поста. Несомненное преимущество такого метода — высокая точность наблюдений, обеспечиваемая геодезическим классом используемой аппаратуры. На остальных участках акватории глубину измеряли при помощи ручного лота, а плановые координаты

точек промеров также с помощью DGPS-приёмника, помещаемого над водной поверхностью. Во время выполнения работ большая часть озера была покрыта льдом, недостаточно крепким для безопасного пешего выхода, поэтому работы с лодки сопровождались искусственным разрушением ледяного покрова вручную.

Подводную фото- и видеосъёмку вели с помощью подводного аппарата Gladius Mini, оснащённого 4К-камерой и позволяющего получать снимки с разрешением до 12 Мп. Естественные ограничения радиуса действия дрона — длина кабеля, соединяющего его с надводным пультом управления, а также условия освещения: несмотря на наличие встроенного осветительного прибора, на больших глубинах его мощность недостаточна для получения чёткой картины.

Наблюдения за гидрологическим режимом оз. Кольское предусматривали мониторинг уровня воды на временном водомерном посту свайного типа, а также измерения распределения температуры и минерализации по глубине. Для последующих лабораторных исследований во впадинах I и II (рис. 2, а) через каждые 3 м глубины также отбирали пробы воды. Измерения минерализации и температуры выполнены на двух вертикалях, расположенных во впадинах I и II. Работы проводили с лодки. Пробы воды поднимали с горизонтов батометром-бутылкой, а необходимые параметры определяли мультимонитором Ultrapen PT1. Точность прибора составляет $\pm 0,1^\circ\text{C}$ и $\pm 1\%$ от показаний минерализации.

Мощность рыхлых отложений, развитых в котловине оз. Кольское, определялась в процессе георадарной съёмки с помощью георадара Zond 12e с антенным блоком 500 МГц; планово-высотное позиционирование сети наблюдений обеспечивалось совместным применением одометра георадара и DGPS-приёмника EFT. Сетью геофизических профилей была покрыта вся надводная часть озёрной котловины. Для уверенного определения кровли парагнейсов, если это позволял рельеф, профили заканчивали на выходах коренных пород. Дополнительно в двух точках, где по данным георадиолокации мощность рыхлых отложений была минимальной, были пройдены заверочные шурфы.

Георадиолокационные данные обрабатывали по стандартному алгоритму, предусматривающему: первичную оценку качества материала; выбор

