

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-469-488>

УДК 556



Водный баланс вскрывающихся озер оазиса Холмы Ларсеманн

М.Р. Кузнецова^{1✉}, Г.В. Пряхина², Е.С. Зелепукина³

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

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

³ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

✉ mrkuznecova@aari.ru

МРК, 0000-0002-6910-7530; ГВП, 0000-0003-3684-4638; ЕСЗ, 0000-0002-3492-3300

Аннотация. Статья посвящена количественной оценке элементов водного баланса озер антарктических оазисов. Расчеты баланса выполнены для 9 водоемов оазиса Холмы Ларсеманн за декабрь и за январь в сезоны 2019/20 и 2021/22 гг. Выявлены особенности структуры водного баланса для озер. В приходной части баланса сточных и бессточных озер преобладает талый приток, проточных озер — русловой приток. В расходной части баланса большинства озер преобладает русловой отток, для бессточных водоемов — испарение. Сопоставление полученных количественных соотношений элементов водного баланса с классификацией Б.Б. Богословского позволило отнести вскрывающиеся озера антарктических оазисов к испаряюще-приточному и стоково-приточному типам. При этом принадлежность озера к тому или иному типу в течение теплого периода года может изменяться, что обычно приурочено к прорывам. Выявленные особенности могут быть полезны при анализе уровенных наблюдений на озерах антарктических оазисов или выполнении гидрологических расчетов.

Ключевые слова: тип проточности, талый приток, испарение, озера Антарктиды

Для цитирования: Кузнецова М.Р., Пряхина Г.В., Зелепукина Е.С. Водный баланс вскрывающихся озер оазиса Холмы Ларсеманн. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):469–488. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-469-488>

Поступила 19.06.2025

После переработки 13.10.2025

Принята 21.10.2025

Water balance of lakes opening up from the ice in the Larsemann Hills

Mariia R. Kuznetsova^{1✉}, Galina V. Pryakhina², Elena S. Zelepukina³

¹ State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³ Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia

✉ mrkuznecova@aari.ru

MRK, 0000-0002-6910-7530; GVP, 0000-0003-3684-4638; ESZ, 0000-0002-3492-3300

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Abstract. The water balance method has not been widely used in the study of Antarctic oasis lakes, therefore the structure of their water balance is not determined to date. The paper is aimed at the quantitative estimation of water balance elements and identifying the features of the water balance structure for lakes with different types of level regime, using as an example 9 lakes of the Larsemann Hills. The raw data include field work materials of the Russian Antarctic Expedition, meteorological data from the Progress station and satellite images Landsat 8-9. The water balance calculations were carried out for December-January 2019/20 and 2021/22. The study quantitatively confirmed the predominance of meltwater inflow in the feeding of open and closed lakes, while in the incoming balance part of flowage lakes from 40 % to 70 % is occupied by channel inflow. Channel outflow predominates (more than 95 %) in the outcoming balance part of most open and flowage lakes, whereas for closed lakes evaporation from the water surface predominates. It has been established that changes in the water balance structure are caused by those in the flowage types of water bodies, which also lead to a change in the types/subtypes of the water level regime. Based on the identified quantitative relationships of water balance elements, seasonally ice-covered lakes were classified into two categories: evaporating-inflowing and runoff-inflowing lakes (according to the classification by B.B. Bogoslovskiy). The identified features of the water balance structure can be useful for the analysis of observed water level data or for hydrological calculations.

Keywords: flowage type, meltwater inflow, evaporation, Antarctic lakes

For citation: Kuznetsova M.R., Pryakhina G.V., Zelepukina E.S. Water balance of lakes opening up from the ice in the Larsemann Hills. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):469–488. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-469-488>

Received 19.06.2025

Revised 13.10.2025

Accepted 21.10.2025

Введение

Метод водного баланса является одним из классических подходов, используемых при изучении гидрологического режима водоемов, однако при изучении озер оазисов Антарктиды этот подход широкого распространения не получил. Сложность его применения в изучении озер антарктического региона во многом обусловлена дефицитом данных фактических измерений/наблюдений, необходимых для расчетов.

В ряде работ в общих чертах (без количественных оценок) обсуждаются связанные с водным балансом аспекты: в монографиях проанализированы условия питания и стока водоемов на примерах озер оазисов Бангера, Ширмахера, Молодежный [1–3], в статье [4] — основные источники поступлений и потерь воды озер оазиса Вестфолль; в работе [5] — связь поступлений/потерь воды с ходом уровня для малых бессточных озер оазиса Бангера; в научно-техническом отчете¹ — для озера Лоу (Холмы Ларсеманн). В литературе наиболее часто встречаются количественные оценки только одного элемента баланса: например, талого притока² [6, 7], руслового оттока [7], сублимации льда [8], испарения с поверхности озер [9]. Более полные водно-балансовые оценки редки: для озера Фигурное (оазис Бангера)³; для озера Унтер-Зее (оазис Унтер-Зее) [10], для озер Рейд, Скандретт, Прогресс, Степед и Лоу (Холмы Ларсеманн) [11, 12], для озера Зуб (оазис Ширмахера) [12, 13]. Детальные водно-балансовые исследования, включающие описание структуры баланса, выполнены только для озер долины Тейлор (Сухие долины Мак-Мердо) [8, 14, 15].

¹ Научно-технический отчет, т. 2: отчет о выполнении научных программ. Антарктика; 2016. 492 с. Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3932.

² Отчет по проекту 2.2.3.2 «Дать оценку строения, режима и эволюции ледников краевой зоны Антарктики и Субантарктики» направления 5 подпрограммы «Изучение и исследование Антарктиды» ФЦП «Мировой океан» Программа: Исследование абляции и жидкого ледникового стока Антарктики (ст. Новолазаревская). 51 РАЭ. Антарктида, Земля Королевы Мод, 2005–2006. 38 с. Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3594.

³ Научно-технический отчет об исследовании бассейна озера Фигурного в оазисе Бангера (Восточная Антарктида) (в 2 частях). Ленинград, 1988. 120 с. Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3032.

Таким образом, немногочисленные водно-балансовые расчеты для озер антарктических оазисов, представленные в литературе, относятся к разным объектам, районам, годам и, как правило, не содержат процентных соотношений элементов баланса (за исключением работы для озер Сухих долин [15]), хотя понимание структуры и ее особенностей полезно при анализе данных наблюдений, разработке гидрологических моделей, оценках водопотребления станциями и др.

Целью настоящей статьи является количественная оценка элементов водного баланса озер антарктических оазисов и выявление особенностей его структуры на примере водоемов оазиса Холмы Ларсеманн.

Материалы и методы

Район работ и объекты исследования.

Оазис Холмы Ларсеманн расположен в Восточной Антарктиде на берегу залива Прюдс моря Содружества. Это свободная от сплошного ледникового покрова холмистая территория (перепады высот до 100–120 м), представленная несколькими полуостровами и группой островов, где расположено порядка 150 водоемов, при-

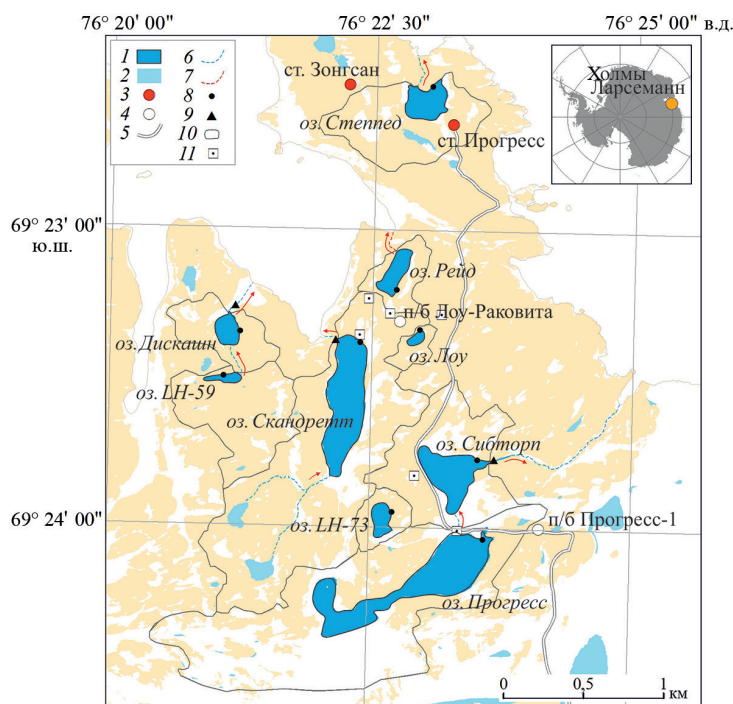


Рис. 1. Район работ.

