

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-46-70>

УДК 556.55



Адаптация озёр полуострова Файлдс (о. Кинг Джордж, Восточная Антарктида)

к климатическим изменениям и антропогенному воздействию

И.В. Фёдорова¹✉*, Е.С. Чернова¹, С.Ю. Евграфова², В.К. Кадуцкий²,
А.С. Прокушкин², И.Е. Сидорина¹

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

² Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр
«Красноярский научный центр» СО РАН, Красноярск, Россия

✉ i.fedorova@botany.am

ИВФ, 0000-0001-5370-427X; ЕСЧ, 0000-0003-4463-4024; СЮЕ, 0000-0002-2758-7361;
ВКК, 0000-0002-8296-6882; АСП, 0000-0001-8721-2142; ИЕС, 0000-0002-6373-0639

Аннотация. В последнее время возрастает нагрузка на оазисы Антарктиды, что ведет к увеличению нагрузки на водные экосистемы озёр и водотоков оазисов на фоне потепления климата и таяния краевой части ледника. В данной работе приведены результаты изучения водных экосистем озёр полуострова Файлдс (о. Кинг Джордж) в летний период в январе–феврале 2020 г. Помимо результатов гидрологических и гидрохимических исследований представлены данные измерений самоочищающей способности репрезентативных водоемов оазиса и потоков парниковых газов с поверхности озёр. Наиболее полноводными являются водотоки, вытекающие с ледника. Озера имеют чаще всего нейтральную реакцию среды; хорошо аэрированы; концентрация биогенных элементов в воде имеет значительные амплитуды; большинство озёр по своему гидрохимическому составу относятся к хлоридно-натриевым водам II типа. Оценка самоочищающей способности озёр показала способность водоемов в целом справляться с внешними (природными) нагрузками на экосистемы, но не во всех случаях. Отмечается эвтрофирование озёр и долин ручьев. В большинстве водотоков и водоемов происходит поглощение углекислого газа (CO₂), в некоторых также метана (CH₄). Однако для CH₄ в основном характерна эмиссия с поверхности водоемов. Полученные результаты позволяют судить об определенной устойчивости озёр к климатическим изменениям, но уже можно говорить о том, что пресноводные экосистемы оазиса испытывают значительную антропогенную нагрузку.

* Текущий адрес: Институт Ботаники им. А.Л. Тахтаджяна Национальной академии наук Республики Армении, Ереван, Армения, i.fedorova@botany.am

Ключевые слова: антарктические оазисы, гидрология, гидрохимия, озера, о. Кинг Джордж, парниковые газы, полуостров Файлдс

Для цитирования: Фёдорова И.В., Чернова Е.С., Евграфова С.Ю., Кадуцкий В.К., Прокушкин А.С., Сидорина И.Е. Адаптация озёр полуострова Файлдс (о. Кинг Джордж, Восточная Антарктида) к климатическим изменениям и антропогенному воздействию. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1): 46–70. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-46-70>

Поступила 23.10.2023

После переработки 10.01.2024

Принята 08.02.2024

Adaptation of Fildes Peninsula Lakes (King George Island, East Antarctica) to climate change and anthropogenic impacts

Irina V. Fedorova^{1✉*}, Elizaveta S. Chernova¹, Svetlana Yu. Evgrafova²,
Valeriy K. Kadutzkii², Anatoly S. Prokushkin², Inessa E. Sidorina¹

¹ Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² Sukachev Institute of Forest Siberian Branch of Russian Academia of Sciences, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

✉ i.fedorova@botany.am

IVF, 0000-0001-5370-427X; ESC, 0000-0003-4463-4024; SYE, 0000-0002-2758-7361;
VKK, 0000-0002-8296-6882; ASP, 0000-0001-8721-2142; IES, 0000-0002-6373-0639

