

Обзоры и хроника

УДК 556.5+551.32

doi: 10.31857/S2076673422010122

Крупные прорывы озёр антарктических оазисов: обобщение современных знаний

© 2022 г. А.С. Боронина^{1,2*}

¹Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия;
²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
 *al.b.s@yandex.ru

Large-scale outbursts of lakes in the Antarctic oases: current knowledge

A.S. Boronina^{1,2*}

¹State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia; ²Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
 *al.b.s@yandex.ru

Received August 2, 2021 / Revised November 3, 2021 / Accepted December 23, 2021

Keywords: *Antarctic oases, hazardous hydrological processes, outbursts of lakes, hydrological research, East Antarctica.*

Summary

In recent decades, the importance of studying the outburst lakes of Antarctic oases has been increasing, which is associated with a number of applied and fundamental problems. First of all, because supraglacial, englacial, and glacier-dammed lakes are characterized by a quick response to the climate changes. In the applied aspect, active (unstable) lakes and seasonal streams are relevant for research since they often provoke catastrophic natural disasters. Monitoring and prevention of such events are primarily necessary in the areas of Antarctic stations, where many year-round and seasonal research programs are implemented. This article presents historical and the present-day data and descriptions of lake outbursts located in the oases of East Antarctica. The study is based on the generalization of both published and unpublished materials presented in the funds of the Arctic and Antarctic Research Institute (St. Petersburg), in scientific and technical reports of the Soviet Antarctic Expedition and Russian Antarctic Expedition, Information bulletins (newsletters) of the Soviet Antarctic expeditions, and foreign articles. In addition to that, the results of fieldwork carried out in 2017–2020 were used. Currently, the aforementioned materials are in different form and funds, so the proposed study is the first step of generalizing research on the potential outburst water bodies on the Antarctic Continent. Through to the ongoing work, albeit irregular, our understanding of functioning of the surface hydrological systems of Antarctic oases is steadily growing.

Citation: Boronina A.S. Large-scale outbursts of lakes in the Antarctic oases: current knowledge. *Led i Sneg*. 2022, 62 (1): 141–160. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422010122.

Поступила 2 августа 2021 г. / После доработки 3 ноября 2021 г. / Принята к печати 23 декабря 2021 г.

Ключевые слова: *антарктические оазисы, опасные гидрологические явления, прорывы озёр, гидрологические исследования, Восточная Антарктида.*

В последние десятилетия изучение прорывоопасных озёр антарктических оазисов становится всё более актуальным. Основной предпосылкой к их исследованию послужил тот факт, что нестабильные водоёмы провоцируют катастрофические явления, нанося ущерб станциям, полевым базам и выносным лагерям. Приводятся исторические и современные данные о наиболее известных прорывах озёр, расположенных в оазисах Восточной Антарктиды. Основу работы составляет обобщение изданных и неопубликованных данных с целью объединения имеющегося материала в рамках одной публикации для удобства дальнейших исследований и анализа.

Введение

Согласно современным представлениям, 95% площади Антарктического материка занимает ледниковый покров [1]. На оставшиеся 5% приходятся немногочисленные обнажения, представленные нунатаками, горными цепями, возвышающимися над ледником, а также оазисами — сравнительно пологими участками, сво-

бодными ото льда и занимающими территорию от нескольких десятков до нескольких тысяч квадратных километров (рис. 1). В этих районах в тёплый сезон величина абляции превышает величину аккумуляции снежных масс [2, 3]. Антарктические оазисы — уникальный ландшафт нашей планеты, получивший своё название прежде всего из-за обнаруженных там гидрологических объектов. Именно наличие незамёрзших водных масс

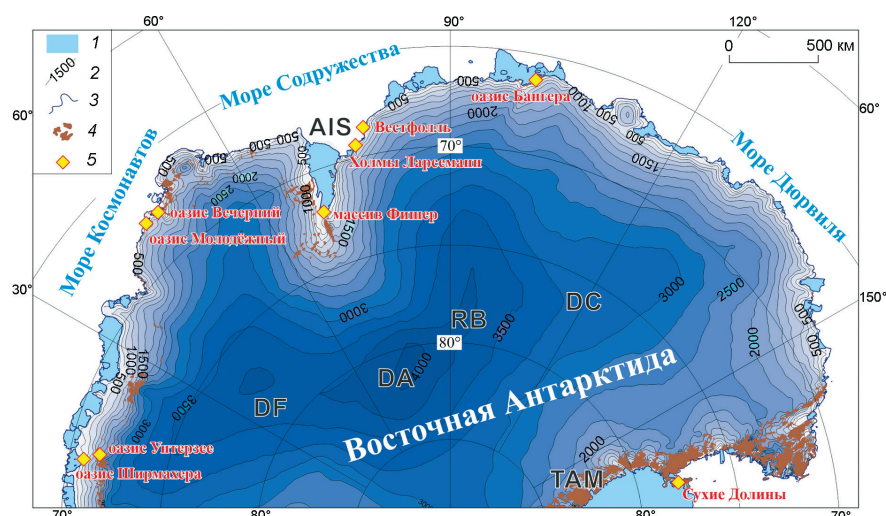


Рис. 1. Антарктические оазисы, упомянутые в тексте, на карте высот поверхности ледника, взятой в качестве основы [6]:

1 – шельфовые ледники, по [7]; 2 – изолинии высот дневной поверхности, по [6]; 3 – береговая линия и линия налегания, по [7]; 4 – выходы горных пород, по [7]; 5 – исследуемые оазисы, по [5]. Буквенные сокращения: AIS – шельфовый ледник Эймери; DA – Купол Аргус; DC – Купол Конкордия; DF – Купол Фуджи; RB – ледораздел Б; TAM – Трансантарктические горы

Fig. 1. Antarctic oases referred to in the text, superimposed over the ice-surface map of [6] as a basemap:

1 – ice shelves [7]; 2 – contours of ice surface elevation (interval 250 m) [6]; 3 – coastline and grounding line [7]; 4 – rock outcrop [7]; 5 – oases [5]. Abbreviations: AIS – Amery Ice Shelf; DA – Dome Argus; DC – Dome Concordia; DF – Dome Fuji; RB – Ridge B; TAM – Transantarctic Mountains

служит одним из индикаторов принадлежности какого-либо участка суши Антарктиды к оазису [4]. В Антарктиде насчитывается более 20 оазисов [5], и, несмотря на свои относительно небольшие размеры, они всегда привлекали внимание исследователей. Из-за относительной простоты логистического обеспечения и строительства основная часть зимовочных станций, полевых баз и лагерей располагается именно в этих районах, что служит мотивацией для детального изучения природных процессов, присущих этим территориям.

Главные особенности оазисов – развитая гидрографическая сеть, в которую входят водоёмы, а также постоянные и временные водотоки, имеющие нетипичный гидрологический режим. Его характерная черта – резкие сбросы излишков водных масс из надледниковых, внутриледниковых и подпрудных озёр, случающиеся, как правило, в тёплый сезон года. Особенности формирования прорывных паводков можно описать следующим образом: антарктическим летом в период активного снеготаяния стремительно увеличивается объём озера, что сопровождается подъёмом его уровня. Этот факт приводит или к переливу воды через края озёрной котловины и разливу водных масс по

поверхности ледника, или к прорыву озера через ледяную плотину, приповерхностный снежно-фирновый слой или толщу снежника.

Первые упоминания о прорывных паводках в антарктических оазисах встречаются в научно-технических отчётах и бюллетенях Советской антарктической экспедиции (САЭ), составленных по результатам изучения режима озёр восточной оконечности оазиса Ширмакера в 1961–1965 гг. [8]. Позднее исследователи начали приводить сведения о прорывах озёр и в районах других оазисов, однако эти данные носили разрозненный характер. Насколько известно автору настоящей статьи, обобщений исторических и современных прорывов озёр, а также их типизации по характерным особенностям нет. Ранее автором предпринималась попытка сделать обзор опасных гидрологических явлений оазисов, но из-за ограниченного объёма публикации повышенное внимание было уделено лишь районам земель Эндерби (оазисы Молодёжный и Вечерний) и Принцессы Елизаветы (Холмы Ларсманна) в Восточной Антарктиде [9]. Таким образом, настоящая работа – первый, более серьёзный шаг к обобщению прорывоопасных озёр,

расположенных в непосредственной близости от российских и зарубежных станций и полевых баз. В статье рассматривается территория Восточной Антарктиды, так как именно здесь находится большая часть российских зимовочных станций и крупных научных баз, а также ведётся наиболее значимая логистическая деятельность Российской антарктической экспедиции (РАЭ). Особое внимание уделено озёрам оазисов Холмы Ларсеманн, Ширмахера, Унтер-Зее, Молодёжный, Вечерний, Вестфолль, Бангера, а также массива Фишер и Сухих Долин (см. рис. 1).

Холмы Ларсеманн

Обобщение сведений о прорывах озёр оазисов начнём с района Холмов Ларсеманн (Larsemann Hills) ввиду значительного объёма накопленных фондовых материалов, а также результатов собственных полевых исследований. Оазис Ларсеманн расположен на Земле Принцессы Елизаветы (Princess Elizabeth Land), имеет площадь около 50 км² и представляет собой район в основном свободный ото льда и состоящий из множества мелких и двух наиболее крупных полуостровов — Сторнес (Stornes) и Брокнес (Broknes) (рис. 2, а). Обилие озёр на рассматриваемой территории объясняется наличием молодого структурно-эк-

зарационного рельефа и неразвитой дренажной сетью [10]. Часть из них образовалась в результате подпруживания тектонических долинных понижений ледниками и снежниками [11]. Из-за этого на озёрах периодически происходят резкие снижения уровня воды. В первую очередь опишем наиболее известные прорывы озёр п-ова Брокнес.

ЛН73 — Прогресс — Сибторп. Согласно техническому отчёту [12], озёра ЛН73, Прогресс и Сибторп составляют единую гидрологическую систему, и перетекание воды между ними иногда приводит к разрушению трассы, проходящей по снежникам. Первые сведения о прорыве оз. Прогресс в оз. Сибторп представлены в техническом отчёте 48-й РАЭ, когда 10 ноября 2003 г. из-за разрушения снежно-ледовой перемычки произошёл стремительный сброс воды. В результате в снежнике, расположенном между водоёмами, образовались провалы глубиной до 8 м и протяжённостью до 100 м [12]. Исследователи предположили, что прорывной паводок из оз. Прогресс был вызван сбросом в него воды из озера ЛН73. В южной части этого озера в течение всего года существует снежно-ледяная плотина. При переполнении водоёма напряжение, оказываемое на перемычку, возрастает, что вызывает её размыв и частичное разрушение. В результате залпового сброса поток устремляется к оз. Прогресс, уровень воды в котором резко повышается. Это увеличивает давление

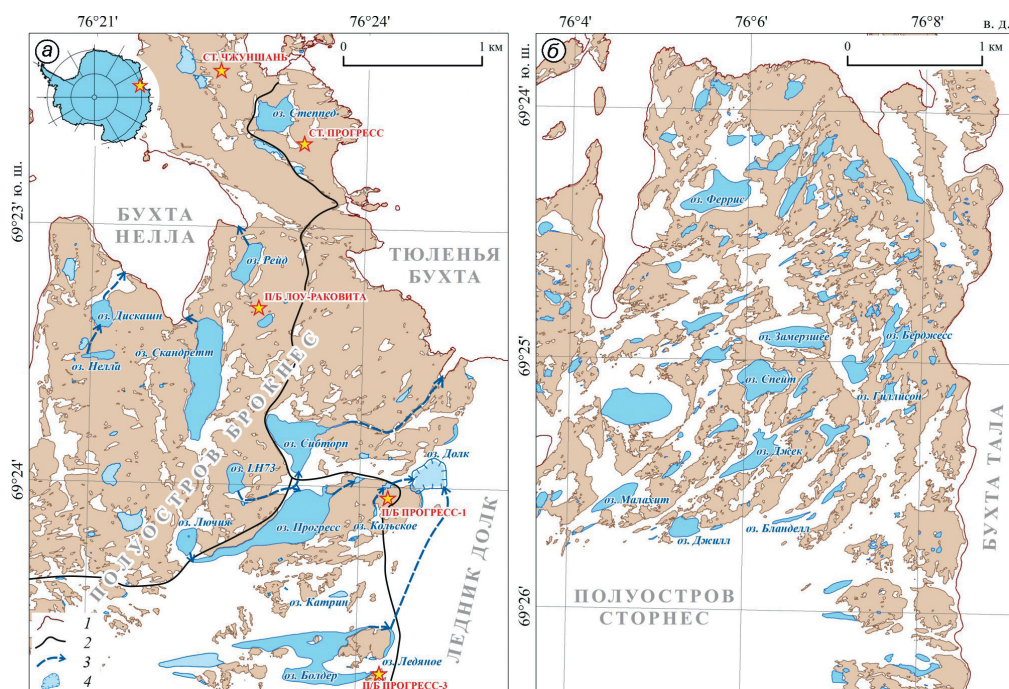


Рис. 2. Полуострова оазиса Холмы Ларсеманн: Брокнес (а) и Сторнес (б) [7]:

1 — береговая линия; 2 — трассы движения транспортной техники; 3 — каналы стока; 4 — провал в леднике Долк

Fig. 2. Peninsulas of the Larsemann Hills: Broknes (a) and Stornes (b) [7]: 1 — coastline; 2 — logistic routes; 3 — channels; 4 — depression in Dalk Glacier

на стенки снежника, приводит к его обводнению, таянию и последующему разрушению.