1 — исследуемые озера; 2 — прочие озера; 3 — станции; 4 — полевые базы; 5 — трассы; 6 — ручьи, вытекающие из озер; 7 — фильтрация из озера Рейд; 8 — водомерные посты; 9 — створы измерения расходов воды; 10 — границы водосборов (по [17]); 11 — точки измерения плотности снега. На врезке — расположение оазиса Холмы Ларсеманн. Красными стрелками показано направление оттока озерных вод

Fig. 1. Study area.
1 — lakes studied; 2 — other lakes; 3 — polar station; 4 — field bases; 5 — roads; 6 — streams flowing from the lakes; 7 — filtration from Reid Lake; 8 — gauge station; 9 — points discharge measurements; 10 — boundaries of catchments (according to [17]); 11 — points of snow density measurements. In the inset — location of the Larsemann Hills. Direction of lake water outflow shown by the red arrows

уроченных к понижениям рельефа; температура воздуха в теплый период (декабрь–февраль) года составляет до +4 °С, зимой опускается до –18 °С, осадки (среднегогодовое значение 250 мм) выпадают преимущественно в твердом виде [16, 17].

В качестве объектов исследования были выбраны 9 озёр оазиса Холмы Ларсеманн (рис. 1), расположенных в восточной части п-ова Брокнес. Выбор конкретных водоемов обусловлен наличием необходимых для расчетов данных наблюдений. Эти водоемы различаются по своим морфометрическим характеристикам: наиболее крупные — Прогресс (средняя глубина 8,9 м, максимальная 42,5 м, площадь 203,6 тыс. м² [18]) и Скандретт (средняя глубина 9,4 м, максимальная 17,6 м, площадь 157,9 тыс. м² [19]); остальные озера (согласно публикациям [11, 16, 19] и собственным материалам) имеют средние глубины менее 3 м, максимальные — менее 5–8 м при площадях от 9 тыс. м² до 81 тыс. м². В теплый период года озера вскрываются полностью или частично, температура воды достигает до +4 и +7–8 °С; вода в озерах пресная, хотя некоторые относятся к солоноватым [11, 16]. В теплый период года из некоторых озёр формируется отток, могут образовываться каскады (например, озера LH-59 — Дискашн, Прогресс — Сибторп).

Материалы

Основными исходными данными стали материалы сезонных⁴ полевых работ Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в оазисе Холмы Ларсеманн в 2019/20 (65-я РАЭ) и 2021/22 гг. (67-я РАЭ). Материалы получены при личном участии М.Р. Кузнецовой. Основной объем гидрологических наблюдений в сезон 2019/20 г. выполнен 05.12.2019 — 05.03.2020, в сезон 2021/22 г. — в период 07.12.2021 — 18.02.2022. Измерения расходов проводились 10.12.2019 — 08.02.2020 и 20.12.2021 — 16.01.2022. В статье использованы данные, относящиеся к декабрю и январю каждого из сезонов (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика полевых данных

Table 1

Characteristics of field data

Тип данных	Количество измерений		Способ измерения, приборы
	Сезон 2019/20	Сезон 2021/22	
Уровень воды (см)	324	267	Отсчет по водомерной рейке ГР-104 на водомерных постах свайного типа
Температура воды (°С)	175	147	Измерения у водомерных постов мультимонитором Ultrapen (Myron Compay, США)
Площадь льда (% акватории)	132	93	Визуальные оценки наблюдателем
Расход воды (м ³ /с)	26	6	Промеры глубин — водомерная рейка ГР-104, измерение скоростей течения — поверхностные поплавки, реке — гидрометрическая вертушка ГР-21М; для ручья из оз. LH-59 — объемный способ определения расхода воды

⁴ Экспедиционные работы, которые длятся менее года.

Уровни воды измерялись на водомерных постах свайного типа. Расположение постов указано на рис. 1. Измерение уровня производилось водомерной рейкой ГР-104 посредством установки ее на сваю и снятия по рейке отсчета. Измерения (с точностью 0,5 см) производились 1 раз в сутки с интервалами 1–4 суток; выбранная дискретность измерений во многом связана с логистическими условиями (пересеченная местность, невозможность подъезда транспорта к каждому посту для экономии времени, необходимость выполнения иных работ).

К измерениям уровня были приурочены измерения *температуры воды и наблюдения за площадью льда* на озерах. Измерения температуры выполняли у водомерных постов в приповерхностном слое воды. Использован мультимонитор Ultrapen (Myron Compary, США), точность измерений 0,1 °С.

Площади льда на водоемах оценивали визуально, в процентах от всей площади акватории. Озера хорошо просматриваются с прилегающих холмов, через которые проходит маршрут наблюдателя между постами. Кроме того, последующее сопоставление результатов визуальных наблюдений в сезон 2019/20 г. с площадями, определенными по аэрофотоснимкам, значительных расхождений не выявило.

Расходы воды ручьев определяли по данным гидрометрических работ на водотоках. Промеры глубин производили с помощью водомерной рейки, вброд, предварительно натянув над выбранным для измерений створом размеченный трос; ширина водотоков составляла 0,5–3,0 м. Измерения скоростей течения из-за небольших (до 0,1–0,2 м) глубин производили преимущественно поверхностными поплавками, а на ручьях из озер Сибторп и Скандретт в сезон 2019/20 г. в нескольких случаях — гидрометрической вертушкой ГР-21М (измерения выполнялись на одном горизонте). Измерения расходов сравнительно немногочисленны. Отчасти это связано с тем, что при проведении экспедиционных исследований гидрометрические работы оказались скорее сопутствующим, нежели приоритетным видом работ. В ряде случаев возникали сложности, препятствующие выполнению измерений: так, водоток из озера Прогресс спустя несколько дней после прорыва обмелел до 1–2 см, так что выполнять измерения скорости течения стало невозможным. Водоток из озера Дискашн находился в прорывном канале со снежно-ледовыми стенками высотой 1,5–2 м и грунтовым дном; на безопасно доступном для посещения наблюдателем участке русло водотока меандрировало, уходя под нависающие снежно-ледовые стенки, поэтому выполнять измерения было невозможно. На ручье из озера LH-59, расположенном в завалуненном ущелье, оценить расход получилось объемным способом (по времени наполнения емкости), когда во второй половине января 2020 г. после стаивания снега стало возможным подобраться к пригодному для измерений участку; в сезон 2021/22 г. доступ в ущелье к этому месту был снова прегражден. Выполнить гидрометрические работы на участке оттока из озера Степпед не удалось из-за отсутствия выраженного русла вследствие антропогенного преобразования.