Abstract. The load on the Antarctic oases has been recently increasing, with intensive research carried out by various countries and ecological tourism developing. This leads to an increase in the impact on the aquatic ecosystems of the lakes and streams in addition to the warming climate and glacier melting. This paper presents findings from a study of the Fildes Peninsula (King George Island) lakes' aquatic ecosystems in the summer period of January–February 2020. In addition to results of hydrological and hydrochemical studies, the paper provides data from measurements of the self-cleaning ability of representative oasis lakes, as well as greenhouse gas fluxes from the lakes surface. The water level of the streams decreased 5 times over the summer season, and the water discharge — 10 times. The streams flowing from the glacier have the fullest water. The lakes have a neutral reaction, sometimes weakly alkaline; they are well aerated: the average value of dissolved oxygen in water is 85 %, occasionally supersaturation of up to 137% was observed. The concentration of nutrients in the water has amplitudes that are considerable for Antarctic oases lakes. A significant correlation can only be observed between nitrates and phosphates, and also between the water turbidity and the nutrients' concentration. Maximum turbidity is observed in lakes with abundant content of bacterial mats. Most of the lakes have hydrochemical type II sodium chloride waters. The assessment of the lake self-cleaning ability using the ratio of destruction and organic matter production showed the general ability of ecosystems to cope with external (natural) pressures on ecosystems, but not in all cases. Eutrophication of the lakes and stream valleys is also noted. Carbon dioxide (CO₂) absorption was observed in most of the streams and lakes, in some of them — methane (CH₄) absorption as well. However, CH₄ is generally emitted from the surface of the lakes. The largest values are recorded for small lakes located on glacial moraines and in places where ornithosoils are present. The agreement of the findings from the hydroecological studies of the Fildes peninsula lakes with those presented earlier by other authors makes it possible to conclude that there is a certain resistance of the lakes to climatic changes, but one can already talk about a significant anthropogenic impact on the freshwater oasis ecosystems.

* Present Address: *Institute of Botany after A.L. Takhtajyan National Academia of Sciences of the Republic of Armenia, Erevan, Armenia, i.fedorova@botany.am*

Keywords: Antarctic oases, Fildes peninsula, greenhouse gases, hydrochemistry, hydrology, King George Island, lakes

For citation: Fedorova I.V., Chernova E.S., Evgrafova S.Yu., Kadutzkii V.K., Prokushkin A.S., Sidorina I.E. Adaptation of Fildes Peninsula Lakes (King George Island, East Antarctica) to climate change and anthropogenic impacts. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):46–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-46-70>

Received 23.10.2023

Revised 10.01.2024

Accepted 08.02.2024

Введение

К объектам исследования относятся озера полуострова Файлдс, который является юго-западной оконечностью острова Кинг Джордж — крупнейшего острова в архипелаге Южных Шетландских островов (Западная Антарктика). В работе [1] отмечено, что Антарктический полуостров является ключевым для рассмотрения потепления климата в Южном полушарии. Отмечается, что на нем, возможно, происходит наиболее значительное потепление. На острове Кинг Джордж ранее хорошо было изучено порядка шестидесяти озёр [2]. Однако на полуострове Файлдс в период интенсивного таяния более 135 озёр и небольших водоемов, которые были исследованы во время летнего сезона 65-й РАЭ авторами данной работы. Многие водоемы оазиса временные, наполняющиеся в летний сезон талыми ледниковыми и снежниковыми водами. Также распространенным типом водного питания являются атмосферные осадки. Происхождение озерных котловин малых водоемов по большей части связано с экзарационной деятельностью ледника. Небольшие котловины замкнуты и имеют площадь до 0,5 км². На территории полуострова находятся также четыре крупных озера (Китеж, Длинное, Слаломное, Глубокое). Первые три имеют тектонико-экзарационное происхождение. Озеро Глубокое предположительно является кратером вулкана [3]. Все озера в зимний период покрыты льдом, мелкие перемерзают. Вскрытие ото льда происходит в январе-феврале, однако крупные озера и водоемы, расположенные в горах, в зависимости от метеоусловий отдельного года, могут не открыться ото льда даже в летний сезон. Наличие на полуострове ледника и снежников определяет характер весеннего снеготаяния и дружности половодья: формируются многочисленные ручьи, которые питают озера и образуют сравнительно полноводные реки, впадающие в море. К осени таяние прекращается, многие мелкие водоемы пересыхают.