Оз. Прогресс чаще всего прорывается именно не при переливе воды через гребень, а в результате прорыва полостей в снежно-ледовой плотине. После этого вода из оз. Прогресс перетекает в оз. Сибторп, откуда в дальнейшем разгружается в залив Приюдс. На рис. 2, а схематически показано направление описанного стока воды. Вероятно, весной 2003 г. были разрушены сразу обе плотины (между озёрами ЛН73 и Прогресс, а также между озёрами Прогресс и Сибторп), что и стало причиной формирования провалов в снежнике между ними [12]. Ситуация усугубляется тем фактом, что именно по этому снежнику проходит трасса, соединяющая станции Прогресс и Чжуншань с аэродромом.

Подобная ситуация не была однократной и возникала в последующие годы. Так, в летний полевой сезон 59-й РАЭ (2013/14 г.) 1 января 2014 г. уровень воды в оз. Прогресс резко упал также из-за обводнения снежно-ледяной перемычки и её последующего обрушения. Сброс продолжался около полутора суток, а уровень воды понизился на 0,72 м [13]. В сезон 62-й РАЭ стремительный сток воды из оз. Прогресс в оз. Сибторп произошёл 4 января 2017 г. [13]. Согласно оперативной сводке об основных экспедиционных событиях и операциях РАЭ за период с 22 февраля по 1 марта 2018 г., в конце февраля 2018 г. был ещё один резкий сброс вод оз. Прогресс через толщу снежника. Образовавшийся ручей достигал ширины 4 м и глубины до 1,5 м. Очередной, но более мощный прорыв всей системы озёр случился 14 января 2019 г. Формирование потока со стороны оз. Прогресс началось в приповерхностной части снежника в результате постепенной фильтрации озёрной воды. Уже на следующий день ручей выработал русло, достигшее скального основания. Им вновь была затронута часть трассы в районе полевой базы Прогресс-1.

На рис. 3, а показано русло, выработанное в снежнике, а также видны обвалы верхней части, служивавшей кровлей. По данным батиметрической съёмки за 20 января 2019 г., длина оз. Прогресс составила 870 м при максимальной ширине 360 м, площадь водного зеркала — около 115 тыс. м², а максимальная измеренная глубина — 42 м [14]. Оз. Сибторп при этом достигало глубины 8,3 м. В результате прорыва уровень в оз. Прогресс упал на 0,47 м, а амплитуда коле-

бания уровня на оз. Сибторп была равна 0,22 м. Расход, измеренный на спаде паводка, на ручье между озёрами, составил 2,34 м³/с, а на ручье из оз. Сибторп — 2,64 м³/с [14]. При этом из оз. ЛН73 наблюдался лишь временный водоток, который проходил под снежником, образуя конус выноса в месте впадения в приёмный водоём.

В сезон 65-й РАЭ (2019/20 г.) прорыв оз. Прогресс произошёл 6 января 2020 г. [15]. Мониторинговые геофизические работы в пределах снежно-ледовой плотины между озёрами Прогресс и Сибторп позволили установить её интенсивную обводнённость ещё за две недели до прохождения паводка. Прорывной канал стока начал формироваться в приповерхностном слое снежника (но разлива воды по поверхности не произошло) в районе положения прошлогоднего канала. Разрушение перемычки происходило стремительно и сопровождалось откалыванием больших снежно-ледовых пластов и выносом их в оз. Сибторп. В течение нескольких часов после начала паводка русло потока достигло скального основания. Уровень воды в оз. Прогресс понизился на 0,36 м. Ширина русла вытекающего ручья составила 35,9 м при средней глубине около 0,14 м. Расход воды на пике паводка оценён в 1,23 м³/с, а на спаде составил 0,48 м³/с. После прекращения прорыва и вплоть до окончания сезона таяния оз. Прогресс оставалось сточным с расходом воды 0,08 м³/с.

В то же время уровень воды в оз. Сибторп вырос на 0,21 м. После этого последовал сброс лишней воды в океан. Ширина русла ручья из оз. Сибторп в начале прорыва составила около 12,2 м при средней глубине 0,28 м. Расход воды на пике паводка оценён в 2,38 м³/с, а через сутки — на спаде составил 0,11 м³/с. В последующем озеро также было сточным со средним расходом воды 0,04 м³/с [16]. Кроме того, в полевой сезон 65-й РАЭ, благодаря одновременным наблюдениям за уровнями воды в озёрах Прогресс и Лючия, было установлено сходство их уровенных режимов. В день прорыва оз. Прогресс, 6 января 2020 г., уровень воды в оз. Лючия также понизился на 0,25 м. При помощи георадарного профилирования было установлено, что вода из него перетекала в оз. Прогресс через внутриледниковую полость [16]. Этот факт кардинально изменил ситуацию в оценке прорывных паводков из оз. Прогресс и указал на необходимость учёта объёма оз. Лючия при составлении прогнозов.



Рис. 3. Результаты прорывов озёр на п-ове Брокнес:

а – канал стока и обвалы в снежнике между озёрами Прогресс и Сибторп (фото А.А. Четверовой, 15 января 2019 г.); *б* – канал между озёрами Болдер и Ледяное и внутриледниковый сток к озеру Долк (фото С.Д. Григорьевой, 11 января 2020 г.); *в* – тоннель в снежнике между озёрами Нелла и Дискашн (фото А.А. Четверовой, 18 февраля 2019 г.); *г* – тоннель в снежнике из озера Дискашн (фото С.С. Пряхина, февраль 2017 г.)

Fig. 3. The consequences of lake outbursts on the Broknes peninsula:

a – a channel and depressions in the snowfield between Progress and Sibthorpe lakes (photo by A.A. Chetverova, January 15, 2019); *б* – a channel between Boulder and Ledyanoe lakes, and also englacial runoff to Lake Dalk (photo by S.D. Grigorieva, January 11, 2020); *в* – a tunnel in the snowfield between lakes Nella and Discussion (photo by A.A. Chetverova, February 18, 2019); *г* – a tunnel in a snowfield from Lake Discussion (photo by S.S. Pryakhin, February 2017)

Болдер – Ледяное – Долк. Ещё одна гидрологическая система п-ова Брокнес – озёра Болдер, Ледяное и внутриледниковый водоём в леднике Долк (см. рис. 2, *а*). Внутриледниковое озеро, названное оз. Долк, существовало до 30 января 2017 г. – дня, когда на его месте образовалась обширная депрессия [17, 18]. Причина её формирования – последовательный прорыв скопления талой воды на льду озёр Болдер и Ледяное, который спровоцировал переполнение и последующее опорожнение оз. Долк (см. рис. 2, *а*). Первая просадка ледника произошла 30 января 2017 г. Однако из-за того, что сток в полость не прекратился, 31 января провал увеличился до значительных размеров. Согласно полевым данным, объём оз. Долк до прорыва составлял около 708,7 тыс. м³ при средней глубине около 32 м. Характеристики паводка 2017 г. и описание дренажных каналов даны в работе [18] и в таблице настоящей статьи.

Повторный прорыв системы озёр произошёл в январе 2020 г. Аналогично 2017 г., первым переполнился водоём в районе оз. Болдер. Однако

8 января 2020 г. вода начала дренировать не только из надледникового озера, но и из самого оз. Болдер. Вода сбрасывалась в виде двух ручьёв, выработавших русло на поверхности ледника. Падение уровня воды составило 1,96 м и продолжалось вплоть до 22 февраля 2020 г. (позже наблюдения были прекращены). Согласно данным наблюдений, максимальный расход потока – 0,4 м³/с [16]. В течение двух дней вода поступала в оз. Ледяное и скапливалась на его льду. 10 января 2020 г. произошёл перелив воды из оз. Ледяное через гребень ледовой плотны. На леднике образовалось открытое русло, ширина которого в среднем составляла 1,3 м, а глубина достигала 0,35 м. Перемещаясь, водоток преобразовался в обширную приповерхностную гидросеть, направленную в сторону депрессии (см. рис. 3, *б*). В результате уровень воды оз. Ледяное понизился на 2,45 м с 10 января по 1 февраля 2020 г. Максимальный расход паводка – 0,35 м³/с [16]. Депрессия наполнилась до краёв за 14 дней. Оз. Долк начало разливаться по поверхности ледника в северо-восточной части в сторону

Основные прорывоопасные озёра оазиса Холмы Ларсеманн и характеристики их прорывов

Озеро (ю.ш, в.д)	Характеристики прорывов			
	дата	падение уровня воды, м	расход воды, м ³ /с	размеры каналов стока
Прогресс (69°24'11", 76°23'17")	10 ноября 2003 г.	—	—	Глубина до 8 м, протяжённость до 100 м
	1 января 2014 г.	0,72	—	—
	4 января 2017 г.	—	—	—
	Конец февраля 2018 г.	—	—	Глубина до 1,5 м, ширина до 4 м
	14 января 2019 г.	0,5	2,34 (на спаде паводка)	Глубина около 2,9 м
	6 января 2020 г.	0,36	1,23	Средняя глубина 0,14, ширина около 35 м
ЛН73 (69°23'56", 76°22'37")	Март 2017 г.	1,6*	0,71*	Протяжённость около 480 м
Сибторп (69°23'49", 76°23'17")	14 января 2019 г.	0,22	2,64	—
	6 января 2020 г.	0,21	2,38	Средняя глубина 0,28 м, ширина около 12 м
Лючия (69°24'14", 76°22'5")	6 января 2020 г.	0,25	—	Сток по внутриледниковому каналу
Болдер (69°24'40", 76°23'35")	30 января 2017 г.	Около 2,5	0,92*	Диаметр около 1,2 м, протяжённость 180 м
	8 января 2020 г.	1,96	0,40	Сток проходил по двум водотокам
Ледяное (69°24'36", 76°24'22")	30 января 2017 г.	Около 3	1,05*	Протяжённость 1240 м
	10 января 2020 г.	2,45	0,35	Глубина до 0,35 м, ширина 1,3 м, протяжённость около 1200 м
Долк (69°23'56", 76°24'47")	31 января 2017	Более 30	141*	Прорыв по внутриледниковому каналу, протяжённость около 1134 м
	24 января 2020 г.	—	—	Прорыв в виде перелива
ЛН59 (69°23'31", 76°21'7")	19 декабря 2020 г.	0,54	—	—
Дискашн (69°23'20", 76°21'7")	22 января 2018 г.	0,95	1,8*	Глубина на выходе из озера 0,5 м, из тоннеля — до 3 м, ширина до 5 м, протяжённость 130 м
	19 декабря 2020 г.	0,3	0,21	Ширина от 1,5 до 2 м, протяжённость 130 м
Скандретт (69°23'35", 76°22'16")	31 декабря 2017 г.	0,3	0,55	Протяжённость около 130 м, перепад высот более 16 м
Кольское (69°24'7", 76°24'11")	25 января 2020 г.	1,23	—	—

*Значения, полученные по результатам моделирования. Прочерки — отсутствие информации.

залива Прюдс, а в западной части — в сторону полевой базы Прогресс-1. Поток воды, направленный к океану, изначально перемещался в узком русле, а затем разветвлялся и расширялся. На расстоянии около 400 м от оз. Долк ручей, вероятно, дренировал в ледниковые трещины. В первые дни февраля 2020 г. каналы из озёр Болдер и Ледяное заполнились снегом, а вода в них замёрзла. Озёра Ледяное и Долк покрылись льдом. Так завершился активный этап паводка для всех трёх озёр. Полное описание эволюции системы озёр Болдер, Ледяное и Долк с 2017 по 2020 г. вместе с моделированием характеристик паводков дано в обобщающей работе [18].

Нелла (ЛН59) — Дискашн. В центральной части п-ова Брокнес, у западного берега Нелла Фьорд, находится ещё одна система относительно небольших озёр Нелла (ЛН59) и Дискашн, представляющая собой каскад (см. рис. 2, а). При анализе космических снимков [19, 20], а также во время полевых работ были обнаружены следы

их частых прорывов. Так, в сезон 63-й РАЭ (2017/18 г.) автором наблюдался прорыв оз. Дискашн в бухту Нелла с формированием тоннеля в снежной перемычке. Прорыв начался на контакте между снежником и коренными породами 22 января 2018 г. Уровень водной поверхности понизился на 0,95 м. На стенках тоннеля отчётливо прослеживались метки высоких вод, оставленные при протекании потоков различной мощности. Максимальный расход прорыва 2018 г. оценён в 1,8 м³/с. Общее время прохождения прорывного паводка заняло около 10 часов.

В 2019 г. (64-я РАЭ) прорыв оз. Дискашн произошёл до прибытия гидролого-геофизической группы в район станции Прогресс. Тогда же были обнаружены признаки прорыва оз. Нелла в оз. Дискашн — в снежнике образовался тоннель высотой более 1 м и шириной 5 м в начале и высотой более 2 м и шириной более 3 м на выходе. При этом сброс воды из оз. Дискашн шёл по прежнему тоннелю, который в течение зимы был

заполнен снегом, что и вызвало подпор водных масс. В сезон 65-й РАЭ (2019/20 г.) прорыв системы озёр произошёл в середине декабря 2019 г. В результате разрушения снежника на оз. Нелла в ночь с 18 на 19 декабря вода поступила в ущелье по направлению к оз. Дискашн. К утру 19 декабря уровень в нём достиг максимальной отметки, а в пустоты снежника начала фильтроваться вода, провоцируя его размыв. Через 4,5 часа поток воды стекал уже по выраженному руслу шириной от 1,5 до 2 м, стенки и дно были обледенелые. Измеренный расход воды составил $0,21 \text{ м}^3/\text{с}$. Ровно через сутки дно русла достигло скального основания, а измеренный расход воды составил $0,007 \text{ м}^3/\text{с}$. Общее падение уровня воды за время прорыва на оз. Нелла составило 0,54 м, а на оз. Дискашн — около 0,3 м, что меньше, чем в предыдущие два года. Тем не менее, тоннель по форме и положению повторял прошлогодние [21]. На рис. 3, в в качестве иллюстрации показан тоннель между озёрами Нелла и Дискашн, а на рис. 3, г — открытая часть тоннеля из оз. Дискашн.

Скандретт, Рейд, Кольское. Разрушение запрудных снежных плотин на озёрах Скандретт и Рейд также происходит практически ежегодно, однако это не наносит заметного ущерба, поскольку поток сразу попадает в Нелла Фьорд [22] (см. рис. 2, а). В полевом отчёте отряда инженерных изысканий за сезон 65-й РАЭ (20--19/20 г.) приводятся сведения о ещё одном прорывном водоёме, не имеющем официального наименования и расположенном на скальной возвышенности над полевой базой Прогресс-1 (см. рис. 2, а). Авторы работы [16] дали ему название оз. Кольское, которого будем придерживаться и мы. Важность изучения этого водоёма обусловлена тем, что путь стока озёрных вод пересекается с трассой движения транспортной техники на аэродром, поступая далее в оз. Долк. Начало существенного понижения уровня воды зарегистрировано 25 января 2020 г., однако тогда поверхностный сток отсутствовал. Исследователи предположили, что, вероятно, в трещинах и пустотах скально-грунтового борта озёрной котловины находился лёд, который к концу тёплого периода растаял, вызвав сток воды по образовавшимся фильтрационным каналам. Величина падения уровня воды оз. Кольское оценена в 1,23 м. Несмотря на его малые размеры, ширина после прорыва не превышала 15 м, а глубина достигала около 30 м [16]. В случае развития и уплотнения снежника возмо-

жен подпор озера, что приведёт к формированию существенного прорывного паводка.

При выполнении рекогносцировочных работ в сезон 64-й РАЭ (февраль 2019 г.) на п-ове Сторнес было оценено состояние 29 озёр полуострова и на 12 из них обнаружены следы прорывов, произошедших в тёплый сезон 2019 г. По внешним признакам были установлены частичный и полный спуски озёрных вод. К основным прорывоопасным водоёмам п-ова Сторнес можно отнести мелкие водоёмы севернее озёр Феррис, Замёрзшее, Джек, Джилл, Малахит, а также систему озёр Берджесс, Гиллисон и водоём без наименования юго-восточнее оз. Берджесс (см. рис. 2, б). Кроме того, в данном районе экспедиционными сотрудниками 64-й РАЭ были описаны снежные болота, водоснежные потоки и сезонные надледниковые озёра. На поверхности ледника отмечались крупные площадные обводнённые участки и протяжённые потоки, состоящие из смеси воды, снега и фирна. Они не формировали чётких русел и, как правило, перемещались под уклоном в виде слоя. Указанные гидрологические объекты также потенциально прорывоопасны [21].

Обобщая изложенное, можно сделать вывод, что озёра оазиса Холмы Ларсеманн отличаются как частыми прорывами, так и специфичными типами водоёмов, аналогичными внутриледниковым озёрам Долк и Лючия. Большинство нестабильных озёр подпружены многолетними снежниками и прорываются через их толщу или на контакте снега и горных пород, или в приповерхностном, менее уплотнённом слое в результате фильтрации воды, провоцирующей таяние. В случае ледяных плотин прорыв, как правило, происходит в виде перелива через гребень. Периодичность прорывов индивидуальна для каждого озера. Такие водоёмы, как Нелла, Дискашн, Прогресс, Сибторп, Скандретт, прорываются практически каждый год. Озёра Болдер, Ледяное и Долк менее подвержены метеорологическим условиям и сбрасывают воды реже. Для большинства озёр нет возможности оценить периодичность прорыва ввиду малого объёма статистических данных о сбросах озёрных вод в прошлом. Несмотря на то, что за время многолетних наблюдений обнаружены озёра, склонные к прорывным паводкам (см. таблицу), полностью исключить влияние хозяйственной деятельности на участках, примыкающих к ним, нельзя. Тем не менее, мониторинг и возможность прогнозирова-

ния сброса водных масс позволит своевременно отреагировать на это событие и скорректировать планы транспортных операций, минимизировав негативные последствия.

Оазис Ширмахера

Оазис Ширмахера (Schirmacher Oasis) находится в прибрежной части Восточной Антарктиды, на Земле Королевы Мод, и представляет собой участок площадью около 35 км², свободный ото льда и отделённый от моря Лазарева шельфовым ледником Нивлисен шириной около 80 км (рис. 4, а). На территории оазиса насчитывается до 180 пресноводных озёр, сплошной цепью протягивающихся с запада на восток [23–26]. Большинство озёр оазиса имеет ледниковое происхождение. По типу образования озёрных котловин они относятся к эрозионным, поскольку в их формировании преобладала эрозионная деятельность ледника. В отношении водного баланса доминируют водоёмы с перемежающимся стоком или бессточные. Озёра первого типа прорывоопасны, поскольку они дают сток в период высоких вод, т.е. при интенсивном таянии снега и льда. Объём таких водоёмов меняется не только от года к году, что обусловлено различными метеорологическими условиями, но и в течение одного года или даже сезона. Указать точное число «активных» озёр оазиса Ширмахера невозможно. Во-первых, это объясняется тем, что на контакте с ледником и на его поверхности из года в год водные объекты могут то появляться, то исчезать; во-вторых, прорывные паводки случаются и в незаселённых частях оазиса, оставаясь незамеченными. Поэтому далее приводятся только общие сведения о наиболее известных прорывах.

В связи с возможным возникновением опасных ситуаций наблюдение за уровнем режимом озёр этого района началось ещё в 1961 г., во время строительства станции Новолазаревская (тогда изучали режим озёр, расположенных у восточной оконечности оазиса Ширмахера в период с 1961 по 1965 г.). 7 января 1961 г. на оз. Южное произошло быстрое повышение уровня воды, что было вызвано поступлением талых вод из переполненных озёрных котловин, расположенных вдоль ледникового склона (см. рис. 4, б). За семь дней уровень воды поднялся более чем на 3,5 м,

а 13 января 1961 г. водоём прорвался через толщу снежника. Озёрная вода хлынула в район строительства станции Новолазаревская. Для спасения её от затопления был прорыт обводной канал, который отвёл паводковые воды в водоём у станции. Расход потока был не менее 7 м³/с [8].

Озёра, расположенные в окружении станции Новолазаревской, образуя единую гидрологическую систему, также имеют тенденцию прорываться друг в друга. Озёра Верхнее, Смирнова, Поморника, Южное и Станционное сбрасывают излишки водных масс в оз. Глубокое практически ежегодно. Первые прорывы были замечены в начале ноября 1962 г., когда вода из озёр Верхнее и Смирнова перелилась через край и перетекла на ледяной покров оз. Поморника, образовав на нём 20–30-сантиметровый слой воды. В дальнейшем вода стекала в расположенное ниже оз. Глубокое. Летом 1962 г. зарегистрировано, что уровень воды в оз. Глубокое вырос более чем на 3 м. В момент его наибольшего поднятия вода вырабатывает под снежником канал, и её излишки со скоростью 4 м/с сбрасываются в эпিশельфовое оз. Привальное [11, 23]. Иногда вода настолько стремительно заполняет котловину оз. Глубокое, что она, не успев разрушить снежник, начинает переливаться через его края, направляясь через каскад других водоёмов к северу [11]. В настоящее время из-за отступления кромки материкового ледника произошло сокращение поступающей талой воды в оз. Верхнее и оно перестало быть прорывоопасным, перейдя в тип бессточных. Отметим, что воду для питьевых и технических нужд на станции Новолазаревская берут именно из оз. Верхнее. Схематически пути сброса озёрных вод у станции Новолазаревская показаны на рис. 4, б. На рис. 4, в приведён снежник, через который в настоящее время прорывается оз. Южное. Сток воды обычно начинается на контакте горных пород и основания снежника без обрушения его кровли.

Ещё одна особенность озёрных котловин оазиса – наличие прибрежных террас [11]. Особенно отчётливо они заметны на берегах оз. Красное, расположенного в 1,5 км к западу от станции Новолазаревская (см. рис. 4, б). В 1970-х годах его глубина была небольшой (около 1 м), но на высоте 2 и 5 м от уровня озера отчётливо прослеживались метки высоких вод, которые лишний раз доказывают периодические прорывы водо-

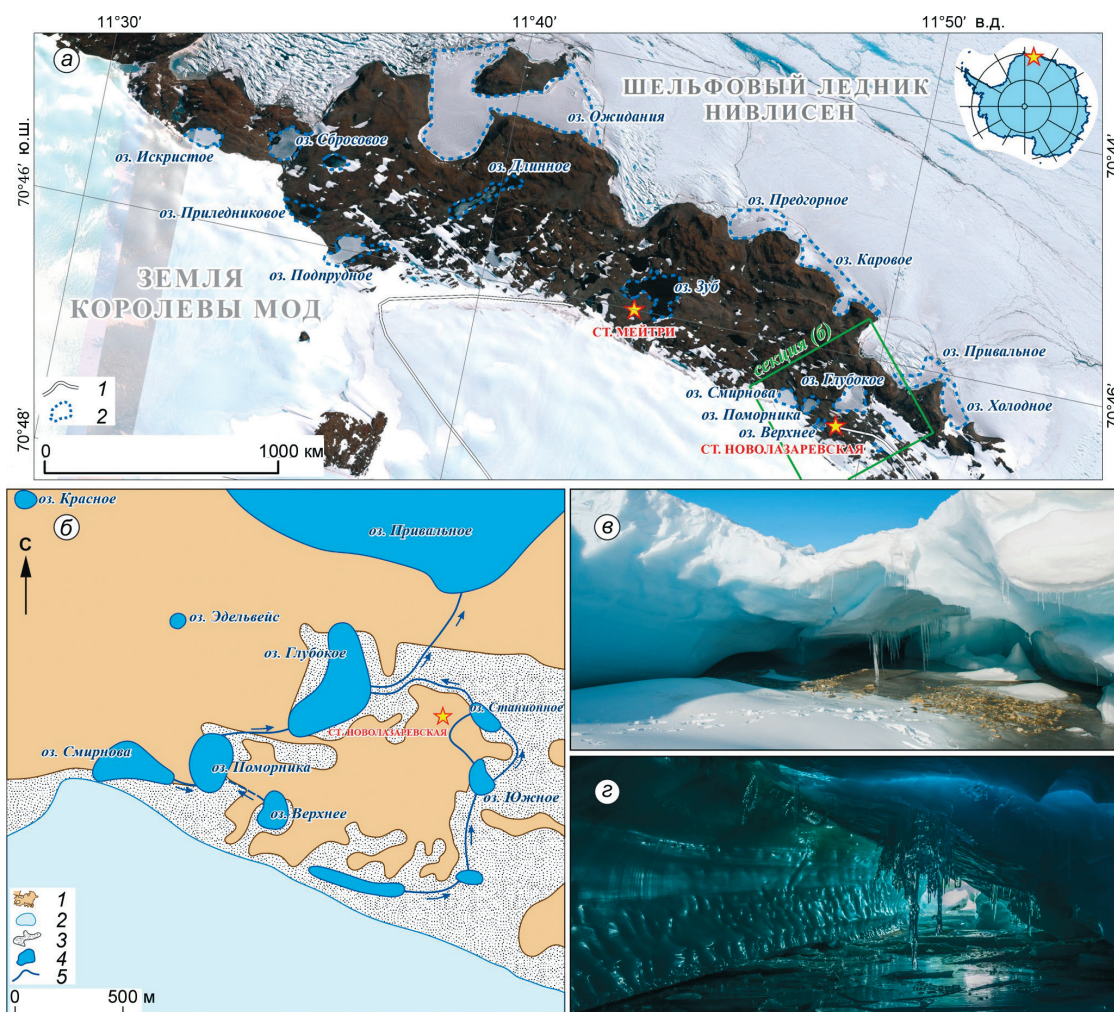


Рис. 4. Район оазиса Ширмахера:

a – аэрофотоснимок оазиса Ширмахера; *б* – схема размещения озёр в районе станции Новолазаревская [11]; *в* – тоннель в снежнике рядом с озером Южное; *г* – тоннель в снежнике между озёрами Подпрудное и Длинное (фотографии Романа Головчина, 2019 г.). На секции *a*: 1 – трассы движения транспортной техники; 2 – примерная береговая линия. На секции *б*: 1 – коренные породы; 2 – ледник; 3 – снежники; 4 – озёра; 5 – временные водотоки

Fig. 4. Schirmacher Oasis:

a – aerial view of the Schirmacher Oasis; *б* – map of the location of lakes near Novolazarevskaya Station [11]; *в* – a tunnel in a snowfield near Lake Yuzhnoye; *г* – a tunnel in a snowfield between Podprudnoye and Dlinnoye lakes (photos by Roman Golovchin, 2019). On section *a*: 1 – logistic routes; 2 – approximate shoreline of lakes. On section *б*: 1 – rock outcrops; 2 – glacier; 3 – snowfield; 4 – lakes; 5 – temporary streams

ёма. К сожалению, более поздние данные о состоянии озера не опубликованы. Нельзя не обратить внимания и на «говорящие» названия, которые даны участниками более ранних экспедиций некоторым водоёмам: озёра Сбросовое, Приледниковое, Подпрудное. На рис. 4, *г* показан тоннель в снежнике между озёрами Подпрудное и Длинное, промытый прорывными потоками воды. Что касается современных наблюдений, то в декабре 2005 г. произошёл ещё один официально задокументированный каскадный

прорыв озёр оазиса Ширмахера. Однако сотрудники зимовочных и сезонных составов станции говорят, что резкие падения уровня воды случаются намного чаще, однако специализированных исследований не ведётся. Учитывая, что станция Новолазаревская – важный логистический центр не только РАЭ, но и всей системы DROMLAN (Dronning Maud Land Air Network) с развитой инфраструктурой и интенсивно эксплуатируемым аэродромом, наблюдения за подобными опасными гидрологическими процес-

сами необходимы, главным образом, с позиций обеспечения безопасности.

Оазис Унтерзее

В 90 км к юго-западу от оазиса Ширмахера, в восточной части массива Вольтат, расположено оз. Унтерзее (Untersee). Его первое рекогносцировочное обследование проводили участники САЭ в начале 1969 г. [27]. Позднее на этом водоёме работало много российских и немецких исследователей [28–30]. Оз. Унтерзее имеет длину около 6,5 км и ширину 2,5 км. Его площадь — 11,4 км², а максимальная глубина — 169 м. Толщина льда не превышает 6 м и, по некоторым оценкам, сохраняется на его поверхности более 100 тыс. лет [28]. Водоём расположен в каровой котловине. Её склоны с запада, юга и востока сочленяются с валунно-щебенчатыми образованиями, представляющими собой древнюю морену напора. На южном берегу расположен ледник Анучина, талая вода которого служит основным источником питания водоёма. Озеро бессточное. По результатам исследований установлено, что крупнообломочные грунты выступают в качестве запрудной плотины для водоёма. Их ежегодное смещение происходит со скоростью от 1,1 до 3,9 м. Моренные отложения на склонах образуют пять хорошо выраженных террасовых уровней: на высоте 30–40 м, 50–60 м, около 100–150 м, 300–350 м и 400–450 м над ур. озера [27]. Вероятно, эти террасы маркируют различные уровни воды оз. Унтерзее, однако подтвердить это предположение пока нельзя и о возможной нестабильности приходится судить только по косвенным геоморфологическим признакам. В настоящее время оз. Унтерзее активно исследуется в рамках Международной программы изучения экологических характеристик специалистами из США, Канады и России [31]. Данных о прорывах водоёма не приводится, поэтому можно сделать вывод, что сейчас вероятность опасных явлений на озере крайне низкая.

Оазисы Молодёжный и Вечерний

В западной части Земли Эндерби (Enderby Land) имеются многочисленные небольшие фрагменты суши, свободные от ледникового покрова. На одном из таких участков в февра-

ле 1962 г. была открыта станция Молодёжная, позже — Антарктический метеорологический центр (АМЦ), а сейчас находится полевая база. Самые крупные и глубокие водоёмы оазиса Молодёжный — озёра Глубокое и Лагерное (рис. 5, а, б), которые по их генезису и преобладающему типу питания относятся к категории прорывоопасных. К одному из первых задокументированных прорывных паводков в этом районе относится резкое падение уровня воды на оз. Лагерное. Отметим, что именно из этого водоёма берут воду для питьевых и технических нужд полевой базы. Критическое значения уровня воды в озере было достигнуто в декабре 1963 г., в результате чего вода начала переливаться через подпруживающую её наледь. Возникший небольшой ручей стремительно увеличивался в размерах и через несколько часов поток был способен прорезать толщу льда, образуя в ней узкое ущелье. К моменту опустошения глубина водоёма составляла 10 м, однако уже через три дня понизилась до 3 м [32]. Руководство станции решило создать сливной канал между озёрами Лагерное и Глубокое для обеспечения бесперебойного оттока излишней воды и предотвращения наполнения водоёма до критического уровня. Работы были выполнены, но сейчас канал от сезонного снега не расчищают и прорывы продолжаются.

Позже остатки подобных тоннелей в снежно-ледовых перемычках были выявлены и на водосборной территории оз. Глубокое. Его прорывы регистрировали в феврале 1962 г. и в июле 1966 г., однако были они не столь масштабными [33]. Тем не менее, через семь лет после своего открытия станция Молодёжная понесла значительный ущерб из-за более мощного прорыва вод оз. Глубокое. Катастрофическое переполнение водоёма произошло 18 января 1969 г., что вызвало значительные изменения в ландшафте оазиса. В связи со случившимся в том же году были организованы гидрологические наблюдения, основные задачи которых — изучение водного, ледового и термического режима водоёмов, а также составление прогноза последующих прорывов [33].

За многолетний период, начиная с 1969 г. по настоящее время, прорывы оз. Глубокое происходят с интервалом 7–10 лет. При этом уровень озера в среднем понижается на 6 м за 2–3 суток [34]. По информации сотрудников зимовочного и сезонного составов станции Моло-



Рис. 5. Район полевой базы Молодёжная:

a – на топографической карте в масштабе 1:50 000 [35]; *б* – в Атласе океанов в масштабе 1:10 000 [36]; *в* – на ортофото-снимке в январе 2017 г. (Д.В. Фёдоров); *г* – результат прорыва озёр Глубокое и Разливное; *д* – ручей на леднике из оз. Стоковое. На секции *в*: 1 – каналы; 2 – примерная береговая линия озёр

Fig. 5. The area of the Molodezhnaya field base:

a – on a topographic map at a scale of 1: 50,000 [35]; *б* – in the Atlas of Oceans at a scale of 1: 10,000 [36], and *в* – on a drone image by D.V. Fedorov, January 2017; *г* – the result of the outburst of lakes Glubokoe and Razlivnoe; *д* – a stream on the glacier from Lake Stokovoe. On section *в*: 1 – channels; 2 – approximate shoreline of lakes

дёрная, последующие прорывы происходили в 1988, 1997, 2006 и 2018 гг. Анализируя картографические материалы, можно также заметить, что на ранних схемах в непосредственной близости от оз. Глубокое водоём отсутствует. На других, более поздних картах (см. рис. 5, *a–в*), рядом с ним появляется либо зона затопления, либо обособленное оз. Разливное. На некоторых схемах эти озёра представлены в виде единого водоёма [35, 36].

Последний вариант можно расценивать в качестве маркера к скорому прорыву озёрных вод.

Подтверждение выдвинутого предположения не заставило себя долго ждать. В конце января 2018 г. произошёл прорыв водных масс предположительно уже из системы озёр Разливное – Глубокое. Согласно оперативной сводке об основных экспедиционных событиях и операциях РАЭ, опорожнение водоёмов началось утром

Массив Фишер

19 января и продолжалось вплоть до 23 января. Мощным потоком, ширина которого составляла около 10 м, было снесено несколько железных опор эстакады (см. рис. 5, з). В результате прорыва оз. Разливное вновь полностью опустошилось. В декабре 2018 г. котловина бывшего водоёма была заполнена сезонным снегом. Падение уровня воды на оз. Глубокое оценено в 9,5 м [21].

Ещё одна прорывоопасная система у полевой базы Молодёжная — оз. Стоковое и несколько небольших водоёмов, расположенных ниже по склону (рис. 5, в). Последовательное разрушение снежных перемычек происходит, как правило, в период антарктического лета, в результате чего на пути от озёр до бухты образуется ручей «Авиационный» (А.В. Долгих, частное сообщение). Водоток начинает формироваться в приповерхностном снежно-фирновом слое и постепенно прорезает себе чёткое русло, на время прекращая работу взлётно-посадочной полосы полевой базы (см. рис. 5, д).

Описывая прорывы озёр Земли Эндерби, нельзя не упомянуть об оазисе Гора Вечерняя. Возобновление интереса к этому району связано со строительством Белорусской антарктической экспедицией одноимённой зимовочной станции. В некоторой близости от новых строений находятся два небольших водоёма: озёра Верхнее и Нижнее [37]. Согласно информации от сотрудников Белорусской антарктической экспедиции, первое из них — неглубокое (до 2 м) и часто опорожняется (Ю.Г. Гигиняк, частное сообщение). Глубина второго — около 5–6 м, а его потенциальные прорывы могут значительно повлиять на инфраструктуру новой полевой базы, учитывая то обстоятельство, что именно из этого водоёма берут воду для хозяйственно-питьевого обеспечения станции Гора Вечерняя.

Подводя итог, отметим, что большинство озёр оазисов Молодёжный и Вечерний гидравлически связаны и образуют динамичную систему. Прорывы водоёмов происходят, как правило, через снежники или наледи с образованием тоннелей, похожих на глубокие ущелья, или поверхностных временных неглубоких водотоков, перемещающихся в ледяном русле. Чаше всего сброс воды начинается через приповерхностный снежно-фирновый слой, затем энергия текущей воды постепенно вырабатывает русло вплоть до каменного основания. Прорывы озёрных вод случаются в основном во второй половине января.

Резкие опустошения крупных озёр случаются и в достаточно удалённых от побережья горных районах Антарктиды. Показательный пример — исчезновение крупного озера в районе массива Фишер (горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида). Массив Фишер — одно из крупнейших обнажений, расположенных в центральной части гор Принс-Чарльз. Его площадь около 300 км². В январе–феврале 1991 г. (36-я САЭ) отечественными исследователями было обнаружено сухое ложе крупного озера, расположенного на границе горного массива Фишер и выводного ледника Ламберта. С одной стороны ложе имело каменные, а с другой — ледяные берега. Его размеры были значительны: не менее 15 км в длину и 150–500 м в ширину [38]. Согласно топографической карте 1974 г. [39], абсолютные высотные отметки уровня поверхности озера составляли 88–95 м. Наличие водоёма также было зафиксировано на аэрофотоснимках 1972 г. В работе [38] указывается, что в период полевых работ в феврале 1986 г. и декабре 1988 г. озеро ещё существовало. В январе 1991 г. ложе водоёма оказалось полностью опустошённым. Глубина депрессии составила 25–35 м. Прежний уровень водной поверхности был зафиксирован на коренном склоне массива в виде узкой кромки припайного льда. На момент 1991 г. дно бывшего водоёма частично было заполнено цепью небольших озерков глубиной от 0,5 до 1,5 м. Борта депрессии и дно перекрыты крупными (2–8 м в поперечнике) глыбами льда, вероятно, остатками обрушившегося озёрного ледяного покрова.

Прорыв этого озера представляется следующим образом. Первоначальный сброс воды и обрушение льда по всей видимости произошли летом 1989/90 г. Причиной прорыва могли служить подвижки ледника и образовавшиеся в его теле трещины и полости. Позднее, осенью и зимой, каналы были закупорены снегом. Интенсивное таяние в период антарктического лета в совокупности с водотоками со склонов массива и ледника привело к образованию нового озера с уровнем водной поверхности на 8 м ниже, чем было раньше. Давление воды или новые подвижки ледника прорвали заторы, и водоём снова спустился [38].

Оазис Вестфолль

Холмы Вестфолль (Vestfold Hills) расположены на восточной стороне залива Прюдс и занимают площадь около 400 км² [40]. На рассматриваемой территории имеется около ста озёр, глубина одного из них — оз. Крокед (Crooked Lake) — достигает 140 м [41, 42]. Некоторые из водоёмов подпружены ледниками и сезонными снежниками и имеют тенденцию к сбросу воды. К. Бронж, описывая сток в руч. Тирни (Tierney Creek) из приледникового оз. Челнок (Chelnok Lake), зарегистрированный антарктическим летом 1987—1988 гг., показал, как прорывы связаны с изменением метеорологических условий [41, 43]. Он установил, что прорывные паводки, формирующиеся в первую половину сезона таяния (начало лета), больше зависят от величины солнечного излучения, а прорывы второй половины тёплого сезона — от температуры воздуха. Однако Дж. Колбек описал случай, не соответствующий этому предположению [44]. Он наблюдал резкое увеличение расходов воды в реке Эллис-Рэпидс (Ellis Rapids) с 15 по 20 января 1976 г., предположительно связанное с переливом через край оз. Крокед, расположенного выше по течению. В целом, естественные плотины, перекрывающие озёра оазиса Вестфолль, формируются в результате преобразования сезонного снега в фирн и лёд в результате насыщения талой водой с последующим уплотнением или замерзанием в теле плотины в холодный период. Так, в районе оз. Крокед существует система из пяти озёр, не имеющих названия, которая периодически перекрывается тремя подобными ледяными дамбами, накапливая в общей сложности более $1,5 \times 10^6$ м³ воды. Режим разрушения этих плотин и скорость сброса озёр не были известны до января 1993 г., когда две из имеющихся перемычек обрушились, что привело к наводнению с максимальным расходом воды около 8 м³/с по направлению к оз. Крокед [45]. В среднем дамбы характеризовались шириной от 30 до 100 м, длиной 100—200 м и глубиной от 5 до 20 м, а понижение уровней воды в водоёмах достигало 5 м. Кроме того, исследователи обнаружили большие дельты при впадении в оз. Крокед, которые были сформированы мощными наводнениями, значительно сильнее наблюдавшегося в 1993 г. Тогда водный поток принёс некоторое количество мелкозернистых

осадков, но в целом смыва горных пород со дна и берегов не было. Следовательно, с большой долей вероятности, в прошлом возникали гораздо более крупные прорывные потоки, которые могли формировать подобные дельты.

Оазис Бангера

Оазис Бангера (Bunger Hills) расположен в западной части Земли Уилкса (Wilkes Land) Восточной Антарктиды. Свободная ото льда территория со всех сторон окружена ледниками. С севера оазис отделён от непосредственного контакта с океаном шельфовым ледником Шеклтона, на западе, юго-западе и юге его территорию обрамляют выводные ледники Апфела и Эдисто, а юго-восточные и восточные части ограничивает склон Антарктического ледникового щита. Площадь оазиса Бангера — около 450 км². На его территории находятся глубокие эпিশельфовые водоёмы, в разной степени гидравлически связанные с океаном. Самый крупный по размерам и наиболее глубокий водоём — оз. Фигурное. Оно расположено в тектонической трещине с крутыми обрывистыми берегами. Максимальная глубина водоёма достигает 137 м, а длина составляет около 25 км. Оз. Фигурное — проточное, сбрасывающее талые воды восточной окраины водосбора на северо-западе в залив Транскрипции. Режим водоёма, помимо таяния льда и снега на склоне материкового ледника, определяется также периодическими сбросами воды из оз. Далёкое. По наблюдениям 1987—1990 гг., прорывные сбросы вод в оз. Фигурное происходят через год. В 1987 г. талые ледниковые воды, скопившиеся в оз. Далёкое, промыли каньон в снежно-ледяной подпруживающей плотине и хлынули через узкую долину в оз. Фигурное. При этом уровень в оз. Далёкое в течение суток понизился на 5 м [46]. К сожалению, ввиду отсутствия специальных наблюдений собрано мало сведений об опасных гидрологических явлениях этого оазиса.

Сухие Долины

Сухие Долины Мак-Мёрдо — самый большой свободный ото льда регион на антарктическом континенте, который занимает территорию около 4800 км². Долины свободны ото льда

главным образом потому, что Трансантарктические горы блокируют поток льда из центральных районов. Кроме того, на этой территории выпадает очень мало осадков (менее 10 см/год в виде снега), а низкое альbedo поверхности в сочетании с относительно тёплыми сухими ветрами приводит к чрезвычайно засушливым условиям. Несмотря на такие условия, в Сухих Долинах находится много озёр. Четыре больших водоёма расположены в двух долинах Тейлор (Taylor) и Райт (Wright): три водоёма — Фрикселл (Fryxell), Хоар (Hoare) и Бонни (Bonney) в первой из них и озеро Ванда (Vanda) — во второй [47].

Относительно режима озёр Сухих Долин известно, что уровни воды в замкнутых водосборных бассейнах значительно менялись в течение позднего четвертичного периода вследствие климатических изменений, влияющих на режим испарения, и ледниковых колебаний, приводящих к изменению их доли на водосборах [48]. В работе [49] рассматривается чувствительность озёр Сухих Долин к изменениям местного климата на примере оз. Бонни. Уровень этого водоёма стабильно поднимался на 12 м с 1903 по 1970 г. Исследователи пришли к выводу, что для объяснения такого повышения требуется среднее увеличение стока примерно на 4% в год. Установлено, что уровненный режим оз. Бонни более чувствителен к тёплым периодам, чем уровненный режим на озёрах Хоар и Фрикселл в результате большей суммарной площади ледников на водосборе. В свою очередь уровень оз. Фрикселл более чувствителен к потерям при охлаждении и испарении. Уровень воды в нём с 1992 по 2001 г. снижался со скоростью 76 мм/год, в то время как уровни воды озёр Бонни и Хоара — со скоростью 51 и 45 мм/год соответственно (неопубликованные данные). Этот период уменьшения уровней был прерван аномально тёплым антарктическим летом 2001/02 г., когда образовалось значительное количество талой воды и были восстановлены потери воды за предыдущие 14 лет. В работе [50] этот сезон был назван как «год паводка».

В статье [51] авторы описали климатическую историю Сухих Долин Мак-Мёрдо за последние два тысячелетия, основываясь на данных по стабильным изотопам для вод озёр юга Земли Виктории. Они, в частности, выдвинули предположение, что примерно 1200 лет назад оз. Хоар было или опустошено, или ещё не существовало.

Они пришли к такому выводу, анализируя отношение ^{36}Cl в водной толще этого водоёма, которое показывало, что его поверхностные и придонные водные массы относительно «молодые» в отличие от близлежащих озёр Бонни и Фрикселл [52]. Другие независимые данные — измерение ^{14}C [53] — также указывали на возраст воды в водоёме от 1000 до 2500 лет. Однако природа исчезновения водоёма не установлена. Согласно [51], это могло быть как полное испарение воды, так и её дренирование.

Кроме того, в районе Сухих Долин обнаружены аналоги внутриледниковых озёр. Подповерхностные водоёмы были найдены при строительстве аэродрома, расположенного на леднике в западной части шельфового ледника Мак-Мёрдо. Они залегали под участками так называемого «голубого льда» и не прослеживались при обычном визуальном осмотре, характеризовались глубиной от 1,0 до 1,5 м и охватывали округлые участки диаметром от 10 до 15 м. Начиная с середины декабря, толщина льда над озёрами уменьшалась с 30 или 40 см до 7 см, что создавало серьёзную опасность для полётов воздушных судов [54]. При продвижении на запад, в сторону Земли Виктории, поверхностные талые воды становились всё более распространёнными в виде открытых водоёмов и поверхностного стока талых вод. В настоящее время вопрос о существовании других крупных обособленных озёр непосредственно внутри толщи ледников остаётся открытым из-за сложности их обнаружения.

Заключение

Прорывные паводки на озёрах, связанных с оледенением, продолжают оставаться одними из основных опасных гидрологических явлений. Представленный обзор показывает, что подобные события случаются во многих оазисах Восточной Антарктиды. С большой долей вероятности опустошения озёр происходят намного чаще, чем нам известно, но из-за особенностей континента исследователи их часто не замечают.

В плане опасных гидрологических и гляциологических процессов наиболее изучена территория Холмов Ларсеманн. Это объясняется регулярными научными и инженерными исследованиями, посвящёнными обеспечению без-

опасности транспортных операций Российской антарктической экспедиции, начиная с 2016 г. (62-я РАЭ) вплоть до настоящего времени [15, 55–57]. По результатам работ установлено, что большинство озёр вблизи объектов инфраструктуры антарктической экспедиции перегорожены снежниками и ледником и относятся к категории прорывоопасных [9, 56]. Чаше паводки на озёрах оазиса формируются в результате обводнения и разрушения снежных плотин. Прорывы через ледяные перемычки происходят реже, как правило, в результате перелива через гребень. Периодичность сброса озёрных вод определяется главным образом метеорологическими условиями и варьирует от одного года до нескольких лет. Теоретически прорывы должны происходить в наиболее тёплые годы после накопления значительных объёмов воды в озёрных котловинах. Однако для отдельных озёр это предположение не подтверждается. Так, предпосылки к прорывам озёр Болдер, Ледяное и Долк создаются не за один год, а в течение нескольких тёплых лет [18]. Для множества водоёмов установить периодичность сброса воды невозможно из-за отсутствия статистических сведений об их режиме в прошлом. Тем не менее, накопленных данных уже достаточно для выяснения закономерностей формирования каналов стока в теле снежно-ледовых плотин, а также оценки критического уровня детально изученных озёр. Невозможность исключения логистических операций на участках, подверженных воздействию прорывных паводков, ставит перед исследователями острую необходимость разработки методик своевременного прогнозирования прорывных явлений в этом районе.

Относительно хорошо изучены опасные гидрологические явления оазисов Ширмахера и Молодёжный. Большинство озёр оазиса Ширмахера имеет ледниковое происхождение и относится к прорывоопасным. Их объёмы существенно изменяются не только от года к году, что обусловлено различными метеорологическими условиями, но и в течение одного года или даже сезона. Первые прорывные паводки настигли исследователей ещё во времена строительства станции Новолазаревская [8]. Изучение уровня режима «активных» озёр началось ещё в 1960-х годах. Заметим, что в оазисе Ширмахера, наряду с прорывами озёр через толщу снежно-ледовой плотины, часто случаются сбросы воды в виде перелива. Это объясняется

тем, что талые воды настолько стремительно поступают в озёрные котловины, что снежно-ледовые перемычки не успевают разрушиться.

В настоящее время прорывы продолжаются, но установить их периодичность для большинства озёр, особенно удалённых от станции Новолазаревская, очень сложно из-за малого числа публикуемых сведений. Тем не менее, случающиеся прорывные паводки вынуждают их учитывать при планировании экспедиционных операций. Сейчас станция Новолазаревская – важный логистический центр не только РАЭ, но и всей системы DROMLAN, а также крупная научная база, где выполняется множество круглогодичных и сезонных исследовательских программ. Эта территория имеет развитую инфраструктуру и интенсивно эксплуатируемый аэродром, на котором принимаются самолёты, совершающие трансконтинентальные перелёты. Важный аспект своевременного выполнения всех задач за короткий период антарктического лета – обеспечение безопасности транспортных операций, что вызывает необходимость наблюдений за опасными гидрологическими и гляциологическими явлениями: прорывами озёр, просадками ледника, формированием зон трещин и временных водотоков и т.п.

Станция Молодёжная, расположенная в одноименном оазисе, была крупным научным центром с начала 1960-х до начала 1990-х годов, и изучение прорывов озёр здесь имело важное прикладное значение. Это объясняет большой объём накопленного материала о прорывных паводках. За указанный временной интервал исследователям удалось установить периодичность прорывов крупнейших озёр оазиса и выявить основные механизмы образования прорывных каналов стока. Так, было показано, что самый крупный водоём – оз. Глубокое – сбрасывает избыточный объём с периодом раз в 7–10 лет, а прорывной паводок формируется в результате перелива воды через поверхность навесного снежника с последующим образованием прорана глубиной не менее 7 м. Продолжительность прохождения прорывного паводка обычно не превышала 2,5–3 суток [34]. При этом на мелководных озёрах сброс избыточного объёма может длиться всего несколько часов. В настоящее время, несмотря на климатические изменения, прорывы озёр Глубокого и Разливного не становятся чаще. Отметим также, что именно в оазисе Молодёж-

ный на одном из озёр в районе станции было создано гидротехническое сооружение, призванное обеспечивать бесперебойный отток водных масс из озера, предотвращая их накопление [32].

В других антарктических оазисах опасные гидрологические явления изучены слабее, что объясняется отсутствием специальных изысканий. Для этих районов сведения о прорывах были получены, как правило, случайно — в ходе реализации других научных задач. Как и в других районах, прорывы здесь происходили или из-за размыва и разрушения снежно-ледовой плотины под влиянием фильтрующейся озёрной воды, или в результате перелива воды через гребень с последующей выработкой поверхностного канала стока.

Несмотря на прогресс в понимании эволюции динамичных ледниковых озёр, остаётся ряд серьёзных проблем, которые необходимо преодолеть, чтобы расширить знания о формировании и протекании прорывных паводков. Как показывает опыт автора и его коллег, изучение прорывов озёр не только в Антарктиде, но и в других областях оледенения невозможно проводить только классическими гидрологическими методами. Существенную помощь оказывают дистанционные методы, в частности геофизические, которые дают возможность выявить изменения в теле подпруживающих снежников и ледников [15], а также математическое моделирование, позволяющее оценить основные параметры паводков и предположить время их возникновения [58–62]. Кроме того, крайне важно проследить климатическую изменчивость в районах оазисов и установить механизмы воздействия климата на озёрные

системы. Именно такая организация работ и привлечение дополнительных методов исследования, помимо сбора и обработки полевых данных, позволит в дальнейшем усовершенствовать методы прогнозов прорывов водоёмов.

Благодарности. Автор выражает благодарность своим коллегам С.Д. Григорьевой, Г.А. Дешевых, Э.Р. Киньябаевой, М.Р. Кузнецовой, С.В. Попову, Е.В. Рыжовой, А.А. Сухановой и А.А. Четверовой за помощь в проведении полевых исследований и предоставление результатов полевых работ. Также автор признателен Г.В. Пряхиной и двум анонимным рецензентам за помощь в улучшении текста статьи. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 20-05-00343 «Выявление особенностей протекания процесса прорыва озёр оазисов Антарктиды на основе данных полевых исследований и математического моделирования».

Acknowledgments. The author is grateful to colleagues S.D. Grigorieva, G.A. Deshevykh, E.R. Kinyabaeva, M.R. Kuznetsova, S.V. Popov, E.V. Ryzhova, A.A. Sukhanova, A.A. Chetverova for their assistance in the field investigations and for the results of field research. The author is also grateful to G.V. Pryakhina and two anonymous reviewers for their help in improving the text of the article. This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the project № 20-05-00343 «Identification of the main features of outbursts at the lakes of Antarctic oases based on the fieldwork data and mathematical modeling».

Литература

References

1. Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., Bingham R.G., Blankenship D.D., Casassa G., Catania G., Callens D., Conway H., Cook A.J., Corr H.F.J., Damaske D., Damm V., Ferraccioli F., Forsberg R., Fujita S., Gim Y., Gogineni P., Griggs J.A., Hindmarsh R.C.A., Holmlund P., Holt J.W., Jacobel R.W., Jenkins A., Jokat W., Jordan T., King E.C., Kohler J., Krabill W., Riger-Kusk M., Langley K.A., Leitchenkov G., Leuschen C., Luyendyk B.P., Matsuoka K., Mouginot J., Nitsche F.O., Nogi Y., Nost O.A., Popov S.V., Rignot E., Rippin D.M., Rivera A., Roberts J., Ross N., Siegert M.J., Smith A.M., Steinhage D., Studinger M., Sun B., Tinto B.K., Welch B.C., Wilson D., Young D.A., Xiangbin C., Zirizzotti A. Bedmap 2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 375–393. doi: 10.5194/tc-7-375-2013.
1. Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., Bingham R.G., Blankenship D.D., Casassa G., Catania G., Callens D., Conway H., Cook A.J., Corr H.F.J., Damaske D., Damm V., Ferraccioli F., Forsberg R., Fujita S., Gim Y., Gogineni P., Griggs J.A., Hindmarsh R.C.A., Holmlund P., Holt J.W., Jacobel R.W., Jenkins A., Jokat W., Jordan T., King E.C., Kohler J., Krabill W., Riger-Kusk M., Langley K.A., Leitchenkov G., Leuschen C., Luyendyk B.P., Matsuoka K., Mouginot J., Nitsche F.O., Nogi Y., Nost O.A., Popov S.V., Rignot E., Rippin D.M., Rivera A., Roberts J., Ross N., Siegert M.J., Smith A.M., Steinhage D., Studinger M., Sun B., Tinto B.K., Welch B.C., Wilson D., Young D.A., Xiangbin C., Zirizzotti A. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness data sets for Antarctica. *Cryosphere*. 2013, 7: 375–393. doi: 10.5194/tc-7-375-2013.
2. Van Wessem J.M., Reijmer C.H., Morlighem M., Mouginot J., Rignot E., Medley B., Joughin I., Wouters B., Depoorter

2. Van Wessem J.M., Reijmer C.H., Morlighem M., Mougnot J., Rignot E., Medley B., Joughin I., Wouters B., Depoorter M.A., Bamber J.L., Lenaerts J.T.M., Van De Berg W.J., Van Den Broeke M.R., Van Meijgaard E. Improved representation of East Antarctic surface mass balance in a regional atmospheric climate model // *Journ. of Glaciology*. 2014. V. 60. № 222. P. 761–770.
3. Van Wessem J.M., Jan Van De Berg W., Noël B.P. et al. Modelling the climate and surface mass balance of polar ice sheets using *racmo2*: Part 2: Antarctica (1979–2016) // *Cryosphere*. 2018. V. 12. № 4. P. 1479–1498.
4. Сократова И.Н. Гидрологические исследования в антарктических оазисах // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 3. С. 91–103.
5. Сократова И.Н. Антарктические оазисы. СПб.: ААНИИ, 2010. 274 с.
6. Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica // *Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 665–674. doi.org/10.5194/tc-13-665-2019.
7. Antarctic Digital Database (ADD), Version 7.0, January 2016. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge.
8. Аверьянов В. Наводнение на станции Новолазаревской // *Информ. бюл. САЭ*. 1965. № 52. С. 53–74.
9. Боронина А.С., Четверова А.А., Попов С.В., Прякина Г.В. Обзор потенциально прорывоопасных озёр и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида) // II Всерос. науч.-практич. конф. «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», 5–7 июня 2019 г. Иркутск, 2019. С. 307–318.
10. Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. ANARE Research Notes. Antarctic Division Australia, 1990. № 74. 173 p.
11. Симонов И.М. Оазисы Восточной Антарктиды. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 176 с.
12. Отчёт о работе станции Прогресс, 48 Российская Антарктическая экспедиция. СПб. Архив ФГБУ ААНИИ. 2004. инв. № О-3553. 204 с.
13. Дворников Ю.А., Евдокимов А.А. Научно-технический отчёт по программе гидроэкологических исследований на станции Прогресс в сезонный период 62-й РАЭ. СПб.: Фонды ААНИИ, 2017. 50 с.
14. Прякина Г.В., Четверова А.А., Григорьева С.Д., Боронина А.С., Попов С.В. Прорыв озера Прогресс (Восточная Антарктида): подходы к оценке характеристик прорывного паводка // *Лёд и Снег*. 2020. Т. 60. № 4. С. 613–622. doi.org/10.31857/S2076673420040065.
15. Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р., Кузнецова М.Р., Попов С.В., Кашкевич М.П. Строение снежно-ледовых перемычек прорывных озёр полуострова Брокнес (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) по данным георадиолокации // *Лёд и Снег*. 2021. Т. 61. № 2. С. 291–300. doi.org/10.31857/S2076673421020089.
16. Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р., Кузнецова М.Р. Полевой отчёт о работах отряда инженерных изысканий в сезон 65-й РАЭ. СПб.: Фонды ААНИИ, 2020. 170 с.
17. 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.
- M.A., Bamber J.L., Lenaerts J.T.M., Van De Berg W.J., Van Den Broeke M.R., Van Meijgaard E. Improved representation of East Antarctic surface mass balance in a regional atmospheric climate model. *Journ. of Glaciology*. 2014, 60 (222): 761–770.
3. Van Wessem J.M., Jan Van De Berg W., Noël B.P. et al. Modelling the climate and surface mass balance of polar ice sheets using *racmo2*: Part 2: Antarctica (1979–2016). *Cryosphere*. 2018, 12 (4): 1479–1498.
4. Sokratova I.N. Hydrological research in Antarctic oases. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2011, 3: 91–103. [In Russian].
5. Sokratova I.N. *Antarkhticheskie oazisy*. Antarctic oases. St. Petersburg: AANII, 2010: 274 p. [In Russian].
6. Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica. *Cryosphere*. 2019, 13: 665–674. doi.org/10.5194/tc-13-665-2019.
7. Antarctic Digital Database (ADD), Version 7.0, January 2016. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge.
8. Averyanov V. Flood at Novolazarevskaya station. *Inform. Byull. Sovetskoy antarkhticheskoy ekspeditsii*. Inform. bull. Soviet Antarctic expedition. 1965, 52: 53–74. [In Russian].
9. Boronina A.S., Chetverova A.A., Popov S.V., Pryakhina G.V. Overview of potentially outburst lakes and the consequences of floods in the Hills of Tala and Larsemann (East Antarctica). *II Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii»*, 5–7 iyunya 2019 g. Proc. of the II All-Russian Scientific and Practical Conf. «Modern Trends and Prospects for the Development of Hydrometeorology in Russia», June 5–7, 2019. Irkutsk, 2019: 307–318. [In Russian].
10. Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. ANARE Research Notes. Antarctic Division Australia. 1990, 74: 173 p.
11. Simonov I.M. *Oazisy Vostochnoy Antarktity*. Oases of East Antarctica. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: 176 p. [In Russian].
12. Otchyot o rabote stancii Progress, 48 Rossiyskaya Antarkhticheskaya ehkspeditsiya. A report on the work at Progress station, 48nd Russian Antarctic Expedition. St. Petersburg: Archive FGBU AARI. 2004, inv. No. O-3553: 204 p. [In Russian].
13. Dvornikov Yu.A., Evdokimov A.A. *Nauchno-tekhnicheskii otchet po programme gidroekologicheskikh issledovaniy na stantsii Progress v sezonnyy period 62-j RAE*. Scientific and technical report on the program of hydroecological studies at Progress Station during the seasonal period of the 62nd RAE. St. Petersburg: Archive FGBU AARI, 2017: 50 p. [In Russian].
14. 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. doi.org/10.31857/S2076673420040065. [In Russian].
15. Grigoreva S.D., Kiniabaeva E.R., Kuznetsova M.R., Popov S.V., Kashkevich M.P. Structure of snow-ice dams of the outburst lakes in the Broknes Peninsula (Larsemann Hills, East Antarctica) based on groundpenetrating radar data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (2): 291–300. doi.org/10.31857/S2076673421020089. [In Russian].
16. Grigoreva S.D., Kiniabaeva E.R., Kuznetsova M.R. *Polevoy otchet o robotakh otryada inzhenernykh izyskaniy v sezon 65-y RAE*. Field report on the work of the engineering survey team during the 65th RAE season. St. Petersburg: Archive FGBU AARI, 2020: 170 p. [In Russian].
17. 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.

- cier, East Antarctica // *Ice and Snow*. 2017. V. 57. № 3. P. 427–432.
18. Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on 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.
 19. Antarctic Xiehe Peninsula orthophoto. Scale 1:4000. Heilongjiang Polar Engineering Center of Surveying & Mapping and Heilongjiang Institute of Geomatics Engineering. China, 2006.
 20. Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. Satellite image map. Edition 3. Map number 14241, Scale 1:25 000. Australian Antarctic Division, 2015.
 21. Григорьева С.Д., Дешевых Г.А., Рыжова Е.В., Четверова А.А. Полевой отчёт о проведении ледоисследовательских изысканий в районе российских антарктических станций Прогресс, Мирный, Новолазаревская и полевых баз Молодёжная, Оазис Бангера в сезон 64-й РАЭ. Т. I. Работы гидролого-геофизической группы в районе станции Прогресс и полевой базы Молодёжная. СПб.: Фонды ААНИИ, 2019. 62 с.
 22. Боронина А.С., Попов С.В., Прякина 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.
 23. Симонов И.М., Федотов В.И. Озера оазиса Ширмахера // *Информ. бюл. САЭ*. 1964. № 47. С. 19–23.
 24. Ingole B.S., Parulekar A.H. Limnology of freshwater lakes of Schirmacher Oasis, East Antarctica // *Proc. of the Indian National Science Academy*. 1993. V. 59. № 6. P. 589–600.
 25. Ravindra R., Chaturvedi A., Beg M.J. Melt water lakes of Schirmacher Oasis-their genetic aspects and classification // *Advances in Marine and Antarctic Sciences*. 2002. P. 301–313.
 26. Phartiyal B., Sharma A., Bera S.K. Glacial lakes and geomorphological evolution of Schirmacher Oasis, East Antarctica, during late quaternary // *Quaternary Intern.* 2011. V. 235. № 1–2. P. 128–136.
 27. Косенко Н.Г., Колобов Д.Д. Обследование озера Унтер-Зе // *Информ. бюл. САЭ*. 1970. № 79. С. 65–69.
 28. Hermichen W.-D., Kowski P., Wand U. Lake Untersee, a first isotope study of the largest freshwater lake in the interior of East Antarctica // *Nature*. 1985. V. 315. № 6015. P. 131–133.
 29. Wand U., Schwarz G., Bruggemann E., Brauer K. Evidence for physical and chemical stratification in Lake Untersee (central Dronning Maud Land, East Antarctica) // *Antarctic Science*. 1997. V. 9. № 1. P. 43–45. doi.org/10.1017/S0954102097000060.
 30. Andreev M., Andersen D., Kurbatova L., Smirnova S., Chaplygina O. Lichens, bryophytes and terrestrial algae of the Lake Untersee Oasis (Wohlthat Massiv, Dronning Maud Land, Antarctica) // *Czech Polar Reports*. 2020. Т. 10. № 2. С. 203–225.
 31. Андреев М.П. Изучение наземной флоры в горном оазисе озера Унтерзее в массиве Вольтат, Земля Королевы Мод, Антарктида в ноябре–декабре 2018 года // *Российские полярные исследования*. 2019. № 20. С. 28–31.
 32. Ваигачев А.З. Прорыв ледяной плотины озера Лагерного // *Информ. бюл. САЭ*. 1965. № 54. С. 58.
 18. Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on 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.
 19. Antarctic Xiehe Peninsula orthophoto. Scale 1:4000. Heilongjiang Polar Engineering Center of Surveying & Mapping and Heilongjiang Institute of Geomatics Engineering. China, 2006.
 20. Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. Satellite image map. Edition 3. Map number 14241, Scale 1:25 000. 2015. Australian Antarctic Division.
 21. Grigoreva S.D., Deshevych G.A., Ryzhova E.V., Chetverova A.A. Polevoy otchet o provedenii ledoissledovatel'skikh izyskaniy v rayone rossiyskikh antarkticheskikh stantsiy Progress, Mirnyy, Novolazarevskaya i polevykh baz Molodezhnaya, Oazis Bangera v sezon 64-y RAE. Tom I. Raboty gidrologo-geofizicheskoy gruppy v rayone stantsii Progress i polevoy bazy Molodezhnaya. Field report on research surveys in the area of the Russian Antarctic stations: Progress, Mirny, Novolazarevskaya and field bases Molodezhnaya, Banger Oasis during the 64th RAE season. V. I. Study of the hydrological-geophysical group in the area of Progress Station and the Molodezhnaya field base. St. Petersburg: Archive FGBU AARI, 2019: 62 p. [In Russian].
 22. 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.
 23. Simonov I.M., Fedotov V.I. Schirmacher oasis lakes. *Inform. byull. Sovetskoy antarkticheskoy ekspeditsii*. Inform. bull. Soviet Antarctic expedition. 1964, 47: 19–23. [In Russian].
 24. Ingole B.S., Parulekar A.H. Limnology of freshwater lakes of Schirmacher Oasis, East Antarctica. *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 1993, 59 (6): 589–600.
 25. Ravindra R., Chaturvedi A., Beg, M.J. Melt water lakes of Schirmacher Oasis-their genetic aspects and classification. *Advances in Marine and Antarctic Sciences*. 2002: 301–313.
 26. Phartiyal B., Sharma A., Bera S.K. Glacial lakes and geomorphological evolution of Schirmacher Oasis, East Antarctica, during late quaternary. *Quaternary Intern.* 2011, 235 (1–2): 128–136.
 27. Kosenko N.G., Kolobov D.D. Survey of Lake Unter-See. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Inform. bull. Soviet Antarctic expedition. 1970, 79: 65–69. [In Russian].
 28. Hermichen W.-D., Kowski P., Wand U. Lake Untersee, a first isotope study of the largest freshwater lake in the interior of East Antarctica. *Nature*. 1985, 315 (6015): 131–133.
 29. Wand U., Schwarz G., Bruggemann E., Brauer K. Evidence for physical and chemical stratification in Lake Untersee (central Dronning Maud Land, East Antarctica). *Antarctic Science*. 1997, 9 (1): 43–45. doi.org/10.1017/S0954102097000060.
 30. Andreev M., Andersen D., Kurbatova L., Smirnova S., Chaplygina O. Lichens, bryophytes and terrestrial algae of the Lake Untersee Oasis (Wohlthat Massiv, Dronning Maud Land, Antarctica). *Czech Polar Reports*. 2020, 10 (2): 203–225.
 31. Andreev M. Study of terrestrial flora in the Lake Untersee oasis (Votat Massif, Queen Maud Land, Antarctica) in November – December 2018. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian polar research. 2019, 20: 28–31. [In Russian].
 32. Vaigachev A.Z. Breakthrough of ice dump of Lager-noye lake. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Inform. bull. Soviet Antarctic expedition. 1965, 54: 58. [In Russian].

33. Отчёт о гляциогидрологических работах в районе ст. Молодёжная в сезон 1969–1970 гг. 15-я Советская антарктическая экспедиция. СПб. Архив ФГБУ ААНИИ. 1970. инв. № О-1790. 34 с.
34. Kaup E. Trophic status of lakes in Thala Hills – records from the years 1967 and 1988 // Proc. NIPR Symp. Polar Biol. 1998. № 11. P. 82–91.
35. Топографическая карта района станции Молодёжная, масштаб 1:50000. Союзмормиипроект, 1972.
36. Атлас Океанов. Антарктика / Ред. В.И. Куроедов. СПб.: Главное Управление навигации и океанографии Минобороны РФ, 2005. 280 с.
37. Вторушин В.Н., Прокофьев Ю.А., Ширнин Н.К. Отчёт об аэродромных работах на полевой базе «Гора Вечерняя» в Антарктиде в период зимовки 34 САЭ и сезона 35 САЭ. Л.: ГОСФОНД, ГНЦ РФААНИИ, 1990. Инф. № О-3098.
38. Мельник А.Ю., Лайба А.А. Высохшее озеро в районе массива Фишер (горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида) // Информ. бюл. САЭ. 1994. № 118. С. 108–110.
39. Топографическая карта. Антарктида. Горы Принс-Чарльз. Массив Фишер. R-42 XXXI, XXXII. Масштаб 1:200000. М.: ГУГК, 1974.
40. Gibson J.A.E. The meromictic lakes and stratified marine basins of the Vestfold Hills, East Antarctica // Antarctic Science. 1999. V. 11. № 2. P. 175–192.
41. Bronge C. The hydrology of proglacial Chelnok Lake, Vestfold Hills, Antarctica // Stockholms Universitet, Research report. 1989. V. 74. P. 29.
42. Gore D.B. Ice-damming and fluvial erosion in the Vestfold Hills, East Antarctica // Antarctic Science. 1992. V. 4. P. 227–234.
43. Bronge C. Hydrology of Tierney Creek, Vestfold Hills, Antarctica // Polar Record. 1999. V. 35. № 193. P. 139–148.
44. Colbeck G. Hydrographic project, Davis 1976 // Antarctic Division Technical Memorandum. 1977. V. 66. P. 1–44.
45. Gore D.B., Pickard J. Proglacial hydrology and drainage, southeastern Vestfold Hills, East Antarctica // Proc. of the Linnean Society of New South Wales. Linnean Society of New South Wales. 1998. № 119. P. 181–196.
46. Клоков В.Д., Веркулич С.Р. Особенности гидрологического режима водоёмов Оазиса Бангера // Информ. бюл. САЭ. 1994. № 118. С. 60–68.
47. Chinn T.J. Physical hydrology of the Dry Valley Lakes // Antarctic Research Series. 1993. V. 59. P. 1–52.
48. Hendy C.H. Late Quaternary lakes in the McMurdo Sound region of Antarctica // Geografiska Annaler: Series A. Physical Geograph. 2000. V. 82. № 2–3. P. 411–432.
49. Bomblies A., McKnight D.M., Andrews E.D. Retrospective simulation of lake-level rise in Lake Bonney based on recent 21-year record: indication of recent climate change in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica // Journ. of Paleolimnology. 2001. V. 25. № 4. P. 477–492.
50. Doran P.T., McKay C.P., Fountain, A.G. et al. Hydrologic response to extreme warm and cold summers in the McMurdo Dry Valleys, East Antarctica // Antarctic Science. 2008. V. 20. № 5. P. 499–509.
51. Lyons W.B., Tyler S.W., Wharton R.A. et al. A Late Holocene desiccation of Lake Hoare and Lake Fryxell, 33. *Otchet o glyatsiogidrologicheskikh rabotakh v rayone st. Molodezhnaya v sezon 1969–1970 gg. 15-ya Sovetskaya antarkticheskaya ekspeditsiya*. A report on glaciohydrological works in the area of Molodezhnaya Station in the 1969–1970 season 15th Soviet Antarctic Expedition. St. Petersburg: Archive FGBU AARI. 1970, inv. No. O-1790: 34 p. [In Russian].
34. Kaup E. Trophic status of lakes in Thala Hills – records from the years 1967 and 1988. Proc. NIPR Symp. Polar Biol. 1998, 11: 82–91.
35. *Topograficheskaya karta rayona stantsii Molodezhnaya, masshtab 1:50000*. Topographic map of the Molodezhnaya station area, scale 1:50,000. Soyuzmorniiprojekt, 1972. [In Russian].
36. *Atlas Okeanov. Antarktika*. Red. V.I. Kuroedov. Atlas of the Oceans. Antarctica. Ed. V.I. Kuroedov. St. Petersburg: Main Directorate of Navigation and Oceanography of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2005: 280 p. [In Russian].
37. *Vtorushin V.N., Prokofiev Yu.A., Shirnin N.K. Otchet ob aerodromnykh rabotakh na polevoy baze «Gora Vechernyaya» v Antarktide v period zimovki 34 SAE i sezona 35 SAE*. Report on aerodrome work at the Vechernyaya Mountain field base in Antarctica during the wintering period of the 34th and 35th SAE season. Leningrad: GOSFOND, SSC RFAANII, 1990: inv. No. O-3098. [In Russian].
38. *Melnika A.Yu., Laiba A.A. A dried-up lake in the Fisher Massif region (Prince Charles Mountains, East Antarctica)*. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Inform. bull. Soviet Antarctic expedition. 1994, 118: 108–110. [In Russian].
39. *Topograficheskaya karta. Antarktida. Gory Prins-Charl'z. Massiv Fisher. R-42 XXXI, XXXII. Masshtab 1:200000*. Topographic map. Antarctica. Prince Charles Mountains. Fisher Array. R-42 XXXI, XXXII. Scale 1: 200000. M.: GUGK, 1974. [In Russian].
40. Gibson J.A.E. The meromictic lakes and stratified marine basins of the Vestfold Hills, East Antarctica. Antarctic Science. 1999, 11 (2): 175–192.
41. Bronge C. The hydrology of proglacial Chelnok Lake, Vestfold Hills, Antarctica. Stockholms Universitet, Research report. 1989, 74: 29.
42. Gore D.B. Ice-damming and fluvial erosion in the Vestfold Hills, East Antarctica. Antarctic Science. 1992, 4: 227–234.
43. Bronge C. Hydrology of Tierney Creek, Vestfold Hills, Antarctica. Polar Record. 1999, 35 (193): 139–148.
44. Colbeck G. Hydrographic project, Davis 1976. Antarctic Division Technical Memorandum. 1977, 66: 1–44.
45. Gore D.B., Pickard J. Proglacial hydrology and drainage, southeastern Vestfold Hills, East Antarctica. Proceedings of the Linnean Society of New South Wales. Linnean Society of New South Wales. 1998, 119: 181–196.
46. Klovov V.D., Verkulich S.R. Features of the hydrological regime of the reservoirs of the Bunker Oasis. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Inform. bull. Soviet Antarctic expedition. 1994, 118: 60–68. [In Russian].
47. Chinn T.J. Physical hydrology of the Dry Valley Lakes. Antarctic Research Series. 1993, 59: 1–52.
48. Hendy C.H. Late Quaternary lakes in the McMurdo Sound region of Antarctica. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geograph*. 2000, 82 (2–3): 411–432.
49. Bomblies A., McKnight D.M., Andrews E.D. Retrospective simulation of lake-level rise in Lake Bonney based on recent 21-year record: indication of recent climate change in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Journ. of Paleolimnology*. 2001, 25 (4): 477–492.
50. Doran P.T., McKay C.P., Fountain, A.G. et al. Hydrologic response to extreme warm and cold summers in the McMurdo Dry Valleys, East Antarctica. Antarctic Science. 2008, 20 (5): 499–509.

- McMurdo Dry Valleys, Antarctica // *Antarctic Science*. 1998. V. 10. P. 247–256.
52. Lyons W.B., Welch K.A., Sharma P. Chlorine-36 in the waters of the McMurdo Dry Valley lakes, southern Victoria Land, Antarctica: revisited // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1998. V. 62. P. 185–191.
 53. Doran P.T. Paleolimnology of perennially ice-covered Antarctic Oasis Lakes. Diss. University of Nevada, Reno, 1996.
 54. Paige R. Sub-Surface Melt Pools in the McMurdo Ice Shelf, Antarctica // *Journ. of Glaciology*. 1968. V. 7. № 51. P. 511–516. doi: 10.3189/S0022143000020700.
 55. Попов С.В., Суханова А.А., Поляков С.П. Применение метода георадарного профилирования для обеспечения безопасности транспортных операций Российской Антарктической экспедиции // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 2. С. 126–131.
 56. Прякина Г.В., Боронина А.С., Попов С.В., Четверова А.А. Гидрологические исследования прорывных озер антарктических оазисов // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 2. С. 94–102.
 57. Суханова А.А., Попов С.В., Боронина А.С., Григорьева С.Д., Кашкевич М.П. Геофизические изыскания в районе станции Прогресс, Восточная Антарктида, в сезон 63-Й РАЭ (2017/18 г.) // *Лёд и Снег*. 2020. Т. 60. № 1. С. 149–160.
 58. Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins // *Journ. of Glaciology*. 1976. V. 17. № 76. P. 181–207.
 59. Björnsson H. Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation // *Annals of Glaciology*. 1992. V. 16. P. 95–106.
 60. Clarke G.K.C. Hydraulics of subglacial outburst floods: new insights from the Spring–Hutter formulation // *Journ. of Glaciology*. 2003. V. 49. № 165. P. 299–313.
 61. Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods // *Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences*. 2009. V. 465. № 2106. P. 1809–1828.
 62. Попов С.В., Прякина Г.В., Боронина А.С. Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоёмов // *Криосфера Земли*. 2019. Т. XXIII. № 3. С. 25–32.
 51. Lyons W.B., Tyler S.W., Wharton R.A. et al. A Late Holocene desiccation of Lake Hoare and Lake Fryxell, McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Antarctic Science*. 1998, 10: 247–256.
 52. Lyons W.B., Welch K.A., Sharma P. Chlorine-36 in the waters of the McMurdo Dry Valley lakes, southern Victoria Land, Antarctica: revisited. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1998, 62: 185–191.
 53. Doran P.T. Paleolimnology of perennially ice-covered Antarctic Oasis Lakes. Diss. University of Nevada, Reno, 1996.
 54. Paige R. Sub-Surface Melt Pools in the McMurdo Ice Shelf, Antarctica. *Journ. of Glaciology*. 1968, 7 (51): 511–516. doi: 10.3189/S0022143000020700.
 55. Popov S.V., Sukhanova A.A., Polyakov S.P. Using georadar profiling techniques for the safety of transport operations of the Russian Antarctic Expedition. *Meteorologiya i gidrologiya*. Russian Meteorology and Hydrology. 2020, 2: 126–131. [In Russian].
 56. Pryakhina G.V., Boronina A.S., Popov S.V., Chetverova A.A. Hydrological studies of lake outbursts in the Antarctic oases. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020, 2: 118–123.
 57. Sukhanova A.A., Popov S.V., Boronina A.S., Grigorieva S.D., Kashkevich M.P. Geophysical surveys in the vicinity of the Progress Station, East Antarctica, performed during the 63rd RAE season (2017/18). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 149–160. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420010030.
 58. Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins. *Journ. of Glaciology*. 1976, 17 (76): 181–207.
 59. Björnsson H. Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation. *Annals of Glaciology*. 1992, 16: 95–106.
 60. Clarke G.K.C. Hydraulics of subglacial outburst floods: new insights from the Spring–Hutter formulation. *Journ. of Glaciology*. 2003, 49 (165): 299–313.
 61. Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods. *Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences*. 2009, 465 (2106): 1809–1828.
 62. Popov S.V., Priakhina G.V., Boronina A.S. Otsenka raskhoda vody v protsesse razvitiya proryvnogo pavodka lednikovyykh i podlednikovyykh vodoyemov. Estimation of water discharge during development of glacial and subglacial outburst floods. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2019, XXIII (3): 25–32. [In Russian].

Подписано в печать 09.02.2022 г. Дата выхода в свет 25.03.2022 г. Формат 60 × 88¹/₈. Цифровая печать.
Усл.печ.л. 19.56. Уч.-изд.л. 20.0. Бум.л. 10.0. Тираж 21 экз. Бесплатно. Заказ 4993.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-76744 от 24 сентября 2019 г.,
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Учредители: Российская академия наук, Институт географии Российской академии наук, Русское географическое общество.

Оригинал-макет подготовлен в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт географии Российской академии наук.

Издатель: Российская академия наук, 119991 Москва, Ленинский просп., 14.
Исполнитель по госконтракту № 4У-ЭА-131-21 ООО «Тематическая редакция»,
125252, г. Москва, ул. Зорге, д. 19, этаж 3, помещ. VI, комн. 44.

16+ Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Конякин А.В.), 390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151.