Для определения площадей снежников в сезон 2019/20 г. использовались *аэрофотоснимки*, выполненные с помощью беспилотного летательного аппарата самолетного типа сотрудниками 65-й РАЭ С.Д. Григорьевой и Э.Р. Киньябаевой. Разрешение снимков составляет 5 см/пикс. Даты, к которым были приурочены аэрофотосъемки (15.11.2019, 27–28.12.2020, 6–7.02.2020), были во многом обусловлены погодными условиями (выбраны ясные дни с хорошей видимостью), а также логистическими обстоятельствами. В сезон 2021/22 г. использовались *спутниковые*

снимки Landsat 8-9⁵, скачанные с платформы LandViewer. Были выбраны снимки, наиболее приближенные по датам к первым числам месяцев (01.12.2021, 02.01.2022, 04.02.2022), но при этом не перекрытые облаками, чтобы объекты и их водосборы были однозначно видны.

Измерения плотности снега выполнены в 6 точках, расположенных на водосборах различных озер Рейд, Скандретт, Сибторп, Лоу и Прогресс (см. рис. 1). Координаты определены спутниковым приемоиндикатором GARMIN-64; определение плотности выполнялось послойно, весовым методом [20]; точность взвешивания электронными весами составляла 0,01 г.

Метеорологические данные (количество осадков, парциальное давление водяного пара, скорость ветра, солнечная радиация, средняя суточная температура воздуха, общая и нижняя облачность) были взяты по станции Прогресс; данные были получены в фондах ФГБУ «ААНИИ».

Методы

Расчет баланса проводился по месяцам — за декабрь и за январь. В настоящей статье для вскрывающихся ото льда озер антарктического оазиса использовалось уравнение водного баланса в следующем виде:

$$P_{\text{акв}} + Q_{\text{т}}^{+} + Q_{\text{р}}^{+} - Q_{\text{р}}^{-} - E - Q_{\text{вх}}^{-} \pm n = \frac{\Delta W}{\Delta T}, \quad (1)$$

где $P_{\text{акв}}$ — осадки, выпадающие на акваторию, м³; $Q_{\text{т}}^{+}$ — суммарный приток талых вод (склоновый приток и подповерхностный приток), м³; $Q_{\text{р}}^{+}$ — русловой приток, м³; $Q_{\text{р}}^{-}$ — русловой отток, м³; E — испарение с водной поверхности, м³; $Q_{\text{вх}}^{-}$ — забор воды на водохозяйственные нужды, м³; n — невязка, м³; ΔW — изменения объема озера, м³; ΔT — расчетный период, месяц.

Объем осадков, выпадающих на свободную ото льда акваторию ($P_{\text{акв}}$):

$$P_{\text{акв}} = P \cdot F_{\text{акв}},$$

где P — слой осадков, мм; $F_{\text{акв}}$ — средняя за период площадь озера, свободная ото льда, м². Слой осадков взят по метеостанции Прогресс, свободная ото льда площадь определена по данным полевых наблюдений.

Величина талого притока ($Q_{\text{т}}^{+}$) оценена по формуле:

$$Q_{\text{т}}^{+} = F_{\text{сн}} \cdot h_{\text{в}},$$

где $F_{\text{сн}}$ — площадь снежников, средняя за расчетный период, м²; $h_{\text{в}}$ — слой водоотдачи за расчетный период, мм.

$F_{\text{сн}}$ определена как среднее арифметическое из величин площадей на начало и конец расчетного периода. Площади снежников на начало каждого месяца за сезон 2019/20 г. были определены по аэрофотоснимкам территории, за сезон 2021/22 г. — по спутниковым снимкам: снимки загружали в программу ArcGIS, где было выполнено визуальное дешифрирование, снежники оконтуривались вручную; использованные снимки не были перекрыты облаками, на местности отсутствует растительность, так что граница между светлым снегом и коричневыми скалами определялась однозначно — поэтому дополнительных действий по изменению качества снимков не выполнялось.

⁵ LandViewer. Сервис спутниковых снимков. URL: <https://oes.com/landviewer/> (дата доступа: 15.05.2025). Разрешение снимков: 30 м/пикс.

Слой водоотдачи h_v за расчетный период определен по следующей схеме: рассчитаны суточные слои таяния, затем пересчитаны в слои водоотдачи, затем просуммированы по месяцам.

Определение слоя таяния выполнялось по методу П.П. Кузьмина [21], формула в основе имеет уравнение теплового баланса:

$$h_c = 0,125[(Q' + q)_0 (1 - A)(1 - 0,20 N_0 - 0,47 N_n) - 1440 \varepsilon \sigma (T_n)^4 + 1440(0,62 + 0,05\sqrt{e_2})(1 + 0,12 N_0 + 0,12 N_n)(\varepsilon \sigma (T_a)^4)] + (a_c \gamma u_{10}),$$

где h_c — слой таяния, мм; $(Q' + q)_0$ — суточная сумма суммарной солнечной радиации при безоблачном небе, кал/см²; A — альbedo, доли от единицы; N_0 — общая облачность, доли от единицы; N_n — нижняя облачность, доли от единицы; ε — относительная поглощательная способность длинноволновой радиации деятельным слоем снега; σ — постоянная Стефана–Больцмана, $8,26 \cdot 10^{(-11)}$ кал/(см²·мин·град.); T_n — температура поверхности снега, К; T_a — температура воздуха, К; u_{10} — скорость ветра на высоте 10 м, м/с; e_2 — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м, мбар; a_c — коэффициент, мм/(сут·град·м·с); γ — коэффициент.

Суточная сумма суммарной солнечной радиации, величина общей и нижней облачности, температура воздуха, абсолютная влажность воздуха, скорость ветра взяты по данным метеостанции Прогресс.

Альbedo определено расчетным способом [22]:

$$A = A_0 + K \exp(-fr),$$

где A_0 — наименьшее возможное значение альbedo, доли от единицы; A_{\max} — наибольшее возможное значение альbedo, доли от единицы; f — номер дня с момента последнего снегопада; r — коэффициент рецессии; K — константа.

Наименьшее возможное значение альbedo принято равным для фирна 0,4, для снега 0,5; наибольшее возможное значение альbedo принято равным для фирна 0,5, для снега 0,85 [22]. Коэффициент рецессии $r = 0,04$ при $T_n < 0$ °C, $r = 0,08$ при $T_n > 0$ °C. Величина константы K определена по формуле:

$$K = A_{\max} - A_0.$$

Относительная поглощательная способность ε принята равной 0,96 для альbedo более 0,8 и равной 0,98 для альbedo менее 0,8 [23]. Температура поверхности снега определена по номограмме [21] с использованием значений температуры воздуха и величины облачности.

Коэффициент a_c определяется по формуле:

$$a_c = 0,878 \frac{1 + 0,547 u_{10}}{u_{10}}.$$

Коэффициент γ вычислялся по формуле:

$$\gamma = (t_2 - t_n) + 1,75 (e_2 - e_n),$$

где t_2 — температура воздуха на высоте 2 м, °C; t_n — температура поверхности снега, °C; e_2 — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м, мбар; e_n — максимальная упругость водяного пара у поверхности, мбар.

Температура воздуха и абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м взяты по метеостанции Прогресс. Температура испаряющей поверхности соответствует температуре поверхности снега, определенной по номограмме П.П. Кузьмина [21].

Максимальная упругость водяного пара у поверхности рассчитана по формуле Магнуса [24]:

$$e_{\text{н}} = E_0 10^{\left[\frac{a-t}{b+t} \right]}, \quad (2)$$

где E_0 — давление насыщенного пара при $t = 0$ °С, мбар; a , b — коэффициенты давления пара над льдом; t — температура испаряющей поверхности, °С. При этом $E_0 = 6,107$ мбар; $a = 9,5$; $b = 265,5$. К полученной величине $e_{\text{н}}$ введены поправки Э. Ольдекопа [24].