Описание озёр антарктических оазисов, ландшафтов, биоразнообразия и факторов, влияющих на формирование экосистем, подробно дано в обзорах [4–8] и др. Геохимический анализ озёр рассматривался в работах [2, 9, 10] и др. В работе [9] представлены гидрохимические сведения относительно только двенадцати ранее хорошо изученных озёр оазисов Холмы Ларсеманн и п-ова Файлдс. Более детальные, обширные и близкие к нашему исследованию работы были выполнены чешскими исследователями в 2013 г. [7] на 47 озёрах островов Вега и Джеймс Росс Антарктического полуострова. Авторами выделено 6 типов озёр по их генезису, представлены гидрохимические характеристики каждого типа и отдельно взятых озёр. Белорусскими учеными [11] выполнены измерения гидрохимических параметров озёр оазиса Вечерний в Восточной Антарктиде. Пробы из 10 озёр и 13 временных водоемов отбирались в период с 2012 по 2019 г. в ходе сезонных работ БАЭ. Гидрометриче-

ские наблюдения на временных водотоках полуострова были выполнены в период января–марта 2012 г. [12]. Палеогеографические исследования озиса представлены в отчете М.В. Дорожкиной и Л.М. Саватюгина¹, С.Р. Веркулича [13]. Геохимический и изотопный состав верхнего слоя донных отложений четырех прогляциальных озер и перегляциального оз. Китеж п-ова Файлдс хорошо описаны в [14]. Полученные геохимические результаты отношения углерода и азота (C/N, TOC, TN) и липидные биомаркеры (Pr/Ph — Pristane/Phyтанeratio) в верхнем слое донных отложений позволили авторам составить палеореконструкцию гидрохимических условий, при которых формировались озера, показав изменение окислительно-восстановительного потенциала, наличие гипоксии в одних озерах и хорошее перемешивание и кислородные условия — в других, что весьма важно для водных экосистем и в настоящее время. Также авторами на основе содержания стабильных изотопов ¹³C отмечается возможное влияние торфяных останков растений на липидный состав компонентов донных отложений и привнос морских аэрозолей для формирования геохимии осадков.

В рамках 65-й РАЭ в период с 18 января по 24 февраля 2020 г. на водных объектах острова Кинг Джордж проводились гидрохимические и гидробиологические наблюдения, являющиеся продолжением геэкологических исследований водных объектов озиса и наземных ландшафтов, выполнявшихся в ходе предыдущих экспедиций. Ранее, в период работ 58-й и 59-й РАЭ, на территории озиса были изучены 29 озер, 3 водотока и ледник Беллинсгаузена [2]. Особенностью работы 65-й РАЭ являлся дополнительный акцент на гидрологических и гидрохимических исследованиях — изучение потоков парниковых газов с поверхности водоемов. Исследования такого рода позволяют получить информацию о текущем состоянии водных и наземных ландшафтов, их качественных и количественных характеристиках, а также спрогнозировать дальнейшее развитие. Во время полевых работ был осуществлен комплекс гидроэкологических исследований, включающий в себя как проведение гидрохимических экспресс-анализов, сбор натуральных материалов (проб воды, компонентов биоты, донных отложений), так и последующую камеральную обработку.

В [15] отмечается, что, согласно работам различных авторов, в пресноводных водоемах приморских антарктических территорий (Южных Шетландских островов) найдено 69 зоопланктонных организмов, включая мезо- и макрозоопланктон, из которых 52 таксона — это Rotifera (коловратки). Однако для небольших наскальных прудов биоразнообразие значительно меньше. Так, для Аргентинского острова было отмечено всего 11 таксонов. Подробное описание гидробионтов озер антарктических озисов дано в работах иностранных авторов для других озисов [5, 16, 17], а для п-ова Файлдс в [18] были идентифицированы 53 вида водорослей, относящихся к 5 отделам, 7 классам, 17 отрядам, 28 семействам и 36 родам. Наибольшее число идентифицированных видов принадлежит к цианобактериям (37 видов, 70 % от общей численности). Распространенные виды характеризуются как бентические, планктонно-бентические и почвенные обитатели. Для водоемов выделены водоросли стоячих водоемов и текущих вод (водотоков). Во время летнего сезона 2006/07 г.

¹ *Дорожкина М.В., Саватюгин Л.М.* Научно-технический отчет по программе «Исследования по палеогеографии и палинологии на станции Беллинсгаузен (остров Кинг Джордж, Западная Антарктида) в период зимовочных работ 56-й РАЭ» // Фонды ААНИИ, Санкт-Петербург. 2012. 92 с.