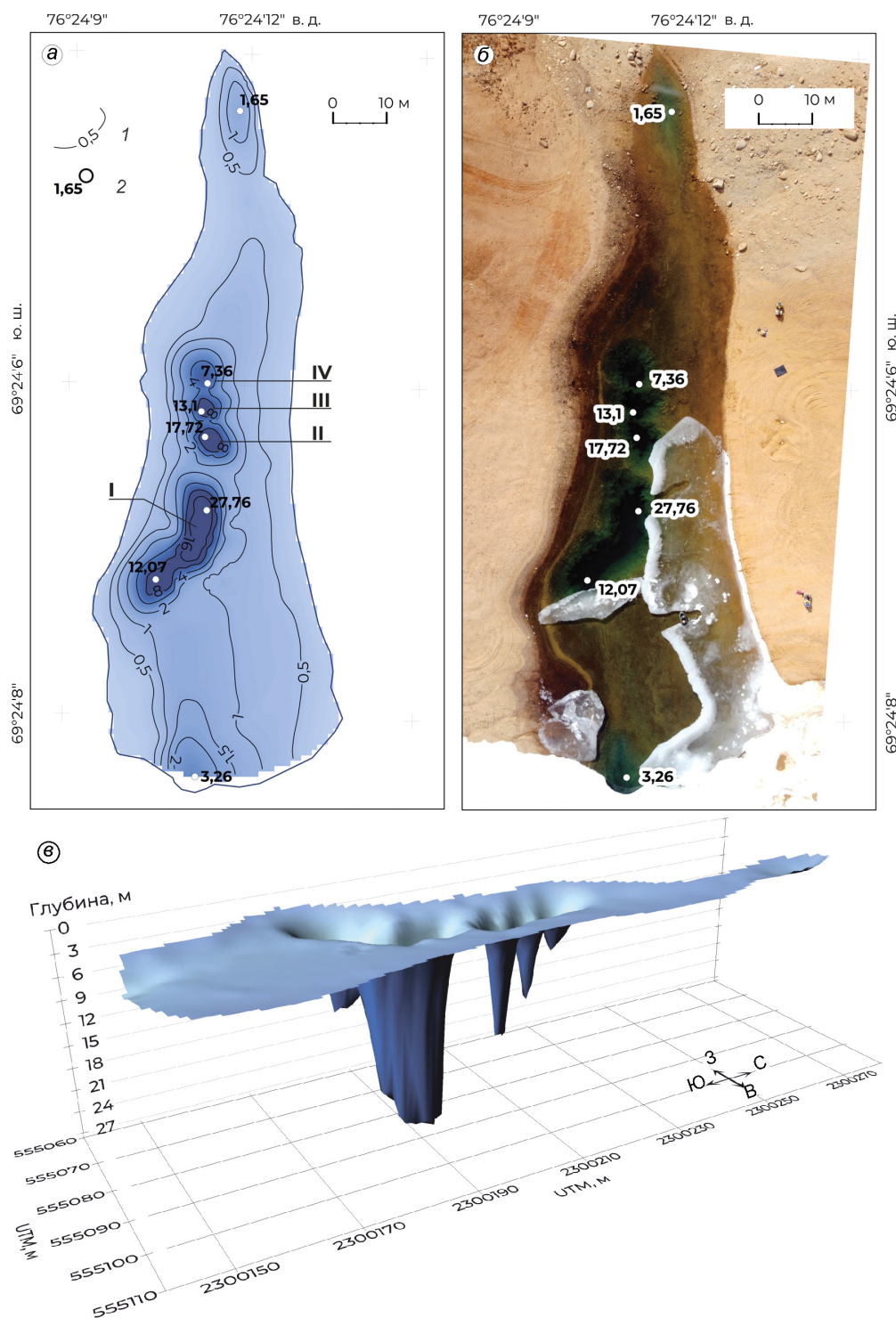


Рис. 2. Строение котловины озера Кольское:

a – батиметрическая схема (при высотной отметке водной поверхности 87,86 м над ур. моря): 1 – изобаты, м; 2 – точки максимальных глубин, м; I–IV – нумерация впадин; *б* – ортофотоснимок, иллюстрирующий строение котловины (фото выполнено С.Д. Григорьевой при помощи беспилотного летательного аппарата DJI Mavic Mini, дата снимка 3 февраля 2022 г.); *в* – трёхмерная модель котловины оз. Кольское

Fig. 2. Structure of the basin of the Kolskoe Lake:

a – bathymetric scheme (altitude of the water surface: 87,86 m above sea level): 1 – isobaths, m; 2 – points of maximum depths, m; I–IV – numbering of depressions; *б* – orthophoto illustrating the structure of the basin (photo taken by S.D. Grigoreva with UAV DJI Mavic Mini on 3rd February 2022); *в* – 3D-model of the basin of the Kolskoe Lake

профиля усиления; горизонтальную фильтрацию, направленную на подавление воздушной волны; частотную фильтрацию; пересчёт временных разрезов в глубинные. Значение относительной диэлектрической проницаемости, отвечающее исследуемым рыхлым отложениям, находили методом подбора с учётом промеров в шурфах. Подобранный значение считалось корректным, если мощность осадочной толщи, определённая на разрезе при таком значении, совпадала с мощностью, измеренной в этой же точке профиля в шурфе. Величина относительной диэлектрической проницаемости для слоя рыхлых обломочных отложений берегового склона оз. Кольское составила 5,5 ед.

Результаты исследований

Морфометрические характеристики оз. Кольское. На батиметрической схеме озера (см. рис. 2, а) видно, что его котловина вытянута с юга на север и сужается в северной оконечности. На фоне слаборасчленённого подводного рельефа и малых (до 1 м) глубин вдоль западного берега озера развита серия впадин. Самая южная впадина (см. рис. 2, а, I) имеет форму жёлоба, глубина которого увеличивается с юга на север, достигая 27,76 м (максимальная измеренная глубина озера). Расположенные севернее впадины II–IV характеризуются воронкообразным строением. Максимальные глубины в них составляют 17,72, 13,1 и 7,36 м для впадин II, III, IV

соответственно. Общая для всех впадин черта строения — форма стенок: в восточной части стенки практически вертикальные; с западной стороны в пределах первых метров глубины выражены крутые склоны, ниже переходящие в отвесные. Между собой впадины разделяются узкими гребнями.

В южной и северной частях котловины отмечаются пологие локальные понижения поверхности дна с глубинами, не превышающими 4 м. Детальная съёмка рельефа дна в южной оконечности озера не выполнялась, так как акватория здесь частично перекрыта многолетним снежником. Наличие и форма впадин, выявленных по результатам батиметрической съёмки, дополнительно иллюстрируются аэрофотоснимком (см. рис. 2, б), а общий характер котловины озера наглядно показан на трёхмерной модели (см. рис. 2, в).

Подводная фотосъёмка. Данные, полученные по результатам подводной съёмки, показывают, что и стенки впадин, и разделяющие их хребты сложены преимущественно угловатыми глыбами (рис. 3, а) размером от 0,3 м до 1,5 м. На глубинах до 12–13 м обломки покрыты водорослями; ниже водоросли визуально не наблюдаются, а на некоторых глыбах отмечается полосчатость (см. рис. 3, б), характерная для парагнейсов, выходящих на дневную поверхность вокруг котловины озера. Эти оценки имеют предварительный характер. Надёжное определение состава обломочных пород на дне оз. Кольское и коренных пород его побережья возможно только по результатам опробования. Дно самой глубокой

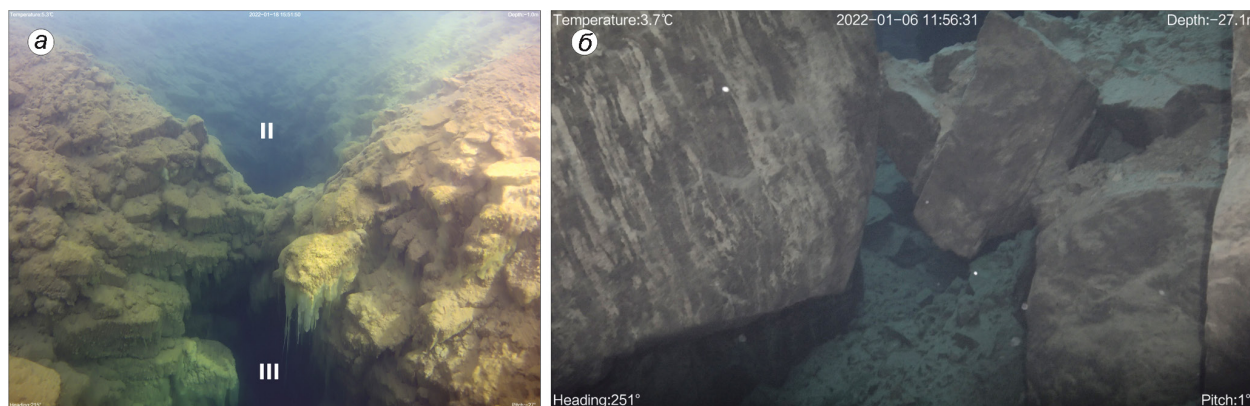


Рис. 3. Подводные фотографии озера Кольское:

а — вид на перемычку, разделяющую впадины II и III; б — дно впадины I

Fig. 3. Underwater photos of the Kolskoe Lake:

а — view on the wall dividing the depressions II and III; б — bottom of the depression I

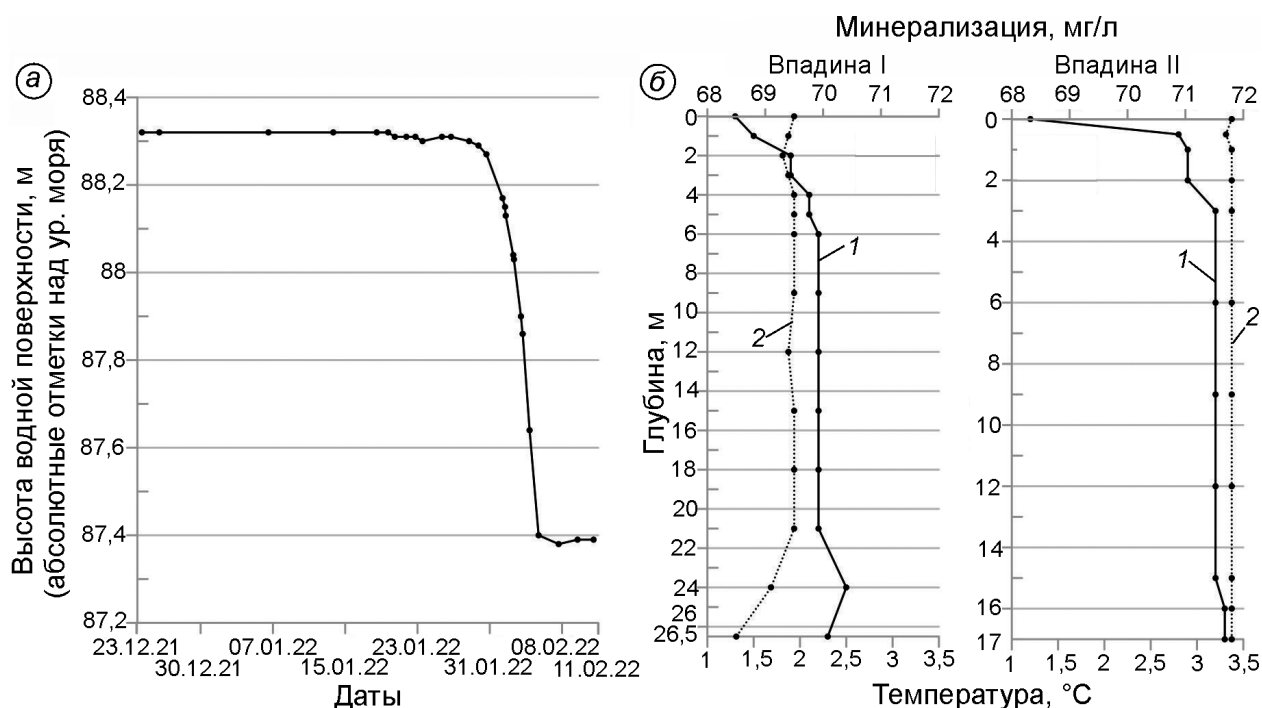


Рис. 4. Результаты гидрологических наблюдений:

a – график изменения высотной отметки водной поверхности; *б* – распределение температуры (1) и минерализации (2) по глубине во впадине I и впадине II

Fig. 4. Results of hydrological observations:

a – graph of the altitude of the water surface; *б* – distribution of temperature (1) and mineralization (2) at different horizons at the depression I and at the depression II

впадины I (см. рис. 3, б) сложено более мелкозернистым материалом. Установить гранулометрический состав донных осадков по фото- и видеоматериалам невозможно, но очевидно, что крупнообломочного материала здесь мало. В процессе запусков подводного аппарата установлена ещё одна особенность строения впадин, важная для объяснения их генезиса, – наличие сообщения между ними. Так, при погружении во впадину II обнаружено, что на глубине 13 м в стенке, отделяющей её от впадины III, есть сквозная щель, через которую пробивается свет с дневной поверхности. Наличие таких отверстий отмечалось и в верхней части впадин визуально при работах с лодки.

Гидрологический режим озера. График изменения абсолютной высотной отметки водной поверхности оз. Кольское показывает, что в период с 23 декабря 2021 г. (начало наблюдений) по 29 января 2022 г. уровень воды практически не менялся и составлял 88,31 м над ур. моря (рис. 4, а). В это же время из озера вытекал ручей с истоком в северной части котловины, кото-

рый занимал ложину, образуя каскад небольших водопадов, он показан пунктирной линией на рис. 5. Открытое русло ручья пересохло к 30 января, однако сток по ложине не прекратился, при этом изменилось место выхода озёрных вод в ложину. С 30 января вода вытекала из системы открытых трещин коренных пород в 10 м к востоку от пересохшего русла ручья на абсолютной высоте 85,79 м, она изображена сплошной линией на рис. 5. Вероятно, разгрузка озёрных вод продолжалась путём инфильтрации сквозь борт котловины, сложенной рыхлыми четвертичными отложениями и/или по системе трещин в коренных породах. На графике этот период характеризуется снижением уровня на 90 см (см. рис. 4, а). Начиная с 7 февраля уровень оз. Кольское установился на абсолютной высотной отметке 87,39 м, а сток по ложине прекратился.

Распределение температуры по глубине как для впадины I, так и для впадины II (см рис. 4, б) схожее – наименьшие значения характерны для приповерхностного слоя воды (1,3 и 1,2 °C соответственно). В пределах первых метров темпера-

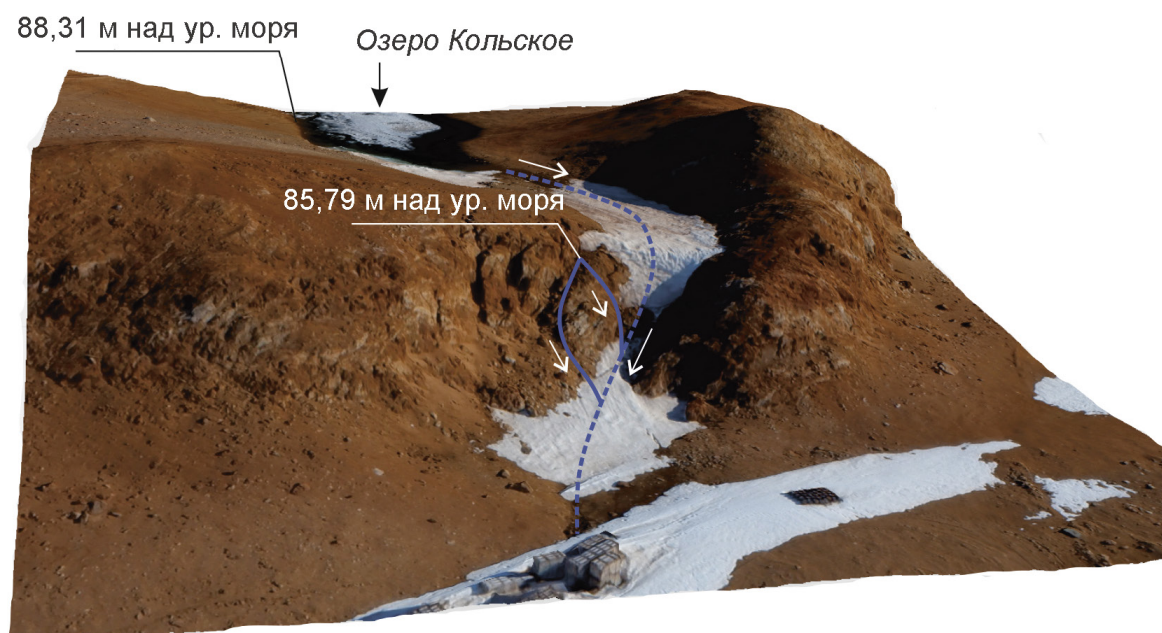


Рис. 5. Пути разгрузки водных масс озера Кольское.

Пунктирная линия — поверхностный сток, сплошные линии — сток с разгрузкой через систему трещин в коренных породах. Модель рельефа построена по результатам аэрофотосъёмки с применением БПЛА, выполненной 6 февраля 2020 г.

Fig. 5. Pathways of discharge of the water masses of the Kolskoe Lake.

The dotted line shows surface water stream, the solid lines show water flow direction through cracks in solid rocks. Terrain model created on the data of the aerial survey with UAV performed on 6th February 2020

тура возрастает, достигая $2,1^{\circ}\text{C}$ на глубине 4 м во впадине I и $3,2^{\circ}\text{C}$ на глубине 3 м во впадине II. Ниже температура воды практически не меняется, за исключением горизонта 24 м во впадине I, где измеренное значение составляет $2,5^{\circ}\text{C}$. Распределение минерализации с глубиной в обеих впадинах однородно, изменчивость измеренных значений находится в пределах погрешности прибора. Средняя величина общей минерализации во впадине II составляет $71,8\text{ мг/л}$, а во впадине I — $69,4\text{ мг/л}$.

Оценка геологического строения береговой части котловины. По данным геологической карты оазиса Холмы Ларсеманн (Carson, Grew, 2007), оз. Кольское расположено в области распространения неопротерозойского гранатсодержащего кварц-полевошпатового парагнейса (Broknes paragneis). Согласно полевым наблюдениям, в пределах надводной части котловины гнейсы перекрыты рыхлыми осадками — неокатанным разнотерным песком (от 0,2 до 1 мм), дресвой с щебнем и глыбами разного размера. В составе песчаной фракции преобладают зёрна граната и кварца, последние покрыты окристыми плёнками. Породы не мёрзлые, верх-

ние 10 см сухие, ниже слегка влажные. Пример георадарного разреза, характеризующего участок исследования, приводится на рис. 6, а (схема расположения сети съёмки показана на рис. 6, б). Граница рыхлых отложений и коренных пород (на рис. 6, а показана пунктирной линией) уверенно прослеживается вдоль всего профиля. Максимальная мощность осадков на приведённом разрезе составляет 1,4 м, минимальная — 0,4 м. С профиля 60 м граница становится менее разрешённой по вертикали, но более контрастной, амплитуда отражённой электромагнитной волны возрастает. Такая волновая картина характерна для обводнённых участков. В этом месте профиль действительно проходил вдоль интенсивно тающего снежника. Повышенное содержание влаги в рыхлых отложениях отмечается как на поверхности, так и в разрезе шурфа.

Анализ данных георадиолокации показал, что надводная часть котловины оз. Кольское имеет достаточно простое геологическое строение. Коренные породы (парагнейсы Брокнес, по Carson, Grew, 2007) перекрыты слоем рыхлых обломочных отложений, мощность которых не превышает 1,5 м. Для последующих лаборатор-

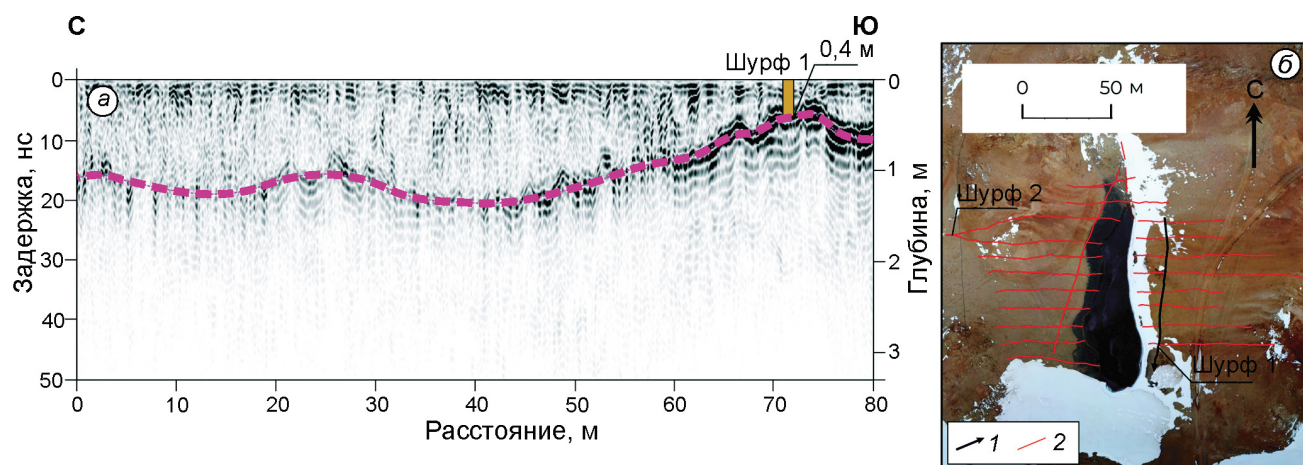


Рис. 6. Пример георадарного разреза в пределах берегового склона озера Кольское:

a – разрез по продольному профилю вдоль восточного берега, пунктирной линией показана граница рыхлых отложений и гнейсов; *б* – схема выполненных работ; на фрагменте *б*: 1 – георадарный профиль, показанный на фрагменте *a*; 2 – остальные профили

Fig. 6. An example of GPR section within the bank slope of the Kolskoe Lake

a – GPR section along the profile at the eastern bank; the dotted line on a marks the boundary between unconsolidated sediments and gneiss; *б* – scheme of survey; legend for *б*: 1 – GPR line shown at Fig. *a*; 2 – all other GPR lines

ных исследований отобраны образцы рыхлых осадков с поверхности и из разных горизонтов в шурфах, а также гнейсов из расположенных рядом обнажений.

Обсуждение результатов

В результате комплекса исследований на оз. Кольское получены данные о строении его котловины, значительно отличающиеся от ранее опубликованных. Согласно Атласу (Gillieson et al., 1990), котловина имеет слабонаклонное дно, а максимальная глубина озера составляет 14 м. Работы, по результатам которых составлялся этот атлас, носили рекогносцировочный характер, и на оз. Кольское был выполнен только один профиль с промерами глубин. Учитывая, что глубокие впадины, установленные авторами настоящей статьи, имеют небольшую ширину и локализованы в западной части озера, они вероятнее всего оказались в стороне от рекогносцировочного профиля, показанного в Атласе. Анализ опубликованных материалов и многолетние полевые наблюдения показывают, что морфологические особенности котловины оз. Кольское уникальны и ранее в пределах оазиса не отмечались. Этот феномен ещё только предстоит объяснить в ходе дальнейших исследований. Тем

не менее, уже сейчас можно предложить объяснение возможного механизма формирования глубоких впадин в котловине озера. Согласно авторам настоящего исследования, наименее противоречивы такие предположения.

1. Оз. Кольское сформировалось в климатических условиях, более холодных по сравнению с современными, и представляло собой неглубокий водоём, заполняющий пологую депрессию. В зимний период озеро промерзало на всю глубину.

2. Участок подводной котловины, где сейчас расположены впадины, был приурочен к ослабленной зоне повышенной трещиноватости коренных пород. Под действием ледового забоя существующие трещины расширялись и углублялись. Формирующийся криоэлювий был представлен обломками от алевритовых до крупнообломочных фракций.

3. По системе связанных трещин в коренных породах в летний период происходил подземный сток озёрных вод, сопровождающийся выносом частиц мелких фракций (суффозия), а крупные обломки (щебень, глыбы) оставались неподвижными и выполняли стенки впадин.

4. Затем произошло последовательное перекрытие подземного стока на разных уровнях и вынос мелкого материала за счёт суффозии из глубоких впадин прекратился. Такое предположение косвенно подтверждает уменьшение мак-

симальных глубин во впадинах с юга на север, т.е. в направлении к месту современного стока из озера. Возможная причина перекрытия стока — цементация трещин мелкозернистым материалом и/или проградация озёрного фронта на север, где он встречал новые трещины, не забитые мелкозернистыми частицами и расположенные выше.

Для подтверждения и детализации этих предположений или их опровержения, а также разработки другой модели образования уникальной котловины оз. Кольское необходимы лабораторные исследования и в первую очередь определение гранулометрического состава рыхлых отложений со склона котловины и со дна озера (для оценки возможности развития суффозии). Запланирован комплекс изысканий: морфоскопия обломочных частиц; определение продолжительности атмосферной экспозиции коренных пород берегового склона; оценка возраста донных и покровных отложений побережья. Приоритетные задачи в последующие полевые сезоны — отбор колонки донных осадков из оз. Кольское и изучение геологического строения дна впадин.

Заключение

По результатам полевых работ 2021/22 г. установлено, что малый водоём в южной части п-ова Брокнес, не имеющий названия на топографических картах (рабочее название *озеро Кольское*), имеет уникальные морфометрические характеристики для оазиса Холмы Ларсеманн. При линейных размерах 143 × 53 м и пологой котловине с глубиной, не превышающей на большей части озера 1 м, вдоль западного берега озера развиты

четыре впадины шириной до 5,5 м и максимальной глубиной 27,7 м. Озеро Кольское — третье среди них по глубине, уступая только двум крупнейшим для данного района озёрам — Болдер и Прогресс. Согласно предварительной гипотезе, предложенной авторами, образование глубоких впадин в котловине оз. Кольское может быть следствием стадийного процесса, включающего в себя ледовый забой по системе трещин в коренных горных породах, формирование криоэлювия и интенсивную суффозию. Справедливость этих предположений предстоит уточнить при дальнейших исследованиях.

Благодарности. Авторы выражают благодарность своим коллегам по 67-й Российской антарктической экспедиции Н.В. Егоровой, А.В. Миракину, А.А. Краснову за помощь в выполнении полевых исследований и директору экспедиции по гравимантным работам АО «Южморгеология», ведущему геофизику АО «Зарубежгеология» Е.К. Григорьеву за поддержку и важные рекомендации при обсуждении результатов работ. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00343 А.

Acknowledgements. The authors are grateful to their colleagues during the 67th Russian Antarctic Expedition N.V. Egorova, A.V. Mirakin, A.A. Krasnov for their assistance with the field investigations and to the head of potential field department of JSC «Yuzhmorgeologiya», leading geophysicist of JSC «Zarubezhgeologia» E.K. Grigorev for support and significant recommendations when discussing the results of the fieldwork. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project № 20-05-00343 A.

Литература

- Артамонова К.В., Духова Л.А., Лукьянова О.Н., Масленников В.В., Зозуля Н.М. Мониторинг гидрохимического режима озёр Восточной Антарктиды за последние 10 лет // II Всерос. науч.-практ. конф. «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 2019. С. 97–106.
- Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Гидрологическая характеристика озёр восточной части полуострова Брокнес, Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 39–48. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-39-48.

References

- Artamonova K.V., Dukhova L.A., Lukianova O.N., Maslennikov V.V., Zozulia N.M. Monitoring of the hydrochemical regime of lakes of East Antarctica during the last 10 years. II Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii», 2019 g. Proc. of the II All-Russian Scientific and Practical Conference «Modern Trends and Prospects for the Development of Hydrometeorology in Russia», 2019. Irkutsk, 2019: 97–106. [In Russian].
- Boronina A.S., Popov S.V., Pryakhina G.V. Hydrological characteristics of lakes in the eastern part of the Broknes Peninsula, Larsemann Hills, East Antarctica.

- Пряхина Г.В., Четверова А.А., Григорьева С.Д., Боронина А.С., Попов С.В. Прорыв озера Прогресс (Восточная Антарктида): подходы к оценке прорывного паводка // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 4. С. 613–622. doi: 10.31857/S2076673420040065.
- Boronina A.S., Popov S.V., Pryakhina G.V., Chetverova A.A., Ryzhova E.V., Grigoreva S.D. Formation of a large ice depression in Dalk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity // Journ. of Glaciology. 2021. V. 67. № 266. P. 1121–1136. doi: 10.1017/jog.2021.58.
- Carson C.J., Grew E.S. Geology of the Larsemann Hills, Antarctica First Edition (1:25 000 scale map) // Geoscience Australia, Canberra. 2007.
- Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elisabeth Land, Antarctica // Australian National Antarctic Research Expeditions, Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sports, the Environment, Tourism, and Territories. 1990. V. 74. 173 p.
- Shevnina E., Kourzeneva E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2017. T. 69. № 1. P. 1317202. doi: 10.1080/16000870.2017.1317202.
- Led i Sneg. Ice and Snow. 2019, 59 (1): 39–48. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-39-48.
- Pryakhina G.V., Chetverova A.A., Grigorieva S.D., Boronina A.S., Popov S.V. Breakthrough of Lake Progress (East Antarctica): a phenomenological model and approaches to assessing the characteristics of a flash flood. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020, 60 (4): 613–622. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420040065.
- Boronina A.S., Popov S.V., Pryakhina G.V., Chetverova A.A., Ryzhova E.V., Grigoreva S.D. Formation of a large ice depression in Dalk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity. *Journ. of Glaciology*. 2021, 67 (266): 1121–1136. doi: 10.1017/jog.2021.58.
- Carson C.J., Grew E.S. Geology of the Larsemann Hills, Antarctica First Edition (1:25 000 scale map). Geoscience Australia, Canberra, 2007.
- Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elisabeth Land, Antarctica. Australian National Antarctic Research Expeditions, Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sports, the Environment, Tourism, and Territories. 1990, 74: 173 p.
- Shevnina E., Kourzeneva E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2017, 69 (1): 1317202. doi:10.1080/16000870.2017.1317202.