

## ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>  
УДК 556.5



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

### ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПРИТОКА К ОЗЕРАМ АНТАРКТИЧЕСКОГО ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНН

*М.Р. КУЗНЕЦОВА<sup>1\*</sup>, Г.В. ПРЯХИНА<sup>1</sup>, С.Д. ГРИГОРЬЕВА<sup>1,2</sup>, Э.Р. КИНЬЯБАЕВА<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

\*rotefliege@mail.ru

#### Резюме

Объектами исследования являются 11 водоемов антарктического оазиса Холмы Ларсеманн. Работа выполнена по материалам сезонных работ 63 — 65-й РАЭ: используются наблюдения за уровнем воды озер, аэрофотосъемки БПЛА, маршрутные обследования, приведены результаты выделения границ водосборных площадей озер. Наиболее значимыми выявленными факторами, определяющими формирование притока воды к озерам, являются метеорологические условия (количество твердых осадков, ветровой режим, температура воздуха), наличие многолетних снежников и ледниковых участков на водосборах, прорыв верхнего в системе озера. Сезонно-талый слой рыхлых отложений регулирует склоновый сток по мере протаивания и промерзания. Особенностью оазиса является то, что на формирование стока практически не влияют растительный покров и антропогенная деятельность.

**Ключевые слова:** озера антарктических оазисов, полуостров Брокнес, формирование стока, Холмы Ларсеманн.

**Для цитирования:** Кузнецова М.Р., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р. Факторы формирования поверхностного притока к озерам антарктического оазиса Холмы Ларсеманн // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 3. С. 293–309. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>.

Поступила 05.07.2021

После переработки 03.09.2021

Принята 13.09.2021

### FORMATION FACTORS OF SURFACE INFLOW TO ANTARCTIC LAKES OF THE LARSEMANN HILLS OASIS

*MARIA R. KUZNETSOVA<sup>1\*</sup>, GALINA V. PRIAKHINA<sup>1</sup>, SVETLANA D. GRIGOREVA<sup>1,2</sup>,  
ELVIRA R. KINIABAEVA<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> — St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

### Summary

The study aims to identify formation factors of water inflow to the Antarctic lakes of the Larsemann Hills oasis (East Antarctica). The objects of study are 11 lakes of the oasis. The analysis was performed based on the expeditionary data of the Russian Antarctic Expedition (RAE): 63rd season (23 December 2017 – 3 February 2018), 64th season (12 January 2019 – 27 February 2019), 65th season (2 November 2019 – 24 March 2020). Data of lakes water level observations, aerial photography of the unmanned aerial vehicle (UAV) and route surveys are given, the results of identifying the boundaries of the lakes catchments are presented. The factors that determine the formation of water inflow to the lakes in this region were identified based on the analysis of the materials. The most significant are the meteorological conditions, the presence of perennial snowfields and glacial areas in the catchments, and the presence of lakes that can cause outburst flood. The seasonally thawed layer also has an impact on the formation of the inflow to the lakes. The vegetation cover is not so important for inflow formation in this region due to the physical and geographical conditions. As for anthropogenic activity, it mainly affects the environmental situation of the catchments and water quality, while the anthropogenic influence on the formation of water inflow to the lakes in the oasis is limited to the territories of polar stations. The factors identified should be taken into account in the further study of hydrological processes, the creation of models that describe them, and the organization of field observations.

**Keywords:** Antarctic oasis lakes, Broknes Peninsula, Larsemann Hills, runoff formation.

**For Citation:** *Kuznetsova M.R., Priakhina G.V., Grigoreva S.D., Kiniabaeva E.R.* Formation factors of surface inflow to antarctic lakes of the Larsemann Hills oasis. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (3): 293–309 [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>.

Received 05.07.2021

Revised 03.09.2021

Accepted 13.09.2021

### ВВЕДЕНИЕ

Формирование притока к водоему представляет собой сложный, многофакторный процесс, который зависит как от общих физико-географических особенностей района, так и от локальных условий в конкретном водосборном бассейне. К основным факторам относят климатические условия и характер подстилающей поверхности: рельеф, геологическое строение, почвы, растительность и т. д. В качестве интегральной характеристики процессов, протекающих на водосборе озера и в самом водном объекте, а также факторов, на них влияющих, рассматривается уровень воды.

Изучение региональных особенностей процессов формирования притока к озерам антарктических оазисов является одной из задач гидрологии как науки в рамках исследования гидрологического режима полярных территорий. Это продиктовано особыми физико-географическими условиями исследуемых объектов.

Гидрографическая сеть территорий антарктических оазисов представлена, как правило, непромерзающими озерами и временными водотоками, существующими только в течение теплого периода года [1]. Приток воды к озерам формируется за счет таяния ледников и снежников, расположенных на их водосборах в летний период, ограниченный 2–3 месяцами. Поступление талой воды в водоемы происходит в основном в процессе склонового стока, а также по руслам временных водотоков. Эти особенности отмечены исследователями для различных оазисов, например для оазиса Бангера [2, 3], оазиса Ширмахера [3–5], территорий Сухих Долин Мак-Мердо [6], оазиса Холмы Ларсеманн [7, 8].

В рамках настоящей статьи предлагается рассмотреть факторы, влияющие на формирование притока воды к озерам оазиса Холмы Ларсеманн. Систематическое

изучение территории этого оазиса осуществляется с 1980-х гг. как отечественными, так и зарубежными специалистами в различных областях [3]: в геологии [9–11], геокриологии [12], почвоведении [13–15], экологии [16–22], гидрохимии [23], палеолимнологии [24] и палеоклиматологии [25], гляциологии и геофизики [26, 27]. Общее физико-географическое описание оазиса и особенности антропогенной деятельности представлены в заключительном отчете XXXVII Консультативного совещания по Договору об Антарктике (КСДА) [28]. В ходе гидрологических исследований получены данные о строении озерных котловин [13, 29–31], водном балансе [32], термическом, уровне и гидрохимическом режимах водоемов [13, 29, 32, 33], времени водообмена [34], а также прорывных явлениях [32, 35]. Опубликованные материалы всесторонних исследований оазиса Холмы Ларсеманн, а также собственные результаты наблюдений позволяют выделить основные факторы, влияющие на формирование притока к озерам данного оазиса. Это представляет интерес в рамках развития теоретических представлений о природных процессах Антарктики, а также будет полезным при адаптации методик гидрологических расчетов для данного региона.

### **РАЙОН РАБОТ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Оазис Холмы Ларсеманн расположен на побережье залива Прюдс моря Содружества. Он занимает площадь около 40 км<sup>2</sup>: два больших полуострова — Сторнес и Брокнес, 4 мыса и около 130 островов [28]. Климат на территории оазиса довольно мягкий. Согласно данным метеостанции Прогресс, среднегодовая температура воздуха составляет –9,8 °С, средняя температура воздуха теплого периода (с декабря по февраль) около 0 °С, при абсолютном максимуме +9,3 °С. Среднемесячные зимние температуры воздуха изменяются от –15 до –18 °С, при абсолютном минимуме –38,0 °С [11, 30].