для оз. Китеж основным видом зоопланктона назван пресноводный вид рачков копепод — *Pseudoboeckella poppei* (Copepoda, Calanoida) [19]; помимо этого, были отмечены бранхиоподы *Branchinecta sp.*, а также придонные кладоцеры *Macrothrix sp.*

Измерение потоков парниковых газов (CO_2 и CH_4) с поверхности выполнено для такого количества озёр п-ова Файлдс впервые. Ранее потоки газов изучались с поверхности почв, с наземных ландшафтов [20]. В [21] авторы рассматривали активность и биоразнообразие аэробных метанотрофов в донных отложениях пяти озёр о. Кинг Джордж. В работе [22] рассмотрено содержание растворённых парниковых газов в воде, донных отложениях озера Китеж в течение года, эмиссия CO_2 и CH_4 с его поверхности в летний период. Для Китежа представлены пространственное распределение CO_2 и CH_4 по глубине озера, а также эмиссия газов с его поверхности, где отмечается поглощение CO_2 и выделение CH_4 в конце весеннего периода и начале осеннего.

Большинство перечисленных выше работ либо охватывают аналогичные исследования других антарктических территорий, либо, чаще всего, основаны на изучении малого количества водных экосистем или отдельных процессов, в них происходящих.

В данной работе, целью которой являлась оценка гидроэкологического состояния озёр полуострова Файлдс острова Кинг Джордж (или о. Ватерлоо) в летний период 2020 г., представлены результаты исследования большого количества водоемов, что позволило составить представление о пространственном распределении параметров озёр по территории оазиса и выявить закономерности и специфику тех или иных процессов, происходящих на полуострове.

Материалы и методы

Полуостров Файлдс представляет собой свободный ото льда участок суши, на котором находится множество малых и крупных водоемов. Остальная часть о. Кинг Джордж покрыта ледниковым куполом Беллинсгаузена.

Остров сложен вулканическими горными породами (базальтами, туфами и андезитами). Рельеф острова холмистый с абсолютными высотами 150–160 м над уровнем моря. В ряде мест остров обрамлен морскими террасами. Климат острова более мягкий по сравнению с оазисами. Среднегодовая температура воздуха составляет $-1,6$ °С. Среднегодовая температура земной поверхности -1 °С. Климат более влажный. В среднем относительная влажность составляет 84 %. За год выпадает более 500 мм осадков. На острове Кинг Джордж довольно высокая облачность. Среднегодовая общая облачность составляет 9 баллов. Среднегодовая скорость ветра 7 м/с. Для острова характерны примитивные криогенно-структурные почвы с незначительным содержанием гумуса. Почвы являются кислыми и слабозасолёнными. Существенное влияние на почвообразовательные процессы оказывает органическое вещество, продуцируемое животными. В оазисе были обнаружены гнездовья трех видов пингвинов (пингвин Адели, антарктический пингвин, ослиный пингвин), буревестника, поморника, капского голубя [3, 23].

На озерах оазиса измерялись гидрофизические и гидрохимические параметры: рН, температура воды, электропроводность, содержание растворённого кислорода. Всего изучено 132 озера и временных водоема (рис. 1). Названия озёр в статье представлены из газетира [24] — для крупных озёр и авторские — для малых водоемов, с указанием для них географических координат для возможности сравнения результатов с другими исследованиями. В большинстве озёр отбор проб воды и ги-