Слой водоотдачи $h_{\text{в}}$ определен по стандартной методике⁶:

$$h_{\text{в}} = h_{\text{вг}} - h_{\text{в}(g-1)} = [z_g - \gamma_g (1 - z_g)]x - [z_{g-1} - \gamma_{g-1} (1 - z_{g-1})]x, \\ h_{\text{в}} = 0 \text{ при } z_g \leq z_0,$$

где $h_{\text{в}}$ — величина водоотдачи за последующие сутки, мм; $h_{\text{в}(g-1)}$ — величина водоотдачи за предыдущие сутки, мм; x — запас воды в снеге на начало снеготаяния, мм; z_g — относительное стаяние снега за последующие сутки, мм; z_{g-1} — относительное стаяние снега за предыдущие сутки, мм; z_0 — относительная убыль снега, мм; γ_g — влагоемкость за последующие сутки; γ_{g-1} — влагоемкость за предыдущие сутки; g — номер суток.

Запас воды в снеге x на начало снеготаяния принят равным суммарному слою таяния за весь расчетный период. Относительное стаяние снега определялось по формуле:

$$z_g = \frac{\sum_1^g (h_c)}{x},$$

где h_c — суточный слой таяния, мм.

Влагоемкость определена по формуле:

$$\gamma_g = (\gamma_{\text{max}} - 0,06) \exp((-4)z_g) + 0,06,$$

где γ_{max} — максимальная влагоемкость, рассчитываемая следующим образом:

$$\gamma_{\text{max}} = \exp(-4\rho_{\text{сн}}) - 0,04,$$

где $\rho_{\text{сн}}$ — плотность снега на начало снеготаяния, $\text{м}^3/\text{с}$; по данным измерений равна 0,35.

$$z_0 = 0,34 \gamma_{\text{max}} + 0,059$$

Русловой приток ($Q_{\text{р}}^+$) определялся по формуле:

$$Q_{\text{р}}^+ = QT + Q_{\text{пав}}^-,$$

где Q — расход воды ручья, $\text{м}^3/\text{с}$; T — продолжительность расчетного периода, с; $Q_{\text{пав}}^-$ — объем прорывного паводка, м^3 .

Расходы воды известны по данным гидрометрических работ на водотоках. Объем паводка оценивался через изменение уровня воды озера:

$$Q_{\text{па}}^{\text{в-}} = (H_2 - H_1)(F_{\text{акв2}} + F_{\text{акв1}})0,5,$$

где H_1 — уровень воды до прорыва, м; H_2 — уровень воды после прорыва, м; $F_{\text{акв1}}$ — площадь озера до прорыва, м^2 ; $F_{\text{акв2}}$ — площадь озера после прорыва, м^2 .

⁶ Жидиков А. П., Нечаева Н. С. Методические указания по разработке схем краткосрочных прогнозов расходов воды рек и притока воды в водохранилища в период половодья на основе моделей талого стока (на примере бассейна р. Волги) / Под ред. канд. техн. наук В. А. Бельчикова. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 72 с.

Уровни воды озер до и после прорывов известны по данным измерений на водомерных постах. Площади озер при разных уровнях определялись следующим образом: по аэрофотоснимкам сезона 2019/20 г., имеющим высокое разрешение, были определены площади озер при соответствующих 27–28.12.2020 и 6–7.02.2020 уровнях воды (абсолютных высотных отметках водной поверхности), дополнительно использовались литературные материалы о соответствии площадей и отметок водной поверхности озер. По полученным данным (уровень воды — соответствующая ему площадь) путем интерполяции определялись площади при уровнях воды в другие даты и в сезон 2021/22 г.

Русловой отток (Q_p^-) определялся аналогично русловому притоку.

Объем испарения с водной поверхности (E) определен следующим образом:

$$E = 0,001 F_{\text{акв}} h_E,$$

где $F_{\text{акв}}$ — средняя за период площадь озера, свободная ото льда, м²; h_E — слой испарения с воды за расчетный период (1 месяц), мм.

Расчет слоя испарения выполнен по формуле ГГИ⁷:

$$h_E = 0,14(e_0 - e_2)(1 + 0,72u_2),$$

где e_0 — дефицит влажности у поверхности воды, мбар; e_2 — дефицит влажности воздуха, мбар; u_2 — скорость ветра на высоте 2 м, м/с.

Дефицит влажности воздуха у поверхности воды рассчитан по формуле Магнуса (2) при $a = 7,63$; $b = 241,9$, за температуру испаряющей поверхности была принята температура поверхности воды. Для каждого водоема использована средняя за расчетный период измеренная на водомерных постах температура воды.

Дефицит влажности воздуха на высоте 2 м и скорость ветра (также средние за месяц величины) взяты по данным метеостанции Прогресс. Скорость ветра стандартно измеряется на высоте 10 м (u_{10}), поэтому выполнен пересчет на высоту 2 м (u_2) [25]:

$$u_2 = u_{10} \left(\frac{2}{10} \right)^{0,2}.$$

Величина забора воды на водохозяйственные нужды ($Q_{\text{вх}}^-$) была оценена со слов сотрудников станции Прогресс: порядка 2,5 м³/сут в рабочие дни и 3,5 м³/сут в выходные.

Подстановка в уравнение (1) рассчитанных величин элементов баланса дает рассчитанную величину изменения объема воды в озере ($\Delta W_{\text{расч}}$):

$$\Delta W_{\text{расч}} = P_{\text{акв}} + Q_{\text{г}}^+ + Q_{\text{п}}^+ - Q_{\text{п}}^- - E - Q_{\text{вх}}^-.$$

Фактическое ($\Delta W_{\text{факт}}$) изменение объема озера за расчетный период определялось через измеренные уровни воды:

$$\Delta W_{\text{факт}} = (H_2 - H_1) \frac{(F_{\text{акв2}} + F_{\text{акв1}})}{2},$$

где H_1 — уровень воды на начало расчетного периода, м; H_2 — уровень воды на конец расчетного периода, м; $F_{\text{акв1}}$ — площадь водоема на начало расчетного периода, м²; $F_{\text{акв2}}$ — площадь водоема на конец расчетного периода, м².

⁷ Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. М-во энергетики и электрификации СССР. М-во мелиорации и водного хоз-ва СССР. Л.: Гидрометеиздат; 1969. 84 с.

Невязка (n , м^3), включающая погрешности рассчитанных и величины неучтенных элементов, характеризует погрешность расчета водного баланса [26]; она представляет собой разницу между расчетным ($\Delta W_{\text{расч}}$) изменением объема воды озера и фактическим ($\Delta W_{\text{факт}}$):

$$n = \Delta W_{\text{факт}} - \Delta W_{\text{расч}}.$$

Для возможности сопоставления величин невязок водного баланса озер, имеющих различные морфометрические характеристики, невязка была переведена из объемов в сантиметры ($d\text{УВ}$ в табл. 2); в качестве порогового значения принята величина $d\text{УВ}$, равная 10 см.

Определение структуры водного баланса выполнялось после количественной оценки величин каждого из элементов. При невозможности оценить по данным измерений величины руслового притока/оттока и фильтрации ($Q_{\text{ф}}$) они оценивались как остаточные элементы баланса. Определение структуры баланса заключалось в определении доли (%) каждого элемента в составе приходной и расходной частей баланса.

Полученные результаты сопоставлялись с опубликованными в литературе результатами водно-балансовых оценок для других озер оазисов, с характером точности озер, а также с классификацией озер Б.Б. Богословского [27] по типам водного баланса.