На территории преобладают ветра восточного и северо-восточного направления (среднегодовая скорость около 6,7 м/с). Характерной особенностью является формирование холодных катабатических (стоковых) ветров, скоростью более 10 м/с [11, 30].

Годовое количество суммарной солнечной радиации составляет около 3000–3200 МДж/м<sup>2</sup>. При этом более половины этой величины поступает в теплый сезон — с ноября по февраль, способствуя активному снеготаянию.

Осадки в течение года выпадают преимущественно в твердом виде. Средне-многолетнее значение составляет 250 мм в водном эквиваленте снега [30].

Территория претерпела несколько структурных деформаций; горные породы представлены различными видами гнейсов [9]. Выходы скальных пород перекрыты обломочным материалом.

Для оазиса характерно чередование возвышенностей и пологих понижений типа долин, вытянутых в направлении с юго-запада на северо-восток. Холмы часто образуют подобие хребтов протяженностью несколько сотен метров. На п-ове Брокнес их высота в среднем достигает 100–120 м; наибольшая высота на полуострове 148,7 м над уровнем моря [36]. При движении с северо-востока на юг и юго-запад возрастают средние абсолютные высоты территории (от 60 до 100 м над уровнем моря), увеличивается и расчлененность рельефа (перепады высот от 50 до 80 м).

Характерной особенностью территории оазиса является наличие навесных снежников, образующихся на подветренных склонах. Большинство из них являются многолетними. Южная часть оазиса частично перекрыта ледником. Отдельные вы-

ходы скальных пород — нунатаки — обеспечивают перепады высот до 30 м. Пологое и обширное понижение приурочено к полностью перекрытому льдом озеру Болдер.

На всей территории оазиса представлено более 150 водоемов [30]. В настоящей работе рассмотрены 11 озер восточной части полуострова Брокнес. Их водосборные территории различаются по площади, рельефу, площадям снежно-ледовых участков, наличию временных водотоков (рис. 1, табл. 1).

Наименьшую площадь имеет водосбор бессточного озера Лоу, представленный выходами скальных пород, перекрытых рыхлыми отложениями; здесь располагается

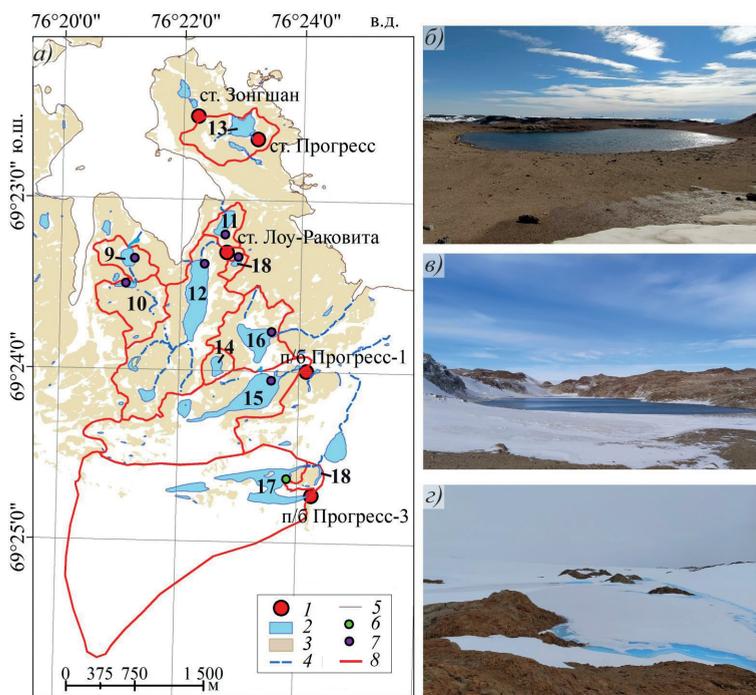


Рис. 1. Водосборы озер полуострова Брокнес: а) — карта-схема водосборов, б) — оз. Лоу, в) — оз. Скандретт, г) — оз. Болдер.

1 — станции и полевые базы, 2 — озера\*, 3 — скальные породы и грунты, 4 — временные водотоки, 5 — береговая линия; 6 — речный водомерный пост, 7 — свайный водомерный пост, 8 — границы водосборов; 9 — оз. Дискашн, 10 — оз. LH-59, 11 — оз. Рейд, 12 — оз. Скандретт, 13 — оз. Степлед, 14 — оз. LH-73, 15 — оз. Прогресс, 16 — оз. Сибторп, 17 — оз. Болдер, 18 — оз. Ледяное, 19 — оз. Лоу

Fig. 1. Lake catchments of Broknes Peninsula: а) — schematic map of catchments, б) — Low Lake, в) — Scandrett Lake, г) — Boulder Lake.

1 — stations and field bases, 2 — lakes\*, 3 — rocks and soils, 4 — temporary streams, 5 — coastline; 6 — gauge station with a rod, 7 — gauge station with a pile, 8 — boundaries of catchments; 9 — Discussion Lake, 10 — LH-59 Lake, 11 — Reid Lake, 12 — Scandrett Lake, 13 — Stepped Lake, 14 — LH-73 Lake, 15 — Progress Lake, 16 — Sibthorpe Lake, 17 — Boulder Lake, 18 — Ledyanoe Lake, 19 — Low Lake

\* Названия водоемов приведены в соответствии с топографической картой [36]. Для водоемов, названия которых на карте не указаны, использованы названия из атласа озер [30]: LH-59, LH-73. Озеро Ледяное — временное название безымянного водоема, отсутствующего в атласе озер [31]

\* The names of lakes are given in accordance with the topographic map [36]. For lakes whose names are not shown on the map, names from the atlas of lakes were used [30]: LH-59, LH-73. Lake Ledyanoe is the temporary name of a lake that was not considered in the atlas of lakes [31].

## Площади снежников на водосборах рассматриваемых озер полуострова Брокнес

Table 1

## Snowfields area on the catchments of catchments of the Broknes Peninsula lakes considered

Озеро	Площадь водосбора, м <sup>2</sup>	Площадь снежников (27–28.12.2019), м <sup>2</sup>	Доля снежников, % от площади водосбора
Лоу	34290	1413	4
ЛН-59	364536	47377	13
Сибторп	554946	330303	60
Прогресс	1241171	733964	59
ЛН-73	66553	13476	20
Рейд	87290	13456	15
Скандретт	1127510	274026	24
Дискашн	173420	56618	33
Степпед	349945	54298	16

Примечание: на водосборе озера Прогресс представлены снежники и участок ледника.

один небольшой снежник. На водосборе озера ЛН-73 также находится только один многолетний снежник, подпруживающий озеро и выполняющий функцию естественной снежно-ледовой плотины. Водосборы озер Степпед и Рейд характеризуются небольшими перепадами высот до 30 м, относительно пологими склонами и наличием нескольких (около 5) многолетних снежников. Значительную долю водосбора озера Сибторп занимают многолетние снежники, в то время как на сравнимом по величине водосборе озера ЛН-59 снежники занимают гораздо меньшую площадь. Крупные водосборы отличаются более расчлененным рельефом, большими площадями многолетних снежников. Например, на водосборе сточного озера Скандретт перепады высот составляют до 100 м, характерно наличие крутых, почти отвесных склонов, два прорывающихся озера и около 6 временных водотоков, имеющих выраженное русло. Меньший перепад высот (около 80 м) отмечается на еще более крупном водосборе озера Прогресс, который помимо снежников содержит участок ледника. Сравнительно небольшой водосбор озера Дискашн, обладающий расчлененным рельефом и перепадами высот до 50 м, включает в себя, однако, несколько отвесных склонов, образующих небольшое ущелье. В процессе прорыва могут участвовать несколько озер, образуя на этот момент системы водоемов: например, ЛН-59 — Дискашн, ЛН-73 — Прогресс — Сибторп. Водосборы озер Болдер и Ледяное расположены непосредственно на леднике; к настоящему моменту границы их водосборов определены исходя из поверхностного рельефа ледника, уточнение их положения является одной из задач дальнейших исследований оазиса; в связи с этим указанные объекты не были включены в табл. 1.

На карте-схеме водосборов (см. рис. 1а) также отмечены временные водотоки — тип водных объектов, широко распространенный в пределах оазиса. Ручьи, вытекающие из озер, имеют выраженное русло, существуют на протяжении 1–3 месяцев теплого сезона (рис. 2а). В солнечные дни на склонах можно наблюдать микроручейковую сеть, образованную в результате интенсивного таяния (рис. 2б). В оазисе также встречаются переувлажненные участки склонов, вероятно связанные с процессами протаивания многолетней мерзлоты и выходом воды на поверхность (рис. 2в).



Рис. 2. Поверхностный сток. а) — ручей из озера Сибторп, б) — талые воды, в) — переувлажненный склон

Fig. 2. Surface runoff. а) — the stream of Sibthorpe Lake, б) — melt water, в) — a very wet slope

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье использованы материалы, полученные авторами в ходе сезонных полевых работ 63–65-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в районе станции Прогресс (2017–2020 гг.). В них вошли данные наблюдений на уровненых водомерных постах на 8 озерах, маршрутные гидрографические описания водосборов 11 озер, серии аэрофотоснимков территории, полученные в течение сезона 65-й РАЭ с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самолетного типа ZALA 421-08M. Полученные снимки использовались при построении ортофотоплана. Для привязки снимков на площади съемки были заблаговременно размещены опознавательные знаки, планово-высотные координаты которых были определены при помощи DGPS-комплекса EFT M2 (ООО «Эффективные технологии», Россия) (точность определения в режиме RTK в плане  $8 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм/км}$ , по высоте  $5 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм/км}$ ). Полученный ортофотоплан был использован при анализе распределения снежного покрова по территории и определении его площадей на водосборах озер (табл. 1). Построение ортофотоплана, вычисление площадей водосборов и снежников осуществлялось в программе ArcGIS 10.1. Измерения уровня воды озер выполнялись на свайных и речных водомерных постах (см. рис. 1а). Посты на озерах LH-59 и Лоу были организованы в 2019–2020 гг., а посты на остальных водоемах — в предыдущие два года. Ежегодно перед началом наблюдений проводилась реорганизация постов: проверка состояния свай и рек, определение их плановых и высотных координат (последнее выполнялось при помощи уже упомянутой выше DGPS-аппаратуры с указанной точностью). Измерение уровня на водомерных постах производилось 1 раз в сутки с интервалом 1–2 суток, при отсутствии выраженной динамики уровня интервал увеличивали до 3–5 суток; в период прорыва частоту измерений увеличивали до 1 измерения в 5 минут. Не удалось зафиксировать максимальный уровень озера LH-59 в декабре 2019 г., поскольку его прорыв произошел в ночное время. На озерах Дискашн и Прогресс в 2019–2020 гг. для получения детальных данных о ходе уровня воды дополнительно был использован автоматический регистратор уровня воды «Гидрометрика-502» (интервал записи измерений 10 минут); при этом для проверки корректности данных, полученных по уровнемеру, наблюдения за уровнем воды на свайных постах продолжались. Границы водосборов на предполевом этапе работ были определены по изолиниям рельефа топографической карты [36]. Затем выделенные контуры были скорректированы с учетом фактических полевых обследований водосборов озер. Этим объясняются некоторые отличия от границ, приведенных на упомянутой топографической карте. Для анализа метеорологических характеристик использованы данные метеостанции Прогресс.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИТОКА ВОДЫ К ОЗЕРАМ

*Метеорологические условия.* Климат исследуемого региона определяет сезонность формирования стока: в холодный период года (с марта по ноябрь) происходит накопление твердых осадков, а в теплый период (с декабря по февраль) в результате таяния снега, снежников и ледника образуются талые воды и формируется приток к водоемам. Метеорологические условия год от года изменяются, они оказывают влияние на стокообразование преимущественно через процессы образования и разрушения сезонного снежного покрова и таяния многолетних снежников и ледников.

Количество твердых осадков, выпадающих с марта по ноябрь и формирующих устойчивый снежный покров, во многом определяет величину объема притока к озерам. Например, зимой 2017 г. выпало около 270 мм снега в водном эквиваленте, а в последующие 2 года в 1,7 раза меньше. Это повлияло на наполнение озерных котловин: максимальные уровни воды в прорывающихся озерах в теплый период 2017–2018 гг. (летний сезон 63-й РАЭ) оказались выше, чем в 64-й и 65-й летние сезоны (2018–2020 гг.) (табл. 2).

Таблица 2

#### Максимальные уровни воды рассматриваемых озер полуострова Брокнес

Table 2

#### Maximum water levels of the Broknes Peninsula lakes considered

Период уровенных наблюдений	Уровень воды, см над «0» графика (дата)			Осадки за предшествующий холодный период (февраль–декабрь), мм (год)
	Дискашн	Прогресс	Сибторп	
63-я РАЭ (23.12.2017–03.02.2018)	151 (17.01.2018)	131 (06.02.2018)	85 (06.02.2018)	270 (2017)
64-я РАЭ (12.01–27.02.2019)	–	94 (14.01.2019)	37 (14.01.2019)	158 (2018)
65-я РАЭ (08.12.2019–24.03.2020 гг.)	87 (19.12.2019)	89 (06.01.2020)	30 (06.01.2020)	156 (2019)

*Примечание:* наполнение озер Прогресс и Сибторп после окончания мониторинга в летний сезон 2017/18 г. продолжалось, приведены наибольшие наблюдаемые уровни. Отметка «0» графика озера Дискашн составляет 2,5 м над уровнем моря, отметка «0» графика озера озер Прогресс и Сибторп составляет 58,0 м над уровнем моря.

Особенности ветрового режима оазиса влияют на перераспределение выпадающих осадков по территории: за счет действия постоянных и часто сильных ветров одного и того же направления (преимущественно северного или северо-восточного), кatabатических ветров [11, 30], а также особенностей орографии снег сдувается с возвышенностей и накапливается в низинах и ущельях. Таким образом, сплошной снежный покров в оазисе не формируется. Анализ снимков БПЛА показал, что до начала таяния в середине ноября 2019 г. площадь снежного покрова на водосборах исследуемых озер (за исключением расположенных на леднике Болдер и Ледяное) не превышала 60 %. Эта региональная особенность делает невозможным применение к территории оазиса понятия «дата схода снежного покрова» — «день, когда покрытость открытой местности снегом снижается до 50 %» [37].

Влияние температур воздуха на стокообразование наиболее существенно в период разрушения снежного покрова — с декабря по февраль. Температура воздуха в течение суток принимает как положительные, так и отрицательные значения, поэтому величина средней суточной температуры может быть ниже 0 °С, то есть устойчивый переход среднесуточных температур через 0 °С не наступает. Поэтому в данном случае как период активного таяния и формирования притока можно рассматривать период, когда максимальные значения суточной температуры воздуха ежедневно превышают 0 °С. Согласно графикам хода максимальных и среднесуточных температур воздуха (рис. 3а, б, в), в течение последних трех лет происходило смещение сроков появления дней с положительными максимальными температурами. Так, в 63-й летний сезон (2017/18) основной период таяния начался 17 декабря 2017 г., на следующий год (64-й летний сезон, 2018/19) — 8 декабря 2018 г., а в 65-й летний сезон (2019/20) еще раньше — 23 ноября 2019 г. Это обусловило более раннее наполнение водоемов, сопровождающееся повышением уровня воды, и более ранние сроки прорывов озер (рис. 3з, д).

Например, прорыв оз. Дискашн в летний сезон 63-й РАЭ произошел 22 января, а в 65-й летний сезон — 19 декабря, т. е. на месяц раньше. На оз. Сибторп в 64-й и 65-й сезоны прорывы произошли 14 и 6 января соответственно. Прорыв оз. Дискашн в 64-й летний сезон произошел до прибытия отряда в период до 14 января, а прорыв оз. Сибторп в 63-й летний сезон — после окончания сезонных работ, т. е. после 6 февраля, что подтверждает выявленную тенденцию смещения дат прорывов в указанные три года.

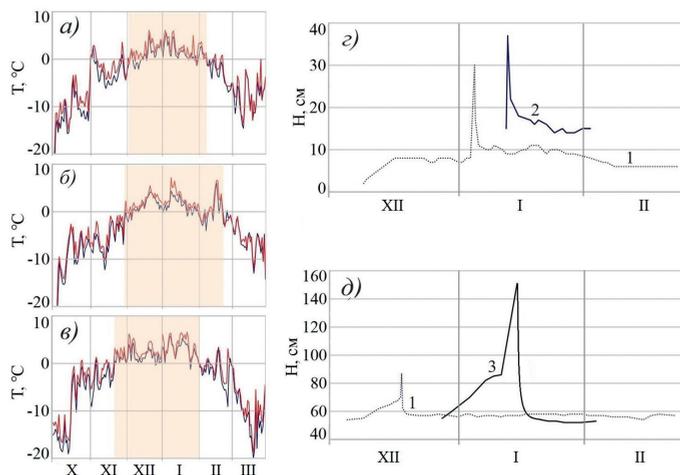


Рис. 3. Температуры воздуха и сезонный ход уровня воды озер.

Ход максимальных и среднесуточных температур воздуха (°С) за период с октября по март: а) — 2017–2018 гт., б) — 2018–2019 гт., в) — 2019–2020 гт.; ход уровня воды над «0» графика: з) — оз. Сибторп, д) — оз. Дискашн; 1 — 2019–2020 гт., 2 — 2018–2019 гт., 3 — 2017–2018 гт. Цветом выделен теплый период. За «0» графика для оз. Сибторп принята отметка 58 м над уровнем моря, для оз. Дискашн 2 м над уровнем моря

Fig. 3. Air temperature and seasonal changes of lakes water level.

Changes of maximum and average daily air temperature (°C) during the period from October to March: а) — 2017–2018, б) — 2018–2019, в) — 2019–2020; changes of lakes water level above level of zero: з) — Sibthorpe Lake, д) — Discussion Lake; 1 — 2019–2020, 2 — 2018–2019, 3 — 2017–2018. Warm period is highlighted in color. Level of zero is 58 m above sea level for Sibthorpe Lake, 2 m above sea level for Discussion Lake

**Рельеф.** Рельеф оказывает лишь косвенное воздействие на формирование притока к озерам. Это происходит за счет влияния на распределение осадков и создание особых микроклиматических условий на отдельных водосборах. Кроме того, строение гидрографической сети (очевидно, что положение озер приурочено к понижениям в рельефе [15]), границы и размеры водосборных территорий определяются этим фактором. Кроме того, холмистый рельеф способствует формированию навешных снежников при ветровом перераспределении снега по территории.

**Сезонно-талый слой.** Рыхлые отложения, перекрывающих выходы скальных пород оазиса, регулируют поверхностный склоновый сток по мере оттаивания и промерзания. Почвенный покров района имеет мощность менее 10 см и представлен лишь на отдельных участках [12, 15]. Глубина сезонного протаивания зависит от экспозиции склона, вида отложений, увлажненности, а также наличия мхов и лишайников на их поверхности. Мощность деятельного слоя к окончанию периода таяния составляет от 0,4 до 0,9 м, хотя в некоторых случаях может достигать и 1,1 м.

Оттаявшие рыхлые отложения могут обеспечивать перевод поверхностного стока в грунтовый за счет фильтрации вод: например, потоки талых вод снежников часто фильтруются, прерываясь на середине склона (см. рис. 2б) и продолжая свое движение уже под поверхностью — в виде грунтового стока. Таким образом, на некоторых участках возможен грунтовый сток в озера по подошве сезонно-талого слоя. Дополнительное поступление влаги, формирующей приток к озерам оазиса, происходит за счет таяния «высокольдистых грунтов» [15].

**Снежники.** Особым фактором формирования притока к водоемам являются многолетние навешные снежники: они обеспечивают поступление талых вод на протяжении всего теплого периода. Особенно хорошо это видно на примере бессточного озера Лоу. Так, в летний сезон 65-й РАЭ (2019/20) основное количество сезонного снега стаяло к концу декабря. Однако к водоему продолжал поступать приток, сформированный талыми водами снежника (в том числе при таянии его фирново-ледовой части), что обусловило продолжительный рост уровня воды (рис. 4).

Площадь снежников в течение последних десятилетий увеличивается [16, 18]. По состоянию на 27–28.12.2019 г. (см. табл. 1) доля снежников на водосборах озер составляла от нескольких процентов (4 % на водосборе озера Лоу) до половины площади водосбора и более (60 % на водосборе озера Сибторп).

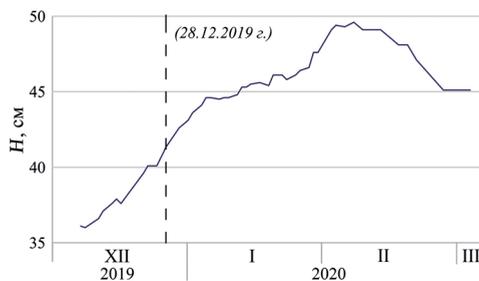


Рис. 4. Озеро Лоу: сезонный ход уровня воды.

28.12.2020 — сход большей части сезонного снега. Отметка «0» графика озера Лоу составляет 60 м над уровнем моря

Fig. 4. Low Lake: seasonal changes of Low Lake water level.

28.12.2020 — loss of seasonal snow cover. Level of zero is 60 m above sea level for Low Lake

**Прорывные водоемы.** Некоторые снежники подпруживают водоемы, выполняют роль природных дамб. В случае прорыва такого озера происходит сброс накопленной воды в расположенный ниже водоем или в бухту, причем разрушение дамбы сопровождается образованием канала стока.

При прорывах могут образовываться системы (каскады) озер. В таких случаях после прорыва в нижний водоем системы вода поступает уже не только с собственного водосбора, но и дополнительно с водосбора верхнего прорвавшегося озера — в виде руслового притока по сформировавшемуся каналу стока.

Наличие в каскаде озер прорывоопасного водоема отражается на гидрологическом режиме всех водных объектов системы. Прорыв выше расположенного водоема означает быстрое, почти одновременное поступление значительных объемов воды в нижний водоем каскада — т. е. значительное поступление притока. Это отражается на изменении хода уровня воды озер. Например, уровень озера Сибторп, имевшего сток в течение всего теплого сезона 65-й РАЭ (декабрь 2019 г. — февраль 2020 г.), являлся достаточно стабильным. Однако прорыв расположенного выше озера Прогресс приводит к резкому увеличению отметки его водной поверхности (рис. 5а, б). Аналогичная ситуация наблюдалась в январе 2013 г. [32].

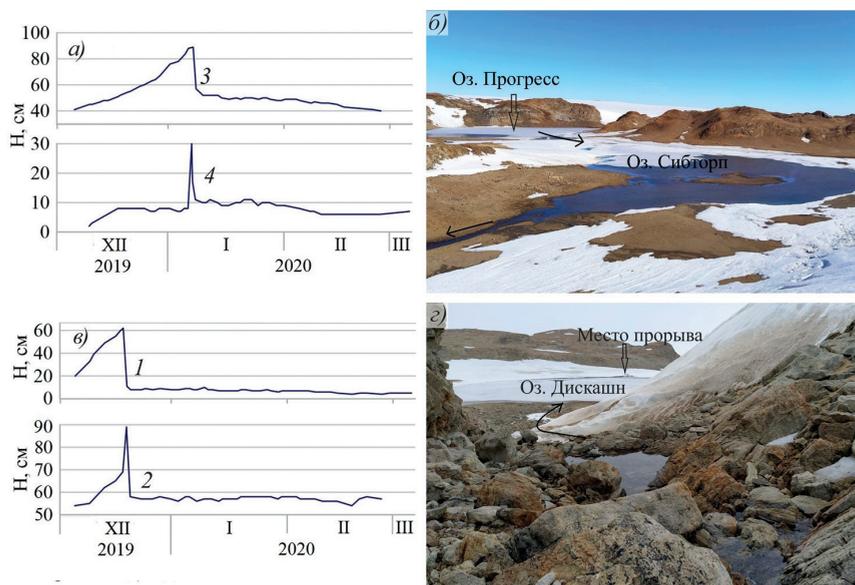


Рис. 5. Системы прорывающихся озер: а) — ход уровня воды системы озер Прогресс — Сибторп, б) — общий вид системы озер Прогресс — Сибторп, в) — ход уровня воды системы озер ЛН-59 — Дискашн, г) — путь перетока воды из оз. ЛН-59 в оз. Дискашн.

Графики хода уровня воды озер: 1 — ЛН-59, 2 — Дискашн, 3 — Прогресс, 4 — Сибторп. Отметка «0» графика озера ЛН-59 составляет 19,0 м над уровнем моря, отметка «0» графика озера Дискашн составляет 2,5 м над уровнем моря, отметка «0» графика озер Прогресс и Сибторп составляет 58,0 м над уровнем моря

Fig. 5. System of lakes with risks of outburst flood: а) — water level changes of lake system Progress — Sibthorpe, б) — general view of the system Progress — Sibthorpe, в) — water level changes of lake system LH-59 — Discussion, г) — water flow path from LH-59 Lake to Discussion Lake.

Charts showing changes of water level of lakes: 1 — LH-59, 2 — Discussion, 3 — Discussion, 4 — Sibthorpe. Level of zero is 19.0 m above sea level for LH-59 Lake, 2.5 m above sea level for Discussion Lake, 58.0 m above sea level for Progress and Sibthorpe

Кроме того, подобное поступление притока в нижерасположенный водоем может стать триггерным импульсом его собственного прорыва. Это видно на примере системы озер ЛН-59 — Дискашн. Озеро Дискашн является прорывающимся водоемом, что отмечалось зарубежными авторами [8]; в течение последних трех лет прорывы происходили ежегодно. Предположение о прорывах озера ЛН-59 было выдвинуто по косвенным признакам [27]. Параллельные наблюдения за уровнем режимом обоих водоемов были выполнены в 2019–2020 гг. (рис. 5в, з) с применением автоматического регистратора уровней. Интенсивный приток в озеро Дискашн обусловил быстрое наполнение водоема, которое всего за несколько часов спровоцировало разрушение снежной плотины, формирование канала стока и поступление озерной воды в бухту Нелла. Таким образом, быстрое поступление притока в водоем привело к сбросу части озерной воды.

*Ледник.* Основным источником питания ледниковых водоемов в течение всего теплого периода года является жидкий сток, формирующийся на леднике Долк, обеспечивая, в том числе, дополнительный приток к озерам, расположенным в краевой части. Фирновая часть ледника, расположенная в южной части оазиса [10], частично представлена на водосборах озер Прогресс и Сибторп и почти полностью занимает территории водосборов ледниковых озер Болдер и Ледяное (см. рис. 1а). Наполнение озера Болдер происходило в течение последних трех лет за счет таяния сезонного снега и талых ледниковых вод. Оно завершилось прорывом 8 января 2020 г., сопровождавшимся формированием открытого канала стока, переполнением и прорывом озера Ледяное (10.01.2020 г.), поступлением воды в провал у п/б Прогресс-1 (11.01.2020 г.) и его наполнением в течение последующих двух недель. Сток из озера Болдер осуществлялся до конца теплого сезона. Объем в наиболее активный период прорыва (с 8 по 11 января 2020 г.), оцененный по измеренным значениям расходов воды, составил 82 850 м<sup>3</sup>. Ранее водоем уже прорывался — 29 января 2017 г., что спровоцировало формирование провала в западной части ледника Долк [35, 38]. Масштабность этих событий позволяет судить о значительном объеме притока талых ледниковых вод, поступивших в озеро в период его наполнения.

*Растительный покров.* Растительность оазиса представлена преимущественно лишайниками, мхами и водорослями [12, 19]. Они не образуют сплошного растительного покрова, поэтому такие процессы, как перехват осадков и транспирация, значительного влияния на формирование притока воды к озерам не оказывают.

*Антропогенная деятельность.* Несмотря на то, что деятельность человека на территории оазиса ограничена Договором об Антарктике, его присутствие в оазисе заметно для окружающей среды, что отмечалось еще в 1990-е гг. [18]. В ряде работ обсуждается воздействие на изменение химического состава и качества воды озер [16, 20, 22]. Однако преобразование поверхности водосборов — строительство зданий, выравнивание площадок, которое могло бы повлиять на характеристики водного режима, — осуществляется только в пределах станций; гидротехнические сооружения в оазисе отсутствуют, сток с водосборов искусственно не регулируется. В последние годы ведутся строительные работы на территории китайской станции Зонг-Шан (водосбор озера ЛН-69), а на российской станции Прогресс (водосбор озера Степед) преобразование территории, наоборот, не осуществляется. Отметим, что озеро Степед используется в целях водоснабжения станции Прогресс; его объем, оцененный перед установкой насосной станции в феврале 2012 г., составил порядка

40,5 тыс. м<sup>3</sup> [7], а в январе 2019 года порядка 41,1 тыс. м<sup>3</sup>. Масштабных строительных работ на водосборе за этот период не проводилось — серьезное влияние на формирование притока отсутствовало, при этом объем озера почти не изменился. Таким образом, влияние человека на процессы формирования притока к озерам в целом на территории оазиса незначительно, однако этот фактор необходимо анализировать при рассмотрении водосборов, на которых расположены полярные станции.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ собственных полевых материалов и литературных источников позволил выявить наиболее значимые факторы формирования притока к антарктическим водоемам оазиса Холмы Ларсеманн: метеорологические характеристики конкретного года, наличие многолетних снежников и ледниковых участков на водосборах, а в ряде случаев — и верхнего прорывоопасного водоема. Такие факторы, как растительный покров и антропогенная деятельность, обычно играющие значительную роль при рассмотрении процессов формирования стока других регионов, в данном случае практически не влияют на них в силу отсутствия сплошного растительного покрова и ограничений хозяйственной деятельности на территории оазиса. Однако в дальнейшем роль деятельности человека как фактора формирования притока будет возрастать: в первую очередь это обстоятельство важно для территорий водосборов, где расположены полярные станции. Расширение их инфраструктуры — строительство новых зданий, вертолетных площадок и др. — потребует преобразования территорий. В этой связи количественные оценки объемов воды, поступающих к озерам, с учетом всех особенностей этого процесса необходимы для решения прикладных гидрологических задач, в первую очередь водохозяйственных расчетов: российская станция Прогресс и китайская станция Зонг-Шан используют для водообеспечения расположенные рядом водоемы Степед и LH-69 соответственно. Не менее важной задачей является расчет скорости наполнения прорывоопасных водоемов для своевременного прогнозирования этих событий.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00343 А.

**Благодарности.** Авторы выражают глубокую благодарность помощнику начальника сезонной 65-й РАЭ А.В. Миракину за помощь в организации и выполнении полевых работ, а также коллегам А.С. Борониной и А.А. Четверовой за предоставленные материалы.

**Competing interests.** The authors have no competing interests.

**Funding.** The work was carried out with the financial support of the RFBR grant No 20-05-00343.

**Acknowledgments.** The authors are deeply grateful to A.V. Mirakin, assistant head of the seasonal 65<sup>th</sup> RAE, for help in field work organization and performance, as well as to the colleagues Boronina A.S. and Chetverova A.A. for the data provided.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сократова И.Н. Антарктические оазисы: история и значение термина // Материалы гляциологических исследований. 2007. № 103. С. 25–29.
2. Научно-технический отчет об исследовании бассейна озера Фигурное в оазисе Бангера (Восточная Антарктида). Ленинград. 1988. 120 с. // Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О 3032.

3. Сократова И.Н. Антарктические оазисы: История и результаты исследований. СПб.: ГНЦ РФ ААНИИ, 2010. 274 с.
4. Научно-технический отчет 52-й Российской антарктической экспедиции (сезонный состав). Т. 1. Антарктида, ноябрь 2006 г. — май 2007 г. 2007. 237 с. // Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О 3640.
5. Симонов И.М. Оазисы Восточной Антарктиды / Под ред. канд. геогр. наук Кручинина Ю.А. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 176 с.
6. Dugan H.A. Geophysics, Water Balance, and History of Thick Perennial Ice Covers on Antarctic Lakes. Chicago, Illinois, 2014. 109 p.
7. Научно-технический отчет выполнения программы сезонных гидроэкологических работ на станции Прогресс в период сезона 57 РАЭ. Антарктида, оазис Холмы Ларсеманн 2011–2012. 2012. 27 с. // Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О 3802.
8. Burgess J.S., Spatez A.P., Shevlin J. The onset of deglaciation in the Larsemann Hills, Eastern Antarctica // Antarctic Science. 1994. № 6 (4). P. 491–495.
9. Stüwe K., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica // Australian Journal of Earth Sciences. 1989. V. 36. P. 219–241. doi: 10.1080/08120098908729483
10. Kiernan K., Gore D. B., Fink D., White D.A., McConnell A., Sigurdsson I.A. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica // Antarctic Science. 2009. V. 21. № 4. P. 373–382. doi: 10.1017/S0954102009002028
11. Zong S., Ren L., Wu M. Grenville-age metamorphism in the Larsemann Hills: P-T evolution of the felsic orthogneiss in the Broknes Peninsula, East Antarctica // International Geology Review. 2020. V. 63. № 7. P. 866–881. doi: 10.1080/00206814.2020.1734973
12. Абрамов А.А., Слеттен Р.С., Ривкина Е.М., Миронов В.А., Гиличинский Д.А. Геокриологические условия Антарктиды // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 3. С. 3–19.
13. Отчет сезонной 61-й Российской антарктической экспедиции. Т. 2. О выполнении научных программ. Антарктика. 2016. 492 с. // Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3932.
14. Абакумов Е.В., Крыленков В.А. Почвы Антарктиды // Природа. 2011. № 3. С. 58–62.
15. Мергелов Н.С. Почвы влажных долин в оазисах Ларсеманн и Вестфолль (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1027–1045. doi: 10.7868/S0032180X14090093
16. Отчет о выполнении программы ландшафтно-экологического мониторинга, район станции «Прогресс», период 43-й РАЭ (сезон). Санкт-Петербург. 1998. 31 с. // Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3310.
17. Sabbe K., Hodgson D. A., Verleyen E., Taton A., Wilmotte A., Vanhoutte K., Yüverman W. Salinity, depth and the structure and composition of microbial mats in continental Antarctic lakes // Freshwater Biology. 2004. V. 49. P. 296–319.
18. Burgess J.S., Spate A.P., Norman F.I. Environmental Impacts of Station Development in the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica // Journal of Environmental Management. 1992. V. 36. P. 287–299.
19. Gupta P. Biodiversity of Larsemann Hills, Antarctica // Climate Change. 2015. V. 1. № 3. P. 174–183.
20. Нугаматзянова Г.Р., Федорова И.В. Оценка экологического состояния озер оазисов Холмов Ларсеманн и Ширмахера (Восточная Антарктида) // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 140–144.
21. Шаров А.Н., Толстиков А.В. Экологические проблемы озер Восточной Антарктиды // Региональная экология. 2018. Т. 53. № 3. С. 5–14. doi: 10.30694/1026-5600-2018-3-5-14

22. *Bhardwaj L., Sharma S., Ranjan A., Jindal T.* Persistent organic pollutants in lakes of Broknes peninsula at Larsemann Hills area, East Antarctica // *Ecotoxicology*. 2019. № 28. P. 589–596. doi: 10.1007/s10646-019-02045-x
23. *Asthana R., Shrivastava P.K., Srivastava H. B. Beg M.J., Kumar P.* Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica // *Advances in Polar Science*. 2013. V. 24. № 4. P. 281–295. doi: 10.3724/SP.J.1085.2013.00281
24. *Демидов Н.Э., Веркулич С.Р., Занина О.В., Караевская Е.С., Пушина З.В., Ривкина Е.М., Шмелев Д.Г.* Конечная морена и озерно-лагунные отложения в разрезе четвертичных отложений оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2013. Т. 97. № 3. С. 79–90.
25. *Liu X., Sun L., Xie Z. Yin X., Zhu R., Wang Y.* Preliminary record of the historical seabird population in the Larsemann Hills, East Antarctica, from geochemical analyses of Mochou Lake sediments // *Boreas*. 2007. V. 36. P. 182–197. doi: 10.1080/03009480600991789
26. *Попов С.В., Эберляйн Л.* Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // *Лед и снег*. 2014. № 4 (128). С. 95–106.
27. *Григорьева С.Д., Четверова А.А., Рыжова Е.В., Дешевых Г.А., Попов С.В.* Гидрологические и геофизические инженерные изыскания в районе станции Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) в сезон 64-й РАЭ // *Российские полярные исследования*. 2019. № 2. С. 23–28.
28. *Заключительный отчет XXXVII Консультативного совещания по договору об Антарктике. / Том II. Бразилиа, Бразилия. 28 апреля – 7 мая 2014 г. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора об Антарктике. 2014. 476 с.*
29. *Отчет о выполнении научных программ, технических заданий и логистических операций сезонной 57-й Российской антарктической экспедиции. Т. 2. Экспедиционные работы и натурные исследования по действующей федеральной программе в сезон 57-й РАЭ. Антарктида – Санкт-Петербург, ноябрь 2011 – июнь 2012. 2012. 425 с. // Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3804.*
30. *Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A.* An Atlas of the Lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. Kingston, Tas.: Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sport, the Environment, Tourism and Territories, 1990. 173 p.
31. *Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В.* Гидрологическая характеристика озер восточной части полуострова Брокнес, Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида // *Лед и снег*. 2019. Т. 59. № 1. С. 39–48. doi: 10.15356/2076-6739-2019-1-39-48
32. *Shevnina E., Kourzeneva E.* Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2017. V. 69. № 1. P. 1317202. doi: 10.1080/16000870.2017.1317202
33. *Филатов Н. Н., Георгиев А. П., Ефремова Т. В. Назарова Л. Е., Пальшин Н. И., Руховец Л. А., Толстиков А. В., Шаров А. Н.* Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата // *Доклады Академии наук*. 2012. Т. 444. № 5. С. 554–557.
34. *Shevnina E., Kourzeneva E., Dvornikov Y., Fedorova I.* Retention time of lakes in the Larsemann Hills oasis, East Antarctica // *The Cryosphere*. 2021. V. 15. № 6. P. 2667–2682. doi: 10.5194/tc-15-2667-2021
35. *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. 12. № 3. С. 56–67.
36. *Broknes peninsula, Larsemann Hills: environmental management map. URL: [https://data.aad.gov.au/aadc/mapcat/display\\_map.cfm?map\\_id=13135](https://data.aad.gov.au/aadc/mapcat/display_map.cfm?map_id=13135) (дата обращения: 17.06.2021).*

37. Алексеев В.Р., Волков Н.В., Втюрин Б.И., Втюрина Е.А., Гросвальд М.Г., Донченко Р.В., Дюнин А.К., Канаев Л.А., Котляков В.М., Кренке А.Н., Лосев К.С., Перов В.Ф., Цуриков В.Л. Гляциологический словарь / Под ред. Котлякова В.М. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.

38. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dălk Glacier, East Antarctica // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 427–432. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432

## REFERENCES

1. Sokratova I.N. Antarctic oases: history and meaning of the term. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*. Materials of glaciological researches. 2007, 103: 25–29. [In Russian].
2. *Nauchno-tekhnicheskii otchet ob issledovanii basseina ozera Figurnogo v oazise Bangera (Vostochnaia Antarktida)*. Scientific and technical report on the study of the Figurnoye lake basin in the Bunger oasis (East Antarctica). Leningrad. 1988: 120 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3032. [In Russian].
3. Sokratova I.N. *Antarkticheskie oazisy: Istoriia i rezul'taty issledovaniy*. Antarctic oases: History and results of the study. St. Petersburg: State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, 2010: 274 p. [In Russian].
4. *Nauchno-tekhnicheskii otchet 52-i RAE (sezonnii sostav)*. Scientific and technical report of the 52nd RAE (seasonal membership). V.I. Antarctica, November 2006 — May 2007. 2007: 237 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3640. [In Russian].
5. Simonov I.M. *Oazisy Vostochnoi Antarktidy*. Oases of East Antarctica. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971: 176 p. [In Russian].
6. Dugan H.A. *Geophysics, Water Balance, and History of Thick Perennial Ice Covers on Antarctic Lakes*. Chicago, Illinois, 2014: 109 p.
7. *Nauchno-tekhnicheskii otchet vypolneniia programm sezonnogo gidroekologicheskikh rabot na stantsii Progress v period sezona 57 RAE*. Scientific and technical report on the implementation of programs for seasonal hydroecological work at Progress station during the season of the 57th RAE. Antarctica, Larsemann Hills oasis, 2011–2012. 2012: 27 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3802. [In Russian].
8. Burgess J.S., Spatez A.P., Shevlin J. The onset of deglaciation in the Larsemann Hills, Eastern Antarctica. *Antarctic Science*. 1994, 6 (4): 491–495.
9. Stüwe K., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica. *Australian Journal of Earth Sciences*. 1989, 36: 219–241. doi: 10.1080/08120098908729483
10. Kiernan K., Gore D. B., Fink D., White D.A., McConnell A., Sigurdsson I.A. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica. *Antarctic Science*. 2009: 21 (4): 373–382. doi: 10.1017/S0954102009002028
11. Zong S., Ren L., Wu M. Grenville-age metamorphism in the Larsemann Hills: P-T evolution of the felsic orthogneiss in the Broknes Peninsula, East Antarctica. *International Geology Review*. 2020. 63 (7): 866–881. doi: 10.1080/00206814.2020.1734973
12. Abramov A.A., Sletten R.S., Rivkina E.M., Mironov V.A., Gilichinskii D.A. Geocryological conditions of Antarctica. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2011, 3 (15): 3–19. [In Russian].
13. *Otchet sezonnoi 61-i Rossiiskoi Antarkticheskoi Ekspeditsii. Report of the seasonal 61st Russian Antarctic Expedition*. T. 2. About the implementation of scientific programs. Antarctica. 2016: 492 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3932. [In Russian].
14. Abakumov E.V., Krylenkov V.A. *Pochvy Antarktidy*. Antarctica soils. *Priroda*. Nature. 2011, 3: 58–62. [In Russian].

15. Mergelov N.S. Soils of wet valleys in Larsemann Hills and Vestvoll oases (Princess Elisabeth Land, East Antarctic). *Pochvovedenie*. Soil Science. 2014, 9: 1027–1045. doi: 10.7868/S0032180X14090093. [In Russian].
16. *Otchet o vypolnenii programmy landshaftno-ekologicheskogo monitoring, raion stantsii «Progress», period 43 RAE (sezon)*. Report on the implementation of the program of landscape-ecological monitoring of the area of the Progress station, period of the 43rd RAE (season). St. Petersburg. 1998: 31 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № O-3310. [In Russian].
17. Sabbe K., Hodgson D. A., Verleyen E., Taton A., Wilmotte A., Vanhoutte K., Vyverman W. Salinity, depth and the structure and composition of microbial mats in continental Antarctic lakes. *Freshwater Biology*. 2004, 49: 296–319.
18. Burgess J.S., Spate A.P., Norman F.I. Environmental Impacts of Station Development in the Larsemann Hills, Princess Elisabeth Land, Antarctica. *Journal of Environmental Management*. 1992, 36: 287–299.
19. Gupta P. Biodiversity of Larsemann Hills, Antarctica. *Climate Change*. 2015, 1 (3): 174–183.
20. Nigamatzyanova G.R., Fedorova I.V. Assessment of the ecological state of the Larsemann Hills and the Shirmacher Oases lakes (East Antarctica). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia*. Advances in current natural sciences. 2015, 12: 140–144. [In Russian].
21. Sharov A.N., Tolstikov A.V. Ecological problems of the lakes of East Antarctica. *Regional'naia ekologiya*. Regional ecology. 2018, 53 (3): 5–14. doi: 10.30694/1026-5600-2018-3-5-14. [In Russian].
22. Bhardwaj L., Sharma S., Ranjan A., Jindal T. Persistent organic pollutants in lakes of Broknes peninsula at Larsemann Hills area, East Antarctica. *Ecotoxicology*. 2019, 28: 589–596. doi: 10.1007/s10646-019-02045-x
23. Asthana R., Shrivastava P. K., Srivastava H. B. Beg M. J., Kumar P. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica. *Advances in Polar Science*. 2013, 24 (4): 281–295. doi: 10.3724/SP.J.1085.2013.00281
24. Demidov N.E., Verkulich S.R., Zanina O.V., Karaevskaia E.S., Pushina Z.V., Rivkina E.M., Shmelev D.G. The end moraine and lacustrine-marine sediments in the cross-section of quaternary deposits of the Larsemann Hills, East Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2013, 97 (3): 79–90. [In Russian].
25. Liu X., Sun L., Xie Z., Yin X., Zhu R., Wang Y. Preliminary record of the historical seabird population in the Larsemann Hills, East Antarctica, from geochemical analyses of Mochou Lake sediments. *Boreas*. 2007, 36: 182–197. doi: 10.1080/03009480600991789
26. Popov S.V., Eberlein L. Investigation of snow-firn thickness and ground in the East Antarctica by means of geophysical radar. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 128 (4): 95–106. [In Russian].
27. Grigor'eva S.D., Chetverova A.A., Ryzhova E.V., Deshevykh G.A., Popov S.V. Hydrological and geophysical investigations at the area of the Progress Station (Larsemann Hills, East Antarctica) during the field season of the 64th RAE. *Rossiiskie poliarnye issledovaniia*. Russian Polar Research. 2019, 2: 23–28. [In Russian].
28. *Zakliuchitel'nyi otchet XXXVII Konsul'tativnogo soveshchaniia po dogovoru ob Antarktike*. Final Report of the Thirty-seventh Antarctic Treaty Consultative Meeting. V. 2. Brasilia, Brasil. 28 April – 7 May 2014. Buenos Aires: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2014: 476. [In Russian].
29. *Otchet o vypolnenii nauchnykh programm, tekhnicheskikh zadaniy i logicheskikh operatsii sezonnoi 57-i Rossiiskoi antarkticheskoi ekspeditsii. T. 2: Ekspeditsionnye raboty i naturnye issledovaniia po deistviuushchei federal'noi programme v sezon 57 RAE*. Report on the implementation of scientific programs, technical assignments and logistic operations of the seasonal 57th Russian Antarctic expedition. V. 2. Expeditionary work and field research under the current federal program during the season of the 57th RAE. Antarctica – St. Petersburg, November 2011 – June 2012. 2012: 425 p. Funds of FSBI «AARI». Inv. № № O-3804. [In Russian].

30. Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An Atlas of the Lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. Kingston, Tas.: Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sport, the Environment, Tourism and Territories, 1990: 173 p.
31. Boronina A.S., Popov S.V., Priakhina 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, 1 (59): 39–48. doi: 10.15356/2076-6739-2019-1-39-48. [In Russian].
32. Shevnina E., Kourzeneva E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2017, 69 (1): 1317202. doi: 10.1080/16000870.2017.1317202
33. Filatov N.N., Georgiev A.P., Efremova T.V., Nazarova L.E., Pal'shin N.I., Rukhovets L.A., Tolstikov A.V., Sharov A.N. Reaction of lakes of East Fennoscandia and East Antarctica to climate changes. *Doklady Akademii nauk*. Reports of Academy of Sciences. 2012, 5 (444): 554–557. [In Russian].
34. Shevnina E., Kourzeneva E., Dvornikov Y., Fedorova I. Retention time of lakes in the Larsemann Hills oasis, East Antarctica. *The Cryosphere*. 2021, 15 (6): 2667–2682. doi: 10.5194/tc-15-2667-2021
35. Popov S.V., Boronina A.S., Priakhina G.V., Grigor'eva S.D., Sukhanova A.A., Tiurin S.V. Breakthroughs of glacial and subglacial lakes at the Larsemann Hills (East Antarctica) in 2017–2018. *Georisk*. Georisk. 2018, 3 (12): 56–67. [In Russian].
36. Broknes peninsula, Larsemann Hills: environmental management map. Available at: [https://data.aad.gov.au/aadc/mapcat/display\\_map.cfm?map\\_id=13135](https://data.aad.gov.au/aadc/mapcat/display_map.cfm?map_id=13135) (accessed 17.06.2021).
37. Alekseev V.R., Volkov N.V., Vtiurin B.I., Vtiurina E.A., Grosval'd M.G., Donchenko R.V., Diunin A.K., Kanaev L.A., Kotliakov V.M., Krenke A.N., Losev K.S., Perov V.F., Tsurikov V.L. *Gliatsiologicheskii slovar'*. Dictionary of glaciology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
38. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 3 (57): 427–432. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432. [In Russian].