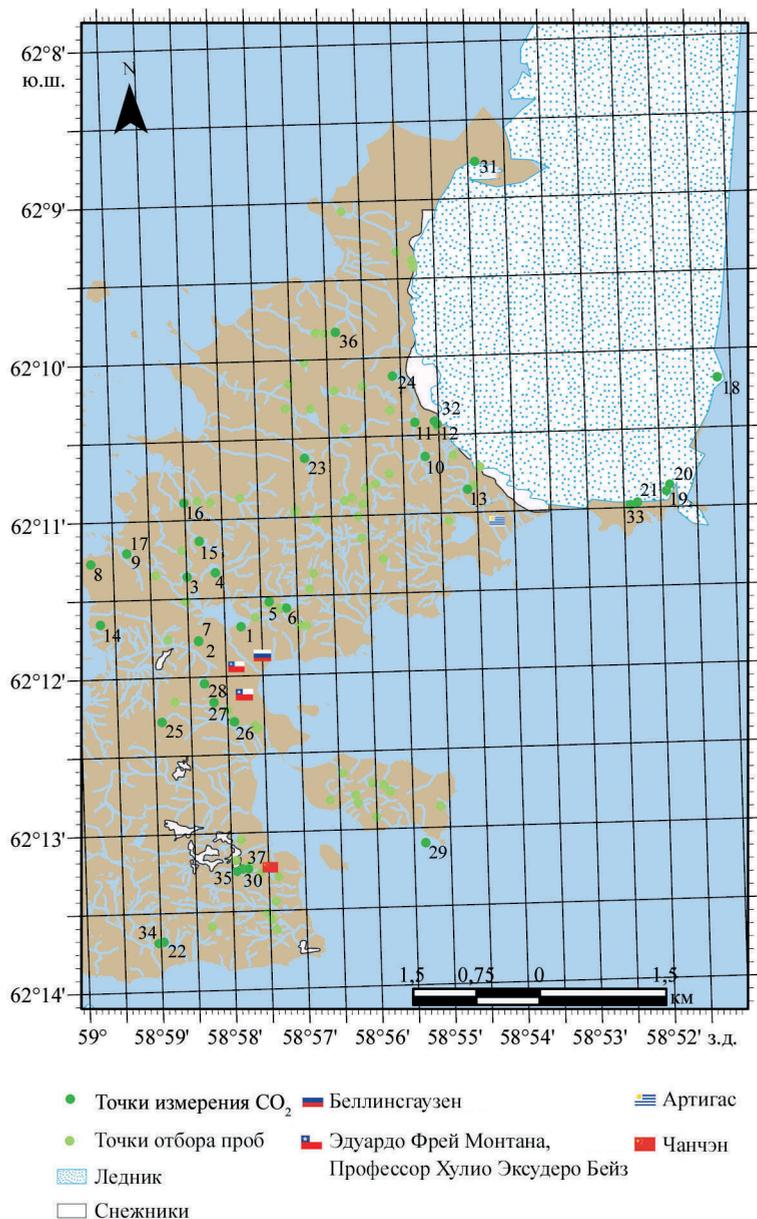


Рис. 1. Район работ и точки отбора проб на п-ове Файлдс, о. Кинг Джордж, Южные Шетландские острова.

Номерами обозначены озера, где брались пробы CO₂

Fig. 1. The area studied and points of sampling on the Fildes Peninsula, King George Island (South Shetland Islands).

The numbers indicate the lakes where CO₂ samples were taken

дрохимические экспресс-анализы проводились разово, однако на некоторых водоемах были организованы повторные наблюдения. Измерения проводились портативными электрохимическими приборами фирмы “ОНАУС”: кислородомером Starter 300D, рН-метром с термометром ST20 и кондуктометром с термометром ST20C-B.

Анализ содержания биогенных элементов был выполнен дважды — в полевой лаборатории (анализы первого дня) и в Санкт-Петербурге в Лаборатории им. Отто Шмидта Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ОШЛ ААНИИ) на анализаторе биогенных элементов SKALAR SunPlusSystem. На фотометре «Эксперт-003» непосредственно в полевой лаборатории научной станции были проанализированы пробы воды на содержание ортофосфатов и нитратов, цветность и мутность. Далее часть отобранных и замороженных проб была доставлена в ААНИИ, где выполнялся анализ концентраций кремния, фосфатов, аммония и нитратов с нитритами колориметрическим методом.

Анализ содержания главных ионов в воде озёр проводился в Ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) «Методы анализа состава вещества» методом жидкостной хроматографии на приборе Стайер А.

Самоочищающая способность водных экосистем определялась с помощью отношения деструкции (D) органического вещества к валовой первичной продукции ($P_{\text{вал}}$), или $D/P_{\text{вал}}$ [25]. Эксперименты по определению $D/P_{\text{вал}}$ проводились на двух небольших озерах водосбора оз. Китеж и устья ручья Взлетный, недалеко от аэродрома, — на оз. Метановое ($62^{\circ}11'20,9''$ ю. ш., $58^{\circ}58'55,4''$ з. д.) и оз. Красных водорослей ($62^{\circ}11'16,1''$ ю. ш., $58^{\circ}59'08,5''$ з. д.). На озерах Метановое и Красных водорослей были выполнены измерения на основе скляночного метода в кислородной модификации [26]. Время экспозиции выбиралось довольно большое (48 часов) в связи с отсутствием явно выраженного внутрисуточного хода изменения параметров (полярный день во время антарктического лета). Далее рассчитывалось $D/P_{\text{вал}}$ отношение. При $D/P_{\text{вал}} > 1$ в озере преобладает разложение органического вещества, и экосистема способна к самоочищению. При $D/P_{\text{вал}} < 1$ в экосистеме активно происходит рост первичной продукции, не компенсируемый разложением органического вещества, и, значит, данная система в большей степени склонна к эвтрофированию. Безусловно, $D/P_{\text{вал}}$ отношение может быть одинаковым при малых и больших значениях продукции и деструкции, однако данный метод позволяет в целом говорить о способности системы к самоочищению, что важно для оценки экологического состояния озёр оазиса, на котором постоянно растёт антропогенное воздействие в связи с развитием экологического туризма.

