

Гидрологическая характеристика озёр восточной части полуострова Брокнес, холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида

© 2019 г. А.С. Боронина^{1*}, С.В. Попов^{2,1}, Г.В. Прякина¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

²Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия

*al.b.s@yandex.ru

Hydrological characteristics of lakes in the eastern part of the Broknes Peninsula, Larsemann Hills, East Antarctica

A.S. Boronina^{1*}, S.V. Popov^{2,1}, G.V. Pryakhina¹

¹Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; ²Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia

*al.b.s@yandex.ru

Received July 5, 2018 / Revised October 16, 2018 / Accepted December 21, 2018

Keywords: *breakthrough flood, Broknes Peninsula, East Antarctica, hydrological study, Larsemann Hills.*

Summary

Broknes Peninsula (the area of the Progress station, Larsemann Hills, Princess Elisabeth Land, East Antarctica) is characterized by the presence of well developed hydrographic network consisting of reservoirs located not only in the bedrock, but also inside the glacier thickness and on its surface. As a rule, most of them are dammed by natural snow-ice weirs, which are often destroyed during the Antarctic summer. As a result of this process, glacial water outburst may occur. In the course of the summer season of the 63-th Russian Antarctic Expedition (RAE) intensive hydrological field observations were carried out for identification and comprehensive investigation of potentially outburst-prone reservoirs located in close proximity to Russian and foreign stations and field bases (area of the Progress station and the field base Law-Racovita). The works included: the organization of temporary pile and depth-stick water gauge stations, mapping positions of the shoreline of lakes (reservoirs), bathymetric surveys of them, as well as field hydro-chemical express analyses. Based on the results of the level measurement, it was found that most of the lakes of the oasis are characterized by a sharp drop in the height of the water surface level associated with the breakthroughs. In particular, the authors witnessed the breakthrough of the Discussion Lake, which occurred on January 22, 2018. This resulted in decrease of the water level by 0.95 m. Based on the data of the bathymetric surveys, the morphometric (hydrometric) characteristics of the lakes were calculated and detailed grids (regular net of rectangular matrices, in the nodes of which some effective values of the mapped values are located) were formed for the following numerical modeling of hypothetical and real breakthroughs of water bodies and construction of estimated hydrographs.

Citation: 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. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (1): 39–48. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-39-48.

Поступила 5 июля 2018 г. / После доработки 16 октября 2018 г. / Принята к печати 21 декабря 2018 г.

Ключевые слова: *Восточная Антарктида, гидрологическая изученность, полуостров Брокнес, прорывной паводок, холмы Ларсеманн.*

Приведены результаты гидрологических исследований прорывоопасных озёр, расположенных недалеко от отечественных и зарубежных станций и полевых баз. Установлены основные прорывоопасные водоёмы и сформированы подробные grids (регулярная сеть прямоугольных матриц, в узлах которых располагаются значения картируемых величин) исследуемых водных объектов для проведения математического моделирования.

Введение

Озёра, подпруженные снежно-ледяными перемычками, относятся к крайне неустойчивым водным объектам. При переполнении водоёма напряжение, оказываемое на естественную плотину, может достигнуть предельных значений, что станет причиной её быстрого разрушения. Часто резкие сбросы озёрных вод приводят к катастрофическим стихийным бедствиям — прорывным паводкам,

провалам и депрессиям в ледниках [1, 2]. Изучению потенциально прорывоопасных озёр, расположенных в горных районах, посвящено большое число научных публикаций [3–7]. Отметим, что подобные явления нередки и в полярных регионах нашей планеты [8–11]. Так, 30 января 2017 г. в леднике Долк (Dalk Glacier, холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) образовался провал значительных размеров. Согласно [10, 11], причиной его формирования было прохождение прорывного

подледникового паводка. Аналогичные процессы характерны и для арктических ледников. Например, с прорывами озёр Исландии связано много катастрофических событий [12–14], и исландский термин «*jökulhlaup*», характеризующий прорывные паводки, прочно укоренился в научной литературе.

Именно поэтому гидрологические исследования в ходе летнего полевого сезона 63-й РАЭ (2017/18 г.) на п-ове Брокнес (Broknes Peninsula) были направлены на решение не столько научных, сколько прикладных задач по обеспечению безопасности транспортных операций. Выполненные работы были связаны с выявлением потенциально прорывоопасных водоёмов, расположенных в непосредственной близости от отечественных и зарубежных станций и полевых баз.

Обзор опубликованных источников показывает, что водные объекты указанного района изучены достаточно слабо. Один из основополагающих трудов — Атлас, составленный по результатам исследований Австралийской антарктической экспедиции (ANARE) [15]. Однако размеры озёр и объёмы водных масс постоянно меняются и по прошествии практически трёх десятилетий целесообразно дополнить и уточнить имеющиеся данные. Именно поэтому на основных (самых больших по размеру) озёрах, расположенных вблизи инфраструктуры РАЭ, был выполнен комплекс работ, который включал в себя: организацию временных водомерных постов; измерение температуры приповерхностного слоя водной толщи; картографирование береговой линии озёр, их батиметрическую съёмку и отбор проб воды для гидрохимического экспресс-анализа. Все исследования — первые шаги на пути исследования вопросов, связанных с выявлением потенциально опасных озёр, их формированием и последующей эволюцией (рис. 1).

Район детальных исследований

Оазис Ларсеманн (Larsemann Hills) располагается между оазисом Вестфолль (Vestfold Hills) и шельфовым ледником Эймери (Amery Ice Shelf) на юго-восточном берегу залива Прюдс (Prydz Bay) — Земля Принцессы Елизаветы (Princess Elizabeth Land), Восточная Антарктида. Он представляет собой район в основном свободный от ледникового покрова и состоящий из множе-

ства мелких (около 130) и двух более крупных полуостровов — Сторнес (Stornes Peninsula) и Брокнес. Их линейные размеры оцениваются в 6200×7400 м и 4180×5830 м соответственно. Общая площадь территории составляет около 50 км^2 и ограничена на юге склоном Восточно-Антарктического покровного ледника, а на юго-западе — выводным ледником Долк.

Характерная особенность района холмов Ларсеманн — наличие развитой гидрографической сети (более 150 пресных озёр). Так, на п-ове Брокнес расположена обширная система водных объектов, приуроченных к отрицательным формам рельефа [15–17]. Используемые в статье наименования водных объектов соответствуют официальным названиям, приведённым на австралийской карте [18]. Исключение составляет озеро, расположенное рядом с полевой базой Прогресс-3. Ввиду отсутствия официального наименования авторами используется название озеро «Ледяное». Для описываемого района характерно наличие многочисленных снежников и малых ледников. Некоторые из них имеют сезонный характер и постепенно исчезают или значительно меняют свои очертания в течение антарктического лета. Их мощность незначительна и обычно не превышает первых десятков метров.

Методика выполнения полевых работ

Для получения информации об уровненом режиме исследуемых водных объектов на шести озёрах (Рейд, Скандретт, Дискашн, Сибторп, Прогресс и LN73) были оборудованы временные свайные водомерные посты. Отметки площадок свай определялись нивелировкой от временно назначенного репера водомерного поста в условной системе координат. Высота последнего устанавливалась с помощью барометрического нивелирования. Кроме свайных, на двух озёрах (Болдер и «Ледяное») открыты реечные водомерные посты. Для измерения уровня на отвесном скальном основании была закреплена рейка высотой 2 м. Уровни воды, регистрируемые на водомерных постах, отнесены к условной плоскости нуля графика. Наряду с измерениями уровней, на озёрах отбирали пробы для полевого гидрохимического экспресс-анализа и последующего, более детального определения содержания главных ионов. Для из-

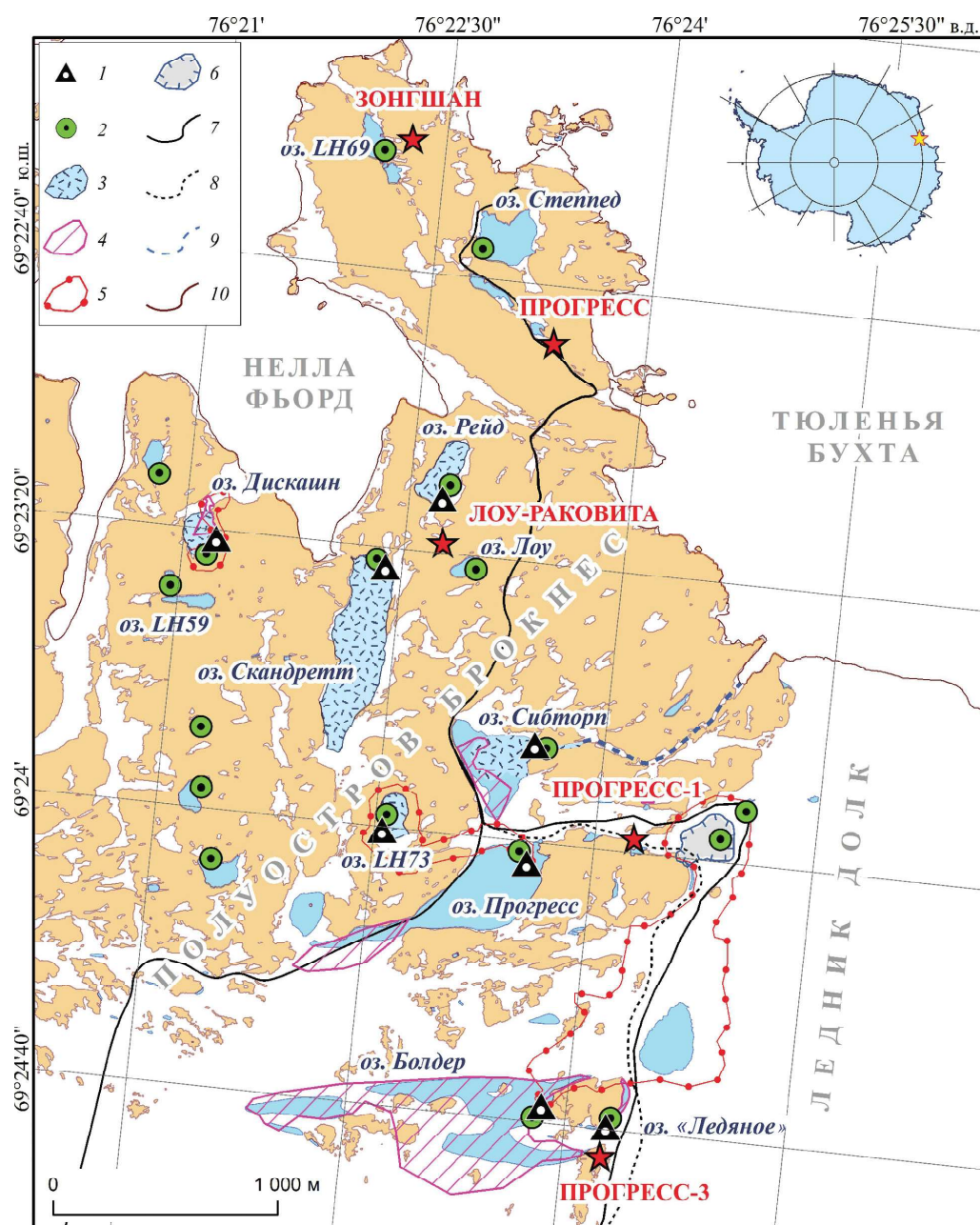


Рис. 1. Схема расположения гидрологических работ в восточной части полуострова Брокнес.

1 – водомерные посты; 2 – пункты отбора проб на гидрохимический анализ; районы выполнения: 3 – батиметрических съёмок; 4 – георадарного профилирования; 5 – тахеометрических съёмок; 6 – провал в леднике Долк; 7 – действующие дороги; 8 – дорога, участок которой разрушен провалом; 9 – временный ручей из оз. Сибторп; 10 – береговая линия

Fig. 1. Location chart of the hydrological works in the Eastern part of Broknes Peninsula.

1 – water measurements stations; 2 – sampling points for hydrochemical analysis; areas of: 3 – bathymetric surveys; 4 – GPR profiles; 5 – the tachymetric surveys; 6 – depression in Dalk Glacier; 7 – active roads; 8 – it is a road which was partly destroyed by depression; 9 – temporary stream of lake Sibthorpe; 10 – coastline

мерения удельной проводимости и минерализации воды использовался мультимонитор Ultrapen PT1 (Myron L Company, USA), обеспечивающий точность не менее 1%. Водородный показатель определялся с помощью электронного pH-метра Kellymeter PH-009(I) (Kellymeter, China).

Промеры глубин на озёрах, свободных ото льда, вели с резиновой вёсельной лодки. Для регистрации глубин использовался электронный эхолот-картплоттер Garmin GPSMAP 585 (Garmin Ltd., Taiwan). На отдельных водных объектах из-за наличия льда на акватории промеры выполняли при помощи ледового керноот-

борника Kovacs (Kovacs Enterprises, USA) и ручного лота либо с помощью георадара.

Морфометрические характеристики исследуемых озёр

По результатам промеров глубин исследуемых озёр составлены батиметрические схемы и определены основные морфометрические характеристики. Схемы составляли путём формирования гридов методом Kriging с использованием линейной вариограммы.

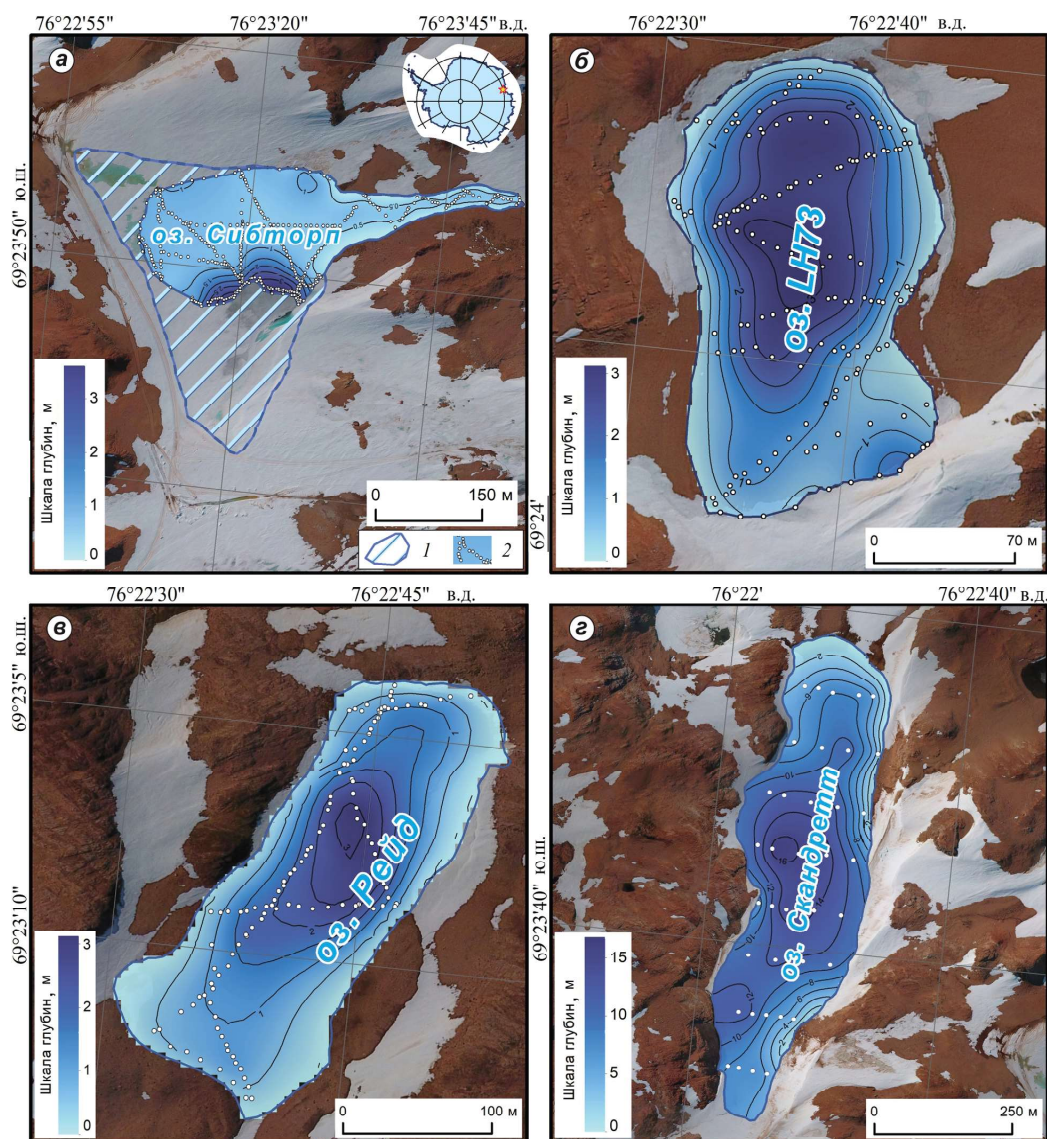


Рис. 2. Батиметрические схемы озёр Сибторп, LH73, Рейд и Скандретт.

1 – предположительное положение береговой линии оз. Сибторп при отсутствии льда; 2 – пункты промеров глубин; схема: а – оз. Сибторп; б – оз. LH73; в – оз. Рейд; г – оз. Скандретт; на заднем плане – ортофото, выполненный 8 января 2018 г. А.В. Миракиным

Fig. 2. Bathymetric schemes of the lakes Sibthorpe, LH73, Reid, Scandrett.

1 – the assumed position of the Sibthorpe lake shore line in the absence of ice; 2 – depth measurement points; the lake scheme: а – Sibthorpe; б – LH73; в – Reid; г – Scandrett; in the background, an orthophoto made on 8 January 2018 by A.V. Mirakin

Озеро Сибторп располагается к северу от самого глубокого и наибольшего по размерам водоёма п-ова Брокнес — озера Прогресс [16]. Талая вода с ледника и окружающих снежников сначала поступает в него, а затем под уклоном перетекает в Сибторп. Летом 2017/18 г. последнее представляло собой водоём на 55% вскрывшийся ото льда. Озеро практически со всех сторон было окружено снежниками, наибольший из которых располагался в его юго-восточной части и выступал в качестве подпора озёрных вод. Озеро Сибторп имеет треугольную форму (рис. 2, а). На момент выполнения батиметрической съёмки (21 января 2018 г.) его длина (расстояние между двумя наиболее удалёнными точками) составляла 540 м. Средняя ширина озера оценивалась в 100 м при максимальном значении около 190 м. Пло-

щадь акватории, свободной ото льда, была равна 54,76 тыс. м² при соответствующем объёме водной массы около 47,66 тыс. м³. В центральной и северо-западной частях озера придонная часть — пологая и глубины редко превышают 1 м (средняя глубина около 0,8 м). Максимальная глубина водоёма на изученном участке — 3,8 м. В настоящий момент район наибольших глубин имеет округлую форму и расположен вдоль фронта снежника на южном берегу. По данным аэрофотосъёмки 8 января 2018 г., выполненной А.В. Миракиным, реальные размеры водоёма оцениваются примерно в 650 × 400 м, при площади поверхности около 99,58 тыс. м². В восточной части ширина озера существенно уменьшается и оно постепенно переходит в ручей «Каньонный», который связывает водоём с бухтой Тюленьей.

Озеро LH73 расположено в овальной котловине, в непосредственной близости от системы озёр Прогресс—Сибторп. Его длина — 230 м при максимальной ширине около 140 м (см. рис. 2, б). По данным батиметрической съёмки 10 января 2018 г., площадь акватории водоёма оценивается в 23,82 тыс. м² при объёме водной массы около 39,4 тыс. м³. Области наибольших глубин расположены в центральной части. Максимальная измеренная глубина составляет 3,1 м. В южном направлении придонная часть выполаживается и глубины не превышают 1,5 м. Вдоль южного берега озеро граничит со снежником. Снежно-ледяная стенка на этом участке — практически отвесная. Периодически, в тёплый сезон года, от неё откалываются глыбы фирнизированного снега, образуя при этом относительно крупные гроты и провалы, что приводит к постепенному отступанию береговой линии водоёма. В случае переполнения котловины водой напряжение, оказываемое на описанную ранее снежно-ледяную перемычку, возрастает и происходит прорыв.

Озеро Рейд представляет собой относительно небольшой водоём, расположенный между Российской антарктической станцией «Прогресс» и Австралийской полевой базой «Лоу-Раковита». Котловина водоёма имеет форму, вытянутую с северо-востока на юго-запад (см. рис. 2, в). Её длина составляет около 330 м. Средняя ширина оценивается в 100 м при максимальной ширине 145 м. Участок наибольших глубин имеет слабовытянутую форму и смещён к северной части озера. Максимальная измеренная глубина — 3,5 м. Придонная часть водоёма — пологая, без резких уклонов и локальных перепадов отметок дна. Площадь озера на момент съёмки оценивалась в 35,53 тыс. м² при объёме вмещающей водной массы около 40,45 тыс. м³. Сток из водоёма происходит в северо-западном направлении по руслу небольшого ручья, впадающего в Нелла Фьорд. Согласно данным, приведённым в австралийском Атласе [15], длина озера составляла 300 м, а средняя ширина — около 90 м. Максимальная глубина оценивалась в 3,8 м. Из этого следует, что котловина водоёма достаточно стабильна и ежегодные сбросы водных масс несильно влияют на её деформацию.

Озеро Скандретт относится к числу наибольших водных объектов п-ова Брокнес. Оно питается водами, поступающими непосредственно с ледника. Обычно к началу января ледяной покров занимает около 80% площади водной поверх-

ности. Однако даже во время летнего сезона озеро полностью не вскрывается. С западной, восточной и южной сторон водоём окружён скалами, на которых аккумулируются снежные массы. В период таяния воды снежников служат дополнительным источником его питания. Поверхностный сток из озера — переменный и возникает обычно при разрушении снежно-ледяной перемычки, расположенной в его северо-западной части. При прорыве плотины поток, как правило, образует ручей-водопад, направленный непосредственно в Нелла Фьорд. Согласно выполненным промерным работам, длина оз. Скандретт составляет 891 м при средней ширине около 180 м. Площадь акватории оценивается в 157,92 тыс. м², а объём воды достигает 1490,7 тыс. м³. Линейные размеры водоёма согласуются с данными, приведёнными в Атласе [15]. Обратная ситуация с результатами по батиметрии. В указанной публикации приводится значение максимальной глубины равное 8,2 м, однако, согласно нашим промерным работам, максимальная глубина составляет 17,6 м (см. рис. 2, г). На данном этапе авторы воздерживаются от объяснений столь значительных расхождений полученных значений.

Уровенный режим озёр

Графики хода уровня воды (рис. 3) наглядно демонстрируют, что для большинства водоёмов п-ова Брокнес характерно плавное изменение высоты водной поверхности. В качестве примера рассмотрим ход уровня на **озере Рейд** (см. рис. 3, а). В середине декабря 2017 г. уровень воды в нём упал на величину около 30 см (А.В. Тепляков, 2018 г., частное сообщение). После этого, как следует из графика, установился стабильный уровневый режим с тенденцией на увеличение. Наименьшие значения наблюдались с конца декабря до начала января, минимальное из них составило 86,4 см над нулём графика водомерного поста. Максимальная высота уровня воды над нулём графика зарегистрирована 21 января 2018 г., что связано с типом питания водоёма: устойчивые положительные температуры воздуха привели к интенсивному сокращению снежников, а талые воды пошли на пополнение водной массы оз. Рейд. Во второй половине января рост уровня сменился на незначительный спад с последующей стабилизацией. Амплитуда колебания за период наблюдений составила 11,5 см.

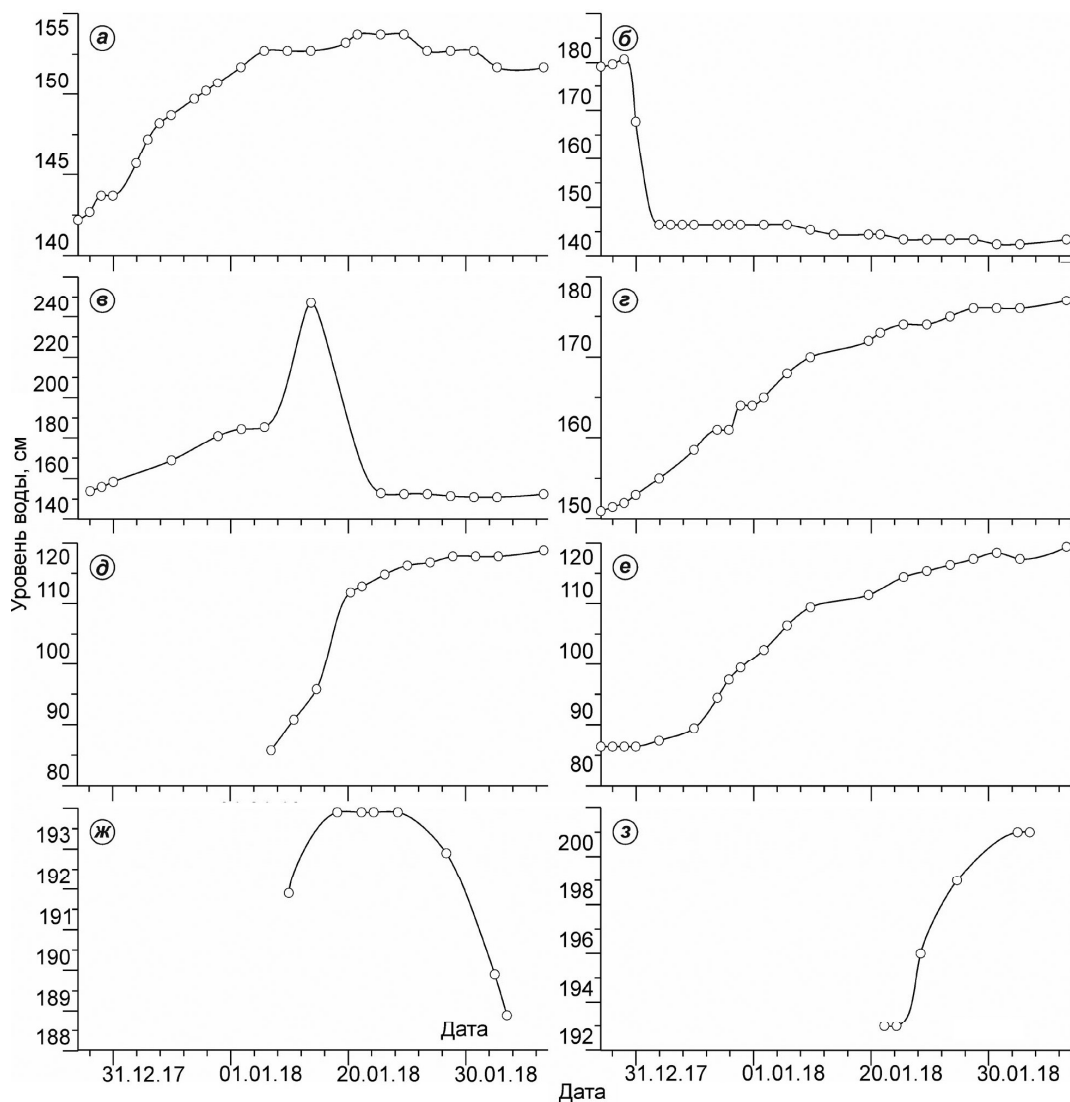


Рис. 3. Суточный ход уровня воды над нулём графика.

На секциях приведены графики для озёр: а – Рейд; б – Скандретт; в – Дискашин; г – LH73; д – Прогресс; е – Сибторп; ж – «Ледяное»; з – Болдер

Fig. 3. The daily water level above the zero of the graphs.

The graphs for lakes: а – Reid; б – Scandrett; в – Discussion; г – LH73; д – Progress; е – Sibthorpe; ж – «Ledyanoye»; з – Boulder are shown on the sections

Несмотря на незначительную удалённость исследуемых водных объектов друг от друга, каждый из них имеет свои особенности уровня режима. Так, для озёр Скандретт и Дискашин в сезон 63-й РАЭ это проявилось в резком уменьшении высоты водной поверхности (см. рис. 3 б, в). **Озеро Скандретт** относится к самому холодному из всех исследованных водоёмов. Оно питается талыми водами, поступающими непосредственно с ледника. На момент начала мониторинга регистрировалось повышение уровня водной поверхности воды, однако 31 декабря 2017 г. из-за разрушения снежно-ледяной перемычки произошёл резкой сброс озёрных вод. В результате в северо-западной части оз. Скандретт образовался ручей-водопад. Он представлял собой бурный поток с порогами и значительными уклонами. По данным барометрического нивелирования перепад высот составил 16,6 м.

В первые дни после прорыва скорость потока была столь значительна, что вода при прохождении через снежник сформировала в нём тоннель и перетекла в Нелла Фьорд. Затем уровень воды в оз. Скандретт плавно понижался в течение всего периода наблюдений, что обусловлено продолжающимся оттоком озёрных вод. Амплитуда изменения уровня воды за период наблюдений составила 38 см.

Прорыв **озера Дискашин** оказался более мощным. С момента начала наблюдений за уровнем и на протяжении последующих 20 суток происходило постепенное пополнение озёрной котловины талыми водами снежников. В результате увеличения объёма возрастало давление, оказываемое на снежно-ледяную перемычку. 22 января 2018 г. напряжение достигло критических значений, что привело к прорыву водоёма. Уровень понизился на 0,95 м. При этом при прохождении

паводка в снежнике был выработан тоннель, размеры которого увеличивались по мере удаления от точки входа в него. Вся вода, сформировавшая паводок, перетекла в Нелла Фьорд, после чего установился стабильный уровенный режим.

В полевых отчётах РАЭ за прошлые годы отмечается, что для системы озёр LH73—Прогресс—Сибторп также характерны резкие изменения уровня, связанные с разрушением ледяных перемычек и прорывами снежников [19]. Однако, к сожалению, в сезон 63-й РАЭ подобное явление наблюдалось уже после окончания полевых работ. Согласно данным, полученным при измерениях на водомерных постах (см. рис. 3, *г—е*) всех трёх озёр, наблюдается тренд на увеличение уровня воды. После прорыва в марте 2017 г. (А.В. Тепляков, частное сообщение) **озеро LH73** стало мелководным. Его максимальная глубина, по данным батиметрической съёмки, выполненной авторами 10 января 2018 г., составила 3,1 м. Ввиду незначительных глубин и интенсивного прогревания водной толщи этот водоём вскрылся ото льда практически первым. Таяние льда в совокупности с талыми водами снежников спровоцировало повышение уровня. За период наблюдений эта величина возросла на 26 см (см. рис. 3, *г*).

Обратная ситуация отмечена на **озере Прогресс**. К моменту начала наблюдений водоём был полностью покрыт однолетним льдом. Только к середине января 2018 г. в его южной части начали появляться первые закраины, а к 13 января в северо-восточной части образовалась узкая полоса открытой воды. За период антарктического лета 2017/18 г. озеро вскрылось лишь на 16%. Это не могло не сказаться на ходе уровня воды: с момента разрушения льда и вплоть до окончания мониторинга он стремительно поднимался. За 20 дней водная поверхность повысилась на 32 см (см. рис. 3, *д*), и, как можно предположить, эта тенденция сохранится вплоть до момента первого лёдообразования. Уровенный режим **озера Сибторп** также характеризуется плавным увеличением (см. рис. 3, *е*), возникающим из-за таяния снежников в пределах водосбора. Это может быть связано и с тем, что ручей «Каньонный», через который обычно происходит сток озёрных вод, ввиду сложившихся погодных условий не вскрылся ото льда.

Мониторинг уровенного режима на **озёрах «Ледяное»** и **Болдер** был затруднителен из-за организационных причин, поэтому полученные ряды

данных слишком короткие для их объективной интерпретации. На оз. «Ледяное» регистрировалось понижение уровня (см. рис. 3, *ж*), однако никакого поверхностного канала стока обнаружено не было. На оз. Болдер, наоборот, наблюдалось повышение уровня водной поверхности (см. рис. 3, *з*), вероятно, связанное с водами, поступающими с ледника.

Минерализация воды в озёрах

Пункты отбора проб на гидрохимический экспресс-анализ показаны на рис. 1, а результаты выполненных измерений приведены в таблице. Полученные данные показывают, что минерализация воды в исследованных водоёмах варьирует в широких пределах, поскольку она сильно зависит от ландшафтно-геоморфологических и геологических условий, а также типа питания. Вода в большинстве отобранных проб относится к категории пресных. Однако их значения сильно отличаются друг от друга, начиная с 27,1 мг/л (вода из оз. «Ледяное», имеющего преимущественно снеговое и ледниковое питание) и кончая 1218 мг/л (оз. Рейд). Небольшие значения минерализации характерны также для озёр LH73, Прогресс и Сибторп. Это указывает на преобладающий тип снежного и ледникового питания и малое влияние антропогенной составляющей на состав воды. Обратная ситуация наблюдается на озёрах, расположенных в непосредственной близости от капитальных строений. Так, минерализация воды озёр, расположенных вблизи российской и китайской антарктических станций, имеет повышенные значения — 612 и 530 мг/л соответственно, что связано с антропогенным воздействием. Вода с минерализацией более 1‰ относится к категории солоноватых. Из ряда исследуемых озёр в эту группу попадает лишь один водный объект — бессточное оз. Лоу (2167 мг/л). Также при гидрохимическом экспресс-анализе определялся водородный показатель. Согласно полученным данным, озёра восточной части п-ова Брокнес характеризуются нейтральной либо слабокислой реакцией pH.

Обсуждение

В ходе проведённых исследований впервые получены наиболее объективные данные о глубинах озёр п-ова Брокнес. Это действительно

Результаты гидрохимического экспресс-анализа

Номер	Название	Широта, градусы	Долгота, градусы	Дата	Минерализация, мг/л	Электропроводность, мкСм/см	pH
1	Трещина	–69,3978	76,41594	10.01.18	58,5	92,3	5,74
2	Прогресс	–69,4006	76,39236	21.01.18	113	178	5,89
3	LN73	–69,4001	76,37566	21.01.18	70,4	111	6,26
4	Лоу	–69,3894	76,3834	21.01.18	2167	2939	6,86
5	Скандретт	–69,3894	76,3721	21.01.18	129	201	6,07
6	Болдер	–69,4105	76,39716	22.01.18	42,3	66,7	6,20
7	Рейд	–69,3867	76,37891	23.01.18	1218	1704	6,64
8	Дискашн	–69,3894	76,35384	23.01.18	128	199	6,13
9	Сибторп	–69,3961	76,39275	23.01.18	96,8	152	5,77
10	Озеро 1*	–69,3913	76,3491	23.01.18	712	1028	6,67
11	Озеро 2*	–69,3968	76,35425	23.01.18	166	256	6,43
12	Озеро 3*	–69,3992	76,355	23.01.18	102	161	6,04
13	Озеро 4*	–69,402	76,35695	23.01.18	103	163	5,97
14	Степпед	–69,3766	76,38033	25.01.18	612	895	6,17
15	LN67	–69,3869	76,34654	31.01.18	456	669	6,51
16	«Ледяное»	–69,411	76,40467	01.02.18	27,1	43,2	6,06
17	Провал	–69,399	76,41379	01.02.18	77,4	121	5,88
18	LN69	–69,3731	76,36813	03.02.18	530	778	6,93

*Озёра, не имеющие названий.

так, поскольку до момента выполнения полевых работ представления о батиметрии водоёмов основывались на материалах из Атласа ANARE [15], которые базируются главным образом на единичных промерах и отдельных профилях. Выполненные исследования и полученные данные позволяют обновить материалы Атласа [15].

Исследования озёр п-ова Брокнес и холмов Ларсеманн в среднесрочной перспективе только начинаются, но уже сейчас можно сделать ряд выводов. Сравнение полученных результатов и материалов из Атласа показывает, что за последние 30 лет значительное углубилось оз. Сибторп. Согласно батиметрической съёмке авторов, его наибольшая измеренная глубина составила 3,8 м против 0,7 м по данным Атласа ANARE. Вероятно, дальнейшее развитие водоёма будет проходить в сторону увеличения отметок дна в его южной части и котловины озера в целом, что может отрицательно повлиять на снежно-ледяную перемычку, расположенную в непосредственной близости к трассе, соединяющей станцию Прогресс с аэродромом. Аналогичная ситуация наблюдается и на оз. Скандретт. При сопоставлении новых данных с результатами Атласа расхождение для максимального значения глубины для этого озера составило 9,4 м. Вместе с тем для оз. Рейд установлено, что резкие сбросы воды практически не влияют на деформацию его котловины. Согласно предыдущим наблюдениям, оз. Дискашн прорывается

ежегодно, что делает этот объект очень важным для изучения прорывных паводков, носящих более серьёзный и разрушительный характер.

Данные о ходе уровней воды показали различия в условиях формирования гидрологического режима водных объектов в зависимости от их морфологии и типа питания. Немногочисленность и разрозненность информации о водном режиме озёр антарктических оазисов делает полученные результаты важным шагом к пониманию особенностей гидрологического состояния этого района.

Заключение

В ходе комплексных гидрометрических исследований, выполненных в сезон 63-й РАЭ в восточной части п-ова Брокнес, были получены уточнённые данные по батиметрии основных потенциально прорывоопасных озёр. При их сравнении с ранее опубликованными результатами промеров установлена необходимость в дальнейшем дополнении и уточнении последних. Это крайне важно, так как прорывы ледниковых озёр, расположенных в непосредственной близости от инфраструктуры РАЭ, возникают ежегодно. Ввиду естественных причин, особенно сейчас, в эпоху глобального потепления, не обошедшего стороной и Южную полярную область, снежники, ледники и приуроченные к ним озёра, расположенные

в краевой части Антарктиды, развиваются особенно динамично. Последнее приводит к катастрофическим паводкам, а они порой — к значительным разрушениям [10, 11, 20]. Ежегодные резкие сбросы озёрных вод делают водоёмы п-ова Брокнес прекрасным полигоном изучения прорывных, катастрофических паводков более крупных масштабов. Это, при должной организации работ, может существенно улучшить понимание тенденций развития ледниковых озёр и позволит усовершенствовать методы предсказания их прорывов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность своим коллегам С.Д. Григорьевой, Г.А. Дешевых, А.А. Сухановой и начальнику станции Прогресс 63-й РАЭ А.В. Воеводину за помощь в проведении полевых исследований; начальнику станции Прогресс 62-й РАЭ А.В. Миракину за предоставление фото- и видеоматериалов и помощь в организации работ отряда; сотрудникам Института наук о Земле СПбГУ кафедры «Гидрология суши» за предоставленную гидроме-

трическую аппаратуру. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00421. Измерение минерализации озёрной воды осуществлено в рамках научного проекта РФФИ № 17-55-12003 ННIO.

Acknowledgments. The Authors want to thank gratefully their colleagues S.D. Grigorieva, G.A. Deshevykh, A.A. Sukhanova, and also thank the chief of the station Progress 63nd RAE A.V. Voevodin for assistance in realization of field research; to thank the chief of the station Progress 62nd RAE A.V. Mirakin for the provision of photo and video materials, as well as assistance in the organization of the detachment; to thank staff of the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University, Department of Hydrology for the provided hydrometric equipment. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project № 18-05-00421. The measurement of the mineralization of the lake water was carried out within the framework of the RFBR scientific project № 17-55-12003 NNIO.

Литература

References

1. *Виноградов Ю.Б.* Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 154 с.
2. *Richardson S.D., Reynolds J.M.* An overview of glacial hazards in the Himalayas // *Quaternary International*. 2000. № 65/66. P. 31–47.
3. *Yongjian D., Jingshi L.* Glacier lake outburst flood disasters in China // *Annals of Glaciology*. 1992. V. № 16. P. 180–184.
4. *Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Алейников А.А.* Новые селеопасные озёра у края ледника Башкара на Центральном Кавказе // *МГИ*. 2003. Т. 95. С. 153–160.
5. *Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В.* Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне г. Эльбрус 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // *МГИ*. 2007. № 102. С. 225–229.
6. *Петраков Д.А.* Селевая опасность ледниковых озёр и оценка вероятности их прорыва. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита // *Тр. Междунар. конф. Пятигорск, Россия, 22–29 сентября 2008 г. Пятигорск: изд. ин-та «Севкавгипроводхоз», 2008. С. 309–312.*
7. *Докукин М.Д., Хаткутов А.В.* Озёра у ледника Малый Азау на Эльбрусе: динамика и прорывы // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 4. С. 472–479.
1. *Vinogradov Yu.B.* *Glyatsial'nye proryvnye pavodki i selevyie potoki*. Glacial floods and mudslides. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 154 p. [In Russian].
2. *Richardson S.D., Reynolds J.M.* An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*. 2000, 65/66: 31–47.
3. *Yongjian D., Jingshi L.* Glacier lake outburst flood disasters in China. *Annals of Glaciology*. 1992, 16: 180–184.
4. *Chernomorets S.S., Tutubalina O.V., Aleynikov A.A.* New mudflow lakes at the edge of the Bashkara Glacier in the Central Caucasus. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2003, 95: 153–160. [In Russian].
5. *Chernomorec S.S., Petrakov D.A., Tutubalina O.V.* Breakthrough of the glacial lake on the northeastern slope of Elbrus on August 11, 2006: forecast, event and consequences. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2007, 102: 225–229. [In Russian].
6. *Petrakov D.A.* The mudflow risk of glacial lakes and an assessment of the probability of their breakthrough. *Selevyie potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita*. *Trudy Mezhdunarodnoy konf. Pyatigorsk, Rossiya, 22–29 sentyabrya 2008 g.* Mudflows: disaster, risk, prognosis, protection. *Proc. of the International Conf. Pyatigorsk, Russia, September 22–29, 2008*: 309–312. [In Russian].

8. Goodwin I.D. The nature and origin of a jökulhlaup near Casey Station, Antarctica // *Journ. of Glaciology*. 1988. V. 34 № 116. P. 95–101.
9. Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods // *Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences*. 2009. V. 465. № 2106. P. 1809–1828.
10. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica // *Ice and Snow*. 2017. V. 57. № 3. P. 427–432.
11. Попов С.В., Боронина А.С., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В. Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) в 2017–2018 гг. // *Геориск*. 2018. Т. XII. № 3. С. 56–67.
12. Björnsson H. Hydrological characteristics of the drainage system beneath a surging glacier // *Nature*. 1998. V. 395. P. 771–774.
13. Björnsson H. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland // *Glob. Planet. Change*. 2002. V. 35. P. 255–271.
14. Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins // *Journ. of Glaciology*. 1976. V. 17. № 76. P. 181–207.
15. Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica // *Australian National Antarctic Research Expeditions, Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sport, the Environment, Tourism, and Territories*. 1990. V. 74. 173 p.
16. Hodgson D.A., Verleyen E., Squier A.H., Sabbe K., Keely B.J., Saunders K.M., Vyverman W. Interglacial environments of coastal east Antarctica: comparison of MIS 1 (Holocene) and MIS 5e (Last Interglacial) lake-sediment records // *Quaternary Science Reviews*. 2006. № 25. P. 179–197.
17. Gasparon M., Matschullat J. Trace metals in Antarctic ecosystems: Results from the Larsemann Hills, East Antarctic // *Applied Geochemistry*. 2006. № 21. P. 1593–1612.
18. Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. Satellite image map. Edition 3. Map number 14241, Scale 1:25 000. Australian Antarctic Division, 2015.
19. Отчёт о работе станции Прогресс, 48-я Российская Антарктическая экспедиция. СПб.: Архив ФГБУ АНИИ, 2004. инв. № О-3553. 204 с.
20. Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Прорывы ледниковых и внутриледниковых водоёмов в районе российской станции Прогресс и полевой базы Молодёжная (Восточная Антарктида) // *Материалы III Междунар. науч.-практич. конф. «Природная среда Антарктики: экологические проблемы и охрана»: Учебный центр «Форум», Беларусь, 17–19 сентября 2018 г. Минск: ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам», 2018. С. 84–91.*
7. Dokukin M.D., Khatkutov A.V. Lakes at the Maly Azau Glacier on Elbrus: dynamics and breakthroughs. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (4): 472–479. [In Russian].
8. Goodwin I.D. The nature and origin of a jökulhlaup near Casey Station, Antarctica. *Journ. of Glaciology*. 1988, 34 (116): 95–101.
9. Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods. *Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences*. 2009, 465 (2106): 1809–1828.
10. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica. *Ice and Snow*. 2017, 57 (3): 427–432.
11. Popov S.V., Boronina A.S., Pryakhina G.V., Grigorieva S.D., Sukhanova A.A., Tyurin S.V. Breakthroughs of glacial and subglacial lakes at the Larsemann Hills (East Antarctica) in 2017–2018. *Georisk*. *Georisk*. 2018, XII (3): 56–67. [In Russian].
12. Björnsson H. Hydrological characteristics of the drainage system beneath a surging glacier. *Nature*. 1998, 395: 771–774.
13. Björnsson H. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Glob. Planet. Change*. 2002, 35: 255–271.
14. Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins. *Journ. of Glaciology*. 1976, 17 (76): 181–207.
15. Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. *Australian National Antarctic Research Expeditions, Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sport, the Environment, Tourism, and Territories*. 1990, 74: 173 p.
16. Hodgson D.A., Verleyen E., Squier A.H., Sabbe K., Keely B.J., Saunders K.M., Vyverman W. Interglacial environments of coastal east Antarctica: comparison of MIS 1 (Holocene) and MIS 5e (Last Interglacial) lake-sediment records. *Quaternary Science Reviews*. 2006, 25: 179–197.
17. Gasparon M., Matschullat J. Trace metals in Antarctic ecosystems: Results from the Larsemann Hills, East Antarctic. *Applied Geochemistry*. 2006, 21: 1593–1612.
18. Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. Satellite image map. Map number 14241, Scale 1:25 000. Australian Antarctic Division. 2015.
19. *Отчёт о работе станции Прогресс, 48-я Российская Антарктическая экспедиция*. Report on the fieldwork at Progress station, 48nd Russian Antarctic Expedition. St. Petersburg: Archive FGBU AARI. 2004. № О-3553: 204. [In Russian].
20. Boronina A.S., Popov S.V., Pryakhina G.V. Breakthroughs of glacial and interglacial lakes in the areas of Progress station and Molodezhnaya field base (East Antarctica). *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konf. «Prirodnaya sreda Antarkтики: ekologicheskie problemy i okhrana», uchebnyi tsentr «Forum», Belarus', 17–19 sentyabrya 2018 g.* Proc. of the III Intern. scientific and practical conf. «The natural environment of Antarctica: ecological problems and nature protection», training center «Forum», Belarus, September 17–19. 2018. Minsk: GNPO «NPC NAN Belarusi po bioresursam», 2018: 84–91. [In Russian].