Результаты и обсуждение

Гидрометеорологические условия и режим озер

По данным метеостанции Прогресс и гидрологических наблюдений за декабрь–январь 2019/20 и 2021/22 гг. средняя суточная температура воздуха варьировала в интервале от -3 до $+4$ °С; средняя величина за расчетные периоды в 2019/20 г. $+0,7$ °С, в 2021/22 г. $+0,1$ °С. Средние суточные скорости ветра в 2019/20 г. изменялись в более широком диапазоне от 1 до 9,2 м/с, в 2021/22 г. — в диапазоне от 0,8 до 18,5 м/с. Количество осадков в летние периоды было невелико: 8,1 мм водного эквивалента (в. э.) в 2019/20 г. и 5 мм в 2021/22 г. Суммы осадков за предшествующий период года (март–ноябрь) составили 159 и 298 мм в. э. соответственно.

Площади снежников на водосборах озер в оба сезона сопоставимы: сумма средних площадей снежников (без учета водосбора озера Прогресс, включающего участок ледника) за декабрь в 2019 г. составила порядка 1056 тыс. м^2 , а в 2021 г. — 1089 тыс. м^2 ; в январе 2020 г. величина составляла 616 тыс. м^2 , а в январе 2022 г. — 642 тыс. м^2 .

В оба сезона озера начинали вскрываться ото льда в начале декабря с формирования закраин вдоль берегов; полностью озера очищались ото льда к началу-середине января. На водоемах, где присутствовали участки многолетнего льда (табл. 2), сокращение площадей льда продолжалось и в феврале. Средние за месяцы величины температуры воды варьируются от $+2$ до $+9$ °С.

Ход уровней воды озер различался, во многом коррелируя с характером точности (см. табл. 2). Для озер Лоу, ЛН-73 и Рейд оба сезона был характерен рост уровня воды в пределах первых 15–20 см; водоемы не имели руслового оттока, для озера Рейд в январе 2020 г. было зафиксировано высачивание воды через грунтовый борт котловины. Уровень воды озер Скандретт и Степпед колебался в пределах первых сантиметров, что обеспечивалось наличием незатрудненного поверхностного оттока. Озера ЛН-59 и Дискашн представляют собой каскад прорывных озер, под-

Таблица 2

Характеристики исследуемых озер

Table 2

Characteristics of the lakes studied

Озеро	Площадь многолетнего льда*, тыс. м ²	Наличие и краткая характеристика руслового притока/оттока	
		2019/20 г.	2021/22 г.
Лоу	0	Нет / Нет	Нет / Нет
Рейд	0	Нет / Да (фильтрация с января 2020 г., в океан)	Нет / Нет
ЛН-73	0	Нет / Нет	Нет / Нет
Сибторп	12,3	Да (из оз. Прогресс с 06.01.2020) / Да (в океан)	Нет / Да (с 13.01.2022, в океан)
Степед	0	Нет / Да (в океан)	Нет / Да (в океан)
ЛН-59	0	Нет /	Нет /
Дискашн	0	Да (с 19.12.2019, в оз. Дискашн) Да (с 19.12.2019, из оз. ЛН-59) / Да (с 19.12.2019, в океан)	Да (с 22.12.2021, в оз. Дискашн) Да (с 22.12.2021, из оз. ЛН-59) / Да (с 26.12.2021, в океан)
Прогресс	71,0	Нет / Да (с 06.01.2019, в оз. Сибторп)	Нет / Нет
Скандретт	55,2	Да / Да (в океан)	Да / Да (в океан)

Примечание. * — по аэрофотоснимкам за 06–07.02.2020.

Note. * — based on aerial photographs taken on 06–07.02.2020.

пруженных естественными плотинами-снежниками; в оба рассматриваемых сезона первым прорывалось озеро ЛН-59, затем — озеро Дискашн; амплитуды падений уровня в результате сброса вод при прорывах достигали от 29 до 86 см. Озеро Прогресс в сезон 2019/20 г. прорвалось (снижение уровня на 39 см), сброшенные воды поступили в расположенное ниже и на тот момент сточное озеро Сибторп, вызвав кратковременный подъем уровня в последнем. В сезон 2021/22 г. озеро Прогресс оставалось бессточным, но был зафиксирован собственный прорыв озера Сибторп (падение уровня на 44 см).

Особенности гидрологического режима озер обуславливают состав элементов баланса. Все рассматриваемые озера вскрываются ото льда, что обеспечивает наличие в балансе испарения с водной поверхности и выпадающих на акваторию осадков. Различный характер проточности определяет некоторые различия в составе элементов баланса: отток является обязательным элементом баланса для сточных или проточных озер, из которых происходит истечение воды, но отсутствует в случае бессточного водоема; русловой приток входит в баланс озер, только если в них поступает приток из других водоемов. Поэтому при анализе результатов было рассмотрено влияние характера проточности на структуру баланса озер (процентные соотношения элементов приходной и расходной частей).

Результаты водно-балансовых расчетов

Всего для 9 озер за два летних периода было получено 36 результатов расчета водного баланса (табл. 3). Примерно половина результатов характеризуется низкими величинами невязки, которые при пересчете в уровни воды составляют менее 10 см. Для озер Лоу, Рейд, ЛН-73 и Сибторп величины невязок в целом невелики, при пере-

Таблица 3
Примеры результатов количественных оценок водного баланса озер оазиса Холмы Ларсеманн за месяцы

Table 3
Examples of the results of quantitative water balance assessments of lakes in the Larsemann Hills oasis by month

Озеро	Летний период	Месяц	$P_{\text{авг}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$E, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$\Delta W_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$\Delta W_{\text{факт}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$n, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$dUB, \text{ см}$	Причина большой ($dUB > 10 \text{ см}$) невязки
Люу	2019/20	ХП	0,01	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6	0,6	0,0	0	—
		I	0,03	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	−0,4	0,5	0,8	9	—
		ХП	0,01	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,7	1,2	0,5	6	—
Рейд	2019/20	I	0,01	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	−0,6	0,0	0,6	6	—
		ХП	0,08	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	2,0	2,4	0,4	1	—
		I	0,12	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	−0,3	0,7	1,7	3	—
ЛН-73	2021/22	ХП	0,05	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	4,7	7,1	2,3	7	—
		I	0,04	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	−2,3	0,7	3,0	8	—
		ХП	0,01	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,1	2,8	0,8	3	—
Сибторп	2021/22	I	0,08	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,9	4,6	3,7	12	Занижен талый приток
		ХП	0,02	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,5	3,3	−1,2	−4	—
		I	0,03	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	3,0	3,0	10	—
Степпед	2019/20	ХП	0,12	56,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	5,3	4,7	−0,6	−1	—
		I	0,17	74,5	241,2	0,0	0,0	309,3	4,5	2,1	1,3	−0,7	−1	—
		ХП	0,10	36,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	33,7	13,1	−20,6	−23	Завышен талый приток
Степпед	2019/20	I	0,07	23,0	0,0	0,0	0,0	59,0	6,5	−42,4	−35,8	6,6	7	—
		ХП	0,11	15,7	0,0	0,1	0,0	0,0	1,4	14,3	2,2	−12,0	−27	Не учтен русловой отток
		I	0,15	12,2	0,0	0,1	0,0	0,0	4,0	8,2	−0,1	−8,3	−19	Не учтен русловой отток
Степпед	2021/22	ХП	0,12	18,0	0,0	0,1	0,0	0,0	3,5	14,6	7,1	−7,5	−17	Не учтен русловой отток
		I	0,04	7,8	0,0	0,1	0,0	0,0	4,5	3,3	0,0	−3,3	−7	—

LN-59	2019/20	XII	0,02	12,3	0,0	0,0	9,9	0,2	2,3	-0,9	-3,1	-33	Занижен русловой отток
	2021/22	I	0,03	12,2	0,0	0,0	11,3	0,7	0,2	-0,1	-0,3	-3	–
		XII	0,02	12,3	0,0	0,0	0,0	0,3	12,0	-1,9	-13,9	-148	Не учтен русловой отток
		I	0,01	5,3	0,0	0,0	0,0	1,1	4,3	-0,1	-4,4	-46	Не учтен русловой отток
Дискаши	2019/20	XII	0,03	10,7	9,9	0,0	18,8	0,4	1,4	0,6	-0,8	-5	–
	2021/22	I	0,08	15,3	11,3	0,0	26,8	1,9	-2,1	0,2	2,3	15	Не учтены русловой приток, русловой отток
		XII	0,03	10,0	0,0	0,0	24,6	0,6	-15,1	1,0	16,1	106	
		I	0,02	5,3	0,0	0,0	24,1	1,6	-20,3	-0,2	20,2	132	
Прогресс	2019/20	XII	0,05	106,4	0,0	0,0	0,0	0,6	105,8	68,4	-37,4	-18	Завышен талый приток
	2021/22	I	0,28	215,4	0,0	0,0	241,2	6,4	-31,9	-54,0	-22,1	-11	Завышен талый приток
		XII	0,04	116,3	0,0	0,0	0,0	0,6	115,7	27,9	-87,8	-43	Завышен талый приток
		I	0,07	90,4	0,0	0,0	0,0	6,3	84,1	58,8	-25,3	-12	Завышен талый приток
Скандретт	2019/20	XII	0,01	54,8	0,0	0,0	53,6	0,2	1,0	4,1	3,1	2	–
	2021/22	I	0,31	73,3	0,0	0,0	157,2	5,4	-89,1	-1,7	87,4	55	Занижен талый приток
		XII	0,04	58,7	0,0	0,0	83,0	0,8	-25,1	4,7	29,8	19	Занижен талый приток
		I	0,04	33,1	0,0	0,0	72,3	3,4	-42,7	-1,6	41,1	26	Занижен талый приток

счете в уровни воды они составляют первые сантиметры. Однако для озера Сибторп в декабре 2021 г. невязка составляет 20,6 тыс. м³ (или 23 см), что может объясняться завышением талого притока. Большие невязки водного баланса озёр Степед, ЛН-59, Дискашн объясняются недоучтенным русловым оттоком/притоком из-за недостатка данных полевых измерений. Как уже было указано выше, на вытекающем из озера Степед ручье гидрометрические работы не проводились, а определения расходов воды на ручьях озёр Дискашн и ЛН-59 были единичными, что дало значительную погрешность при оценке величин руслового стока. При оценке элементов водного баланса озера Прогресс оказалась завышенной величина талого притока: водосборная территория этого озера включает участок ледника (см. рис. 1), в пределах которого граница водосбора сложно определяема. Большие величины невязок водного баланса озера Скандретт с равной вероятностью могут быть вызваны как занижением величины талого притока, так и завышением величины руслового оттока. Отметим, что и в других работах, содержащих примеры расчета водного баланса озёр оазисов [например, 11–13] величины невязок тоже нередко оказывались значительными, в том числе из-за недостатка тех или иных входных данных.

Результаты оценки структуры водного баланса

Полученные для озёр оазиса Холмы Ларсеманн процентные соотношения элементов приходной и элементов расходной частей водного баланса отражают его структуру. Анализ показал, что водоемы с одинаковой структурой водного баланса относятся к одинаковым типам проточности. Результаты расчетов для озёр с одинаковыми типами проточности были осреднены; это позволило выявить структуру водного баланса, характерную для каждого типа проточности (табл. 4).

В структуре баланса *бессточных озёр* более 95 % приходной части составляет талый приток, расходная часть включает только испарение с водной поверхности.

В приходной части баланса *сточных озёр* преобладает талый приток (более 95 %). Соотношение элементов расходной части баланса может различаться: для постоянно сточных озёр с поверхностным оттоком и периодически сточных прорывающихся водоемов преобладает русловый отток (более 95 %); для периодически сточных водоемов, когда отток осуществляется путем фильтрации через грунт, основным элементом (более 80 %) расходной части является испарение.

Приходная часть баланса *проточных озёр* различается в зависимости от характера проточности: для постоянно проточных озёр и для периодически проточных прорывных озёр примерно равные доли составляют талый и русловый приток (40–60 %); для периодически проточных водоемов, через которые проходит прорывной паводок, будет явно преобладать русловый приток (около 75 %), тогда как доля талого притока составляет порядка 25 %. В расходной части баланса проточных озёр во всех случаях преобладает русловый отток (более 95 %).

Наименьшие доли (первые проценты) в структуре водного баланса вскрывающихся ото льда антарктических озёр, независимо от характера проточности, составляют выпадающие на акваторию осадки и вода, изымаемая на нужды станции.

Полученные выводы о структуре водного баланса не противоречат результатам водно-балансовых оценок, полученных другими авторами. Структура баланса озёр Лоу, Скандретт и Степед в 2019/20 и 2021/22 гг. соответствует структуре за январь–февраль 2014 г. [11]: в балансе бессточного озера Лоу в приходной части преобладает талый приток, в расходной — испарение с водной поверхности; в структуре баланса

Таблица 4

Table 4

Структура водного баланса озер различных типов проточности

Water balance structure of lakes with different flowage types

Характер проточности	Тип водного баланса*	Приходная часть, (W ⁺), %					Расходная часть, (W ⁻), %					Примеры озер для различных периодов			
		P _{ав}	Q _г ⁺	Q _{рус} ⁺	Q _ф ⁻	Q _{ак} ⁻	Q _{рус} ⁻	E	2019/20		I	2021/22		XII	I
									XII	Лой, ЛН-73, Рейд, Прогресс	Лой, ЛН-73	Лой, ЛН-73, Рейд, Прогресс, Сибторп	ЛН-73, Рейд, Прогресс	Сибторп	ЛН-73, Рейд, Прогресс
Бессточные	И-П-1 ¹	2,0	98,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0							
Сточные, постоянно	С-П-1 ²	0,2	99,8	0,0	0,0	0,0	91,0	9,0		Сибторп	ЛН-59	—	ЛН-59		
	С-П-2 ³	1,0	99,0	0,0	0,0	1,0	66,0	33,0		Степед	Степед	Степед	Степед		
Сточные, периодически	С-П-1	0,2	99,8	0,0	0,0	0,0	96,0	4,0		ЛН-59	Прогресс	ЛН-59	Сибторп		
	И-П-1	4,0	96,0	0,0	18,0	0,0	0,0	82,0		—	Рейд	—	—		
Проточные, постоянно	С-П-1	0,1	60,4	39,5	0,0	0,0	95,0	5,0		Скандретг	Скандретг, Дискашн	Скандретг	Скандретг, Дискашн		
	С-П-1	0,1	43,4	56,5	0,0	0,0	98,0	2,0		Дискашн	—	Дискашн	—		
Проточные, периодически	С-П-1	0,1	23,6	76,3	0,0	0,0	99,0	1,0		—	Сибторп	—	—		

Примечание. * — тип водного баланса по Б.Б. Богословскому [27]; ¹ — И-П-1 испаряюще-приточный 1-го подтипа; ² — С-П-1 стоково-приточный 1-го подтипа; ³ — С-П-2 стоково-приточный 2-го подтипа.
Note. * — type of water balance according to B.B. Bogoslovsky [27]; ¹ — И-П-1 evaporative-supply 1st subtype; ² — С-П-1 1st sub-type flow-out flow-in; ³ — С-П-2 2nd sub-type flow-out.

постоянно проточного озера Скандретт и постоянно сточного Степпед основным положительным элементом баланса является приток талых вод, а отрицательным элементом — русловой отток. Структура водного баланса постоянно проточных водоемов подтверждается на примере озера Зуб (оазис Ширмахера) в январе–феврале 2018 г. [13]. Для постоянно сточного в январе–апреле 1988 г. озера Фигурное (оазис Бангера) структура баланса иная⁸: в расходной части преобладает испарение с водной поверхности вместо руслового оттока, что, на наш взгляд, может быть связано с завышением объемов испарения или снижением руслового оттока в осенний период.

Сопоставление структуры баланса бессточных озёр оазиса Холмы Ларсеманн со структурой баланса бессточных озёр Сухих долин [15] и озера Унтер-Зее [10] выявило отличие как по составу элементов баланса, так и по структуре, вызванное особым ледовым режимом: эти водоемы полностью перекрыты многолетним льдом и не вскрываются даже в теплый период года, поэтому для не вскрывающихся озёр основным расходным элементом является сублимация с поверхности озерного льда.

Анализ структуры водного баланса, выявление преобладающих элементов в расходной части (испарения с водной поверхности и руслового оттока) и в приходной части (приток с водосбора и выпадающих на акваторию осадков) позволило определить положение антарктических водоемов в универсальной классификации озёр Б.Б. Богословского [27]: вскрывающиеся ото льда озера относятся к *испаряюще-проточному* и к *стоково-проточному* типам (см. табл. 4). Более детальный анализ процентных соотношений элементов приходной и расходной части водного баланса вскрывающихся ото льда озёр Холмов Ларсеманн показал, что бессточные водоемы относятся к *испаряюще-проточным 1-го подтипа* (приток более 75 %, испарение более 75 %), проточные водоемы — к *стоково-проточным 1-го подтипа* (приток более 75 %, отток более 75 %); большинство рассмотренных сточных озёр относятся к *стоково-проточным 1-го подтипа*, в отдельных случаях — или к *стоково-проточным 2-го подтипа* (приток более 75 %, отток 50–75 %), или к *испаряюще-проточным 1-го подтипа*.

Так как единственным расходным элементом водного баланса озёр, не вскрывающихся ото льда, является сублимация со льда, что не предусмотрено в классификации Б.Б. Богословского, то, возможно, их следовало бы отнести в отдельный тип, например *сублимационный*.

Структура баланса одного и того же озера может значительно отличаться в разные годы, кроме того, может изменяться и внутри одного теплого периода. Так, за рассматриваемые сезоны неизменной оставалась структура баланса лишь 4 из 9 озёр (Лоу, ЛН-73, Степпед, Скандретт). Изменения в структуре баланса озера Рейд в январе 2020 г. были вызваны формированием фильтрационного оттока, что достоверно известно по данным полевых наблюдений.

В остальных случаях причинами были прорывы водоемов (каскады озёр ЛН-59 — Дискашн и Прогресс — Сибторп). Ярким примером является озеро Сибторп (рис. 2). Например, в сезон 2019/20 г. в декабре в приходной части баланса преобладал талый приток, а в январе — русловой приток, в расходной части баланса изменений не происходило (круговые диаграммы на рис. 2а). В декабре 2019 г.

⁸ Научно-технический отчет об исследовании бассейна озера Фигурного в оазисе Бангера (Восточная Антарктида) (в 2-х частях). Ленинград; 1988. 120 с. Госфонд ФГБУ «АНИИ». Инв. № О-3032.

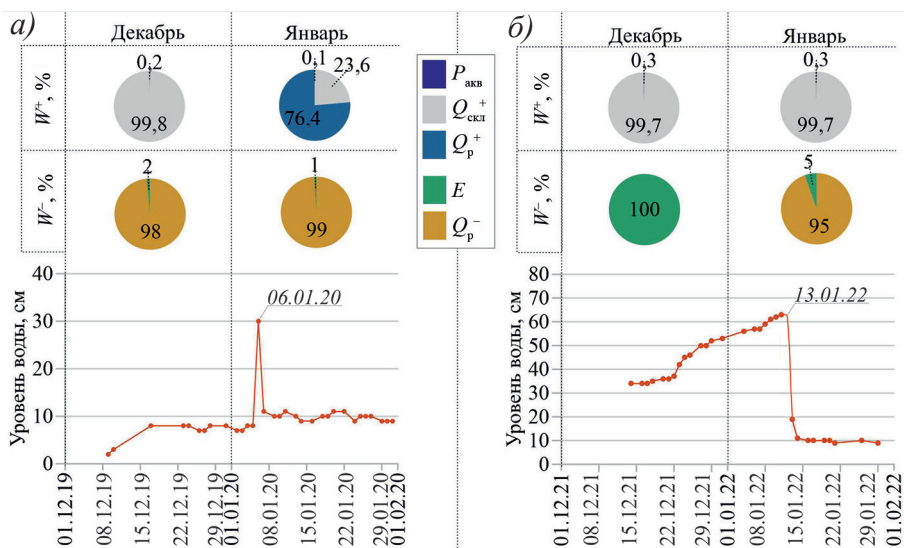


Рис. 2. Структура водного баланса и ход уровня воды озера Сибторп: а — 2019/20 г., б — 2021/22 г.

Круговые диаграммы отображают соотношения элементов приходной (W^+) и расходной (W^-) частей баланса по месяцам

Fig. 2. Water balance structure and water level changes of Lake Sibthorpe: а — 2019/20, б — 2021/22.

The pie charts show the ratio of elements of incoming (W^+) and outgoing (W^-) water balance parts by month

озеро Сибторп было сточным (отток воды не был затруднен), при этом русловой приток из расположенного выше озера Прогресс отсутствовал, т. к. путь перетока был перекрыт снежником. Прорыв озера Прогресс произошел 6.01.2020, при этом сброшенный объем воды поступил в озеро Сибторп, вызвав кратковременный подъем уровня (прохождение прорывного паводка), по сформировавшемуся прорывному каналу постоянно стал поступать русловой приток.

В сезон 2021/22 г. ситуация была иная: в приходной части баланса оба месяца преобладал талый (склоновый) приток, но потери воды в декабре полностью осуществлялись путем испарения с воды, а в январе на 95 % — путем руслового оттока (круговые диаграммы на рис. 2б). Это обусловлено следующим: в декабре озеро было бессточным — отток воды был перекрыт сформировавшейся за зиму плотиной-снежником, приток из озера Прогресс отсутствовал. Собственный прорыв озера произошел лишь 13.01.2022, озеро Сибторп стало сточным, на графике хода уровня прорыв отразился как резкое амплитудное снижение уровня.

Закключение

Выполненные количественные оценки для 9 вскрывающихся озер оазиса Холмы Ларсеманн за декабрь–январь 2019/20 и 2021/22 гг. дополняют немногочисленные сведения о водном балансе озер антарктических оазисов. Невязки балансов озер Лоу, Рейд, ЛН-73 и Сибторп в основном невелики; в остальных случаях отмечался недоучет руслового притока/оттока, вызванный ограниченным объемом данных гидрометрических работ.

Тем не менее полученные данные позволили определить и количественно подтвердить структуру водного баланса, а также показать ее связь с характером проточности. В приходной части баланса бессточных и сточных озёр (более 95 %) преобладает талый (склоновый) приток, тогда как в приходной части баланса проточных водоемов значительную долю занимает также русловой приток (40–75 %). В расходной части баланса большинства сточных и проточных озёр преобладает русловой отток (от 66 до 90 % и более), а единственным элементом расходной части баланса бессточных озёр является испарение с водной поверхности. Сопоставление структуры баланса с классификацией Б.Б. Богословского показало ее применимость для вскрывающихся ото льда антарктических озёр (относятся к испаряюще-приточному и стоково-приточному типам).

Выявленные особенности структуры баланса могут быть полезны при анализе данных уровенных наблюдений или выполнении гидрологических расчетов. Характерной особенностью озёр оазисов является смена принадлежности к тому или иному типу в течение теплого периода года из-за изменений структуры водного баланса, обычно приуроченных к прорывам. Для возможности учета подобных изменений необходимо уменьшать расчетный шаг — вплоть до суточного — ввиду скоротечности прорывов. Водно-балансовые расчеты требуют обширного комплекса полевых данных, поэтому при планировании аналогичных исследований следует обратить внимание на организацию полевых работ, в т. ч. — работ на водотоках, учитывая и природные особенности последних. Иным направлением может стать развитие теоретических (расчетных) методов определения величин элементов баланса.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Полевые работы выполнены за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания по проведению 65-й и 67-й Российской антарктической экспедиции.

Благодарности. Авторы благодарят Российскую антарктическую экспедицию за возможность участия в полевых работах, а также своих коллег С.Д. Григорьеву и Э.Р. Киньябаеву за помощь в проведении полевых работ.

Вклад авторов. Все авторы участвовали в написании и обсуждении текста статьи; М.Р. Кузнецова также участвовала в сезонных полевых работах 65-й и 67-й РАЭ.

Competing interests. Authors have not conflict of interest.

Funding. The field work was carried out with funding from the subsidy for the financial support of the state assignment to conduct the work on the 65th and 67th Russian Antarctic Expedition.

Acknowledgments. The authors are grateful to the Russian Antarctic expedition for the opportunity to participate in field work, and also to colleagues, particularly to S.D. Grigorieva and E.R. Kiniabaeva, for assistance in the fieldwork.

Authors contribution. All the authors participated in writing and discussing the manuscript, M.R. Kuznetsova also participated in the seasonal fieldwork during the 65th and 67th RAE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Симонов И.М. *Оазисы Восточной Антарктиды*. Л.: Гидрометеиздат; 1971. 176 с.
2. Короткевич Е.С. *Полярные пустыни*. Л.: Гидрометеиздат; 1972. 420 с.
3. Александров М.В. *Ландшафтная структура и картирование оазисов Земли Эндерби*. Л.: Гидрометеиздат; 1985. 152 с.
4. Gibson J.A.E. The meromictic lakes and stratified marine basins of the Vestfold Hills, East Antarctica. *Antarctic Science*. 1999;11(2):175–192. <https://doi.org/10.1017/S0954102099000243>

5. Клоков В.Д., Веркулич С.Р. Особенности гидрологического режима водоемов оазиса Бангера. *Информационный бюллетень Российской антарктической экспедиции*. 1994;118:60–68.
6. Федорова И.В., Анисимов М.А., Саватюгин Л.М., Азарова Н.С. Изменение гидрографической сети оазиса Ширмахера (Восточная Антарктида) в условиях дегляциации. *Лед и снег*. 2010;111(3):63–69.
Fedorova I.V., Anisimov M.A., Savatyugin L.M., Azarova N.S. Changes in the hydrographic network of the Schirmacher oasis (East Antarctica) under deglaciation. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2010;111(3):63–69. (In Russ.).
7. Шаров А.Н., Толстиков А.В. Экологические проблемы озер Восточной Антарктиды. *Региональная экология*. 2018;53(3):5–14. <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-3-5-14>
Sharov A.N., Tolstikov A.V. Ecological problems of the lakes of East Antarctica. *Regionalnaya Ecologia*. 2018;53(3):5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-3-5-14>
8. Dugan H.A. *Geophysics, Water Balance, and History of Thick Perennial Ice Covers on Antarctic Lakes*. Chicago: University of Illinois at Chicago; 2014. 109 p.
9. Shevnina E., Vihma T., Potes M., Naakka T. Summertime evaporation over two lakes in the Schirmacher oasis, East Antarctica. *EGUsphere [preprint]*. 2025. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1964>
10. Faucher B., Lacelle D., Marsh N.B., Jasperse L., Clark I.D., Andersen D.T. Glacial lake outburst floods enhance benthic microbial productivity in perennially ice-covered Lake Untersee (East Antarctica). *Communications Earth & Environment*. 2021;211(2):12. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00280-x>
11. 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):1–24. <https://doi.org/10.1080/16000870.2017.1317202>
12. Shevnina E., Kourzeneva E., Nuruzzama M. Water balance and thermal regime of lakes in Antarctic oases. In: Kanao M., Toyokuni G., Yamamoto M. yuki (eds.). *Antarctica a key to global change*. IntechOpen; 2018. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75265> (accessed 20.08 2025).
13. Dhote P.R., Thakur P.K., Shevnina E., Kaushik S., Verma A., Ray Y., Aggarwal S.P. Meteorological parameters and water balance components of Priyadarshini Lake at the Schirmacher Oasis, East Antarctica. *Polar Science*. 2021;100763(30):1–10. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100763>
14. Matsumoto G.I. Environmental geochemical and biological features of Antarctic oases. *Memoirs of National Institute of Polar Research. Special Issue*. 1998;52:230–250.
15. Cross J.M., Fountain A.G., Hoffman M.J., Obryk M.K. Physical controls on the hydrology of perennially ice-covered lakes, Taylor Valley, Antarctica (1996–2013). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2022;127:1–20. <https://doi.org/10.1029/2022JF006833>
16. Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. *An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. ANARE Research Notes 74*. Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sport, the Environment, Tourism and Territories: Kingston, Tasmania; 1990. 173 p.
17. Кузнецова М.Р., Прякина Г.В., Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р. Факторы формирования поверхностного притока к озерам антарктического оазиса Холмы Ларсеманн. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021;67(3):293–309. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>
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 Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>.

18. Grigoreva S.D., Kuznetsova M.R., Kiniabaeva E.R. New data on Progress Lake (Larsemann Hills, East Antarctica): Recently discovered subglacial part of the basin. *Polar Science*. 2023;100925(38):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2023.100925>
19. Пряхина Г.В., Боронина А.С., Попов С.В., Четверова А.А. Гидрологические исследования прорывных озёр антарктических оазисов. *Метеорология и гидрология*. 2020;2:94–102.
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;45(2):118–123.
20. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В., Жируев С.П. Литолого-стратиграфические комплексы снежного покрова. *Криосфера Земли*. 2018;22(1):72–93. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1\(72-93\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1(72-93))
Kazakov N.A., Gensiorovskii Yu.V., Zhiruev S.P. Snow lithostratigraphic complexes. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2018;22(1):72–93. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1\(72-93\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1(72-93))
21. Кузьмин П.П. *Процессы стаивания снежного покрова*. Л.: Гидрометеониздат; 1961. 345 с.
22. Rohrer M.B., Braun L.N. Long-term records of snow cover water equivalent in the Swiss Alps. *Nordic Hydrology*. 1994;25:65–78.
23. Красе М.С., Мерзликин В.Г. *Радиационная теплофизика снега и льда*. Л.: Гидрометеониздат; 1990. 264 с.
24. Хромов С. П., Петросянц М. А. *Метеорология и климатология*. М.: Изд-во МГУ; 2006. 582 с.
25. Заварина М.В. *Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы*. Л.: Гидрометеониздат; 1971. 162 с.
26. Георгиевский В.Ю. (ред.) *Водный баланс озера Ханка и его изменения под влиянием природных и антропогенных факторов*. СПб.: Государственный гидрологический институт; 2022. 272 с.
27. Богословский Б.Б. *Озероведение*. М.: Изд-во МГУ; 1960. 332 с.