Были проведены наблюдения за гидрологическим режимом близлежащих к станции Беллинсгаузена водотоков в летний период. На вытекающем из оз. Китеж ручье возобновлены измерения уровня и расходов воды. В течение всего периода уровень воды измерялся ежесуточно, скорость течения и расход воды — раз в 10 дней. В качестве водомерного створа использовался водослив из подпруженного для водохозяйственных целей озера рядом со станцией. Измерения скоростей течения выполнялись методом поверхностных поплавков. Расчеты расходов воды проводились согласно Наставлению гидрометеорологических станциям и постам аналитическим методом². На других водотоках оазиса гидрометрические наблюде-

² Наставление гидрометеорологических станциям и постам. Вып. 2. Ч. 2: Гидрологические наблюдения на постах. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.

ния выполнялись разово, в основном на двух или трех створах в различных частях водотока для выявления нарастания стока ручьев по их длине.

Оценку потоков метана с поверхности водного объекта в полевых условиях проводили с использованием анализатора концентрации метана в воздухе SPD203 фирмы Sanprometer (высокоточного течейскаателя) и плавающей камеры объемом 6 дм³. Датчик анализатора помещали в отверстие в верхней части камеры и регистрировали изменение концентрации метана в течение 120 секунд. На каждом водном объекте проводили от 3 до 6 измерений, в зависимости от его размеров и сходимости результатов замеров. Измерение потоков CO₂ выполняли на 37 озерах оазиса (см. рис. 1) методом плавающих камер с помощью ручного измерителя уровня содержания CO₂ Vaisala CARBOCAP GM70 с портативным ИК-сенсором Vaisala GMP222 и логгером MI70. Растворенный CO₂ измеряли портативным ИК-сенсором Vaisala CARBOCAP. Одновременно с потоками парниковых газов измерялись метеопараметры: температура воздуха, температура воды (для водных объектов), атмосферное давление. Скорость ветра не учитывалась.

Для всех гидрохимических параметров проведен статистический анализ. Были посчитаны стандартные величины: коэффициент вариации (Cv), коэффициент асимметрии (Cs), дисперсия, амплитуда, среднее значение, медиана, мода, стандартное квадратическое отклонение.

Результаты

Гидрологические работы на водотоках оазиса

Уровень воды ручья, вытекающего из оз. Китеж, изменялся в течение сезона в 5 раз (от 2 см до 11,5 см), что связано с выпадавшими за период наблюдений осадками. Ход уровня воды и измеренные расходы представлены на рис. 2. Максимальный расход воды составлял 2993 л/с (или 3 м³/с), минимальный был в 10 раз меньше. Максимальная средняя скорость течения ручья — 0,96 м/с — отмечалась выше подпруды, а минимальная — 0,37 м/с — ниже, на водосливе. Нужно отметить, что в связи с использованием воды ручья на нужды станции расход воды ниже подпруды может сократиться более чем в 10 раз.

Гидрометрические работы в течение сезона были выполнены на нескольких ручьях, расположенных между российской и уругвайской станциями (см. рис. 1). Ниже представлено описание обследованных водотоков, а в табл. 1 — основные гидрометрические и гидрохимические характеристики.

Разовое обследование водотоков оазиса показало, что наиболее полноводными являются водотоки, текущие непосредственно с купола ледника Беллинсгаузена. Так, расход воды реки в районе уругвайской научной станции составлял 03.02.2020 0,56 м³/с, максимальная скорость потока была 1,17 м/с, площадь водного сечения при измерении равнялась 1,35 м² при средней глубине потока 0,52 м.

Ручей 1 (62°11'29,9" ю. ш., 58°56'48,4" з. д., измерения выполнены 08.02.2020). Ручей берет свое начало из снежника и впадает в оз. Мираж. Ручей имеет каменистое дно, но есть песок и немного ила. На дне — водоросли. Руслó ручья расширяется, на всем протяжении оно такое же каменистое. В ручей притекают небольшие потоки со склонов, где находятся маленькие снежники. Продольный профиль ручья не выложен и имеет различные уклоны. В верхнем течении профиль имеет небольшой уклон, средняя часть — с более значимым уклоном, а нижняя треть ручья — наи-

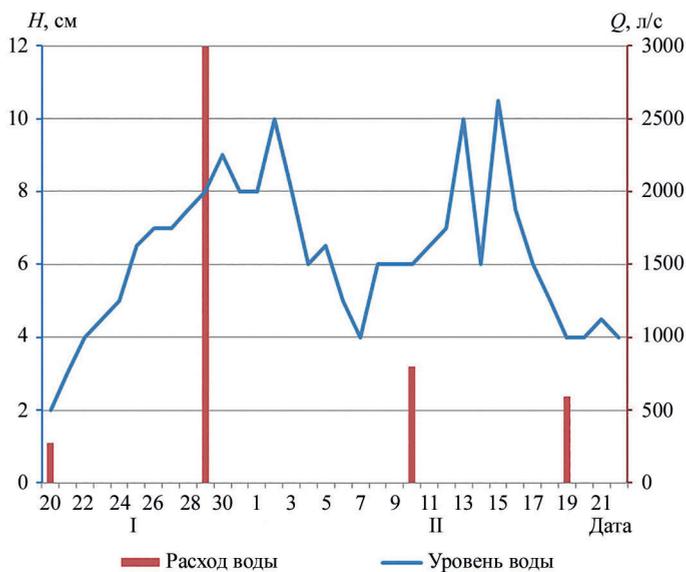


Рис. 2. Ход уровня (H) и расход воды (Q) ручья, вытекающего из оз. Китеж в летний сезон 65-й РАЭ (январь–февраль 2020 г.)

Fig. 2. Water level (H) and discharge (Q) of the stream outflowing from Kitezh lake in the summer season 65 RAE (January–February 2020)

большой уклон. Общий перепад высот между истоком и устьем составляет 9 м. Длина ручья 167 м. Ручей впадает в оз. Мираж, образуя дельту. До вершины дельты от края озера 3 м. Вода в дельте распластывается. На дне ручья наблюдаются бактериальные маты и большое количество зеленых водорослей. Для измерения в верхнем течении ручья выбран прямолинейный участок. Дно — каменисто-песчаное. Ширина верхнего створа ($62^{\circ}11'30,0''$ ю. ш., $58^{\circ}56'49,0''$ з. д.) 0,65 м. Средняя глубина — 1,9 см. Расход воды измерялся поверхностными поплавками и равен 0,9 л/с. Средняя скорость течения — 0,11 м/с. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет 12,15 мг/л, или 104,2 % насыщения при температуре воды $8,1^{\circ}\text{C}$; электропроводность — 65 мкСм/см. Нижний створ ($62^{\circ}11'31,1''$ ю. ш., $58^{\circ}56'58,7''$ з. д.) выбран в месте до распластывания течения, с большей шириной русла, однако оно заполнено не полностью. Скорость течения та же, что и в верхнем течении, — 0,11 м/с. Ширина створа 0,95 м, средняя глубина — 2,2 см. Расход воды $0,019\text{ м}^3/\text{с}$. Расход в нижнем течении немного больше за счет притока с водосбора ручья на участке между верхним и нижним створами. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет 8,76 мг/л, или 77,4 % насыщения при температуре воды $9,3^{\circ}\text{C}$; электропроводность — 73 мкСм/см.

Ручей 2 ($62^{\circ}11'35,1''$ ю. ш., $58^{\circ}57'15,9''$ з. д., измерения выполнены 08.02.2020). Ручей вытекает из оз. Мираж и впадает в оз. Среднее. Ширина русла в верхнем течении составляет примерно 1,5 м, однако по мере продвижения вниз по склону русло расширяется до 10 м. Вода течет широким и мелководным потоком. Между камней образуются струи (русловая многорукавность). В нижнем течении поток создает небольшую заводь, в которой во время полной воды формируется оз. Среднее. Озеро

Таблица 1

Основные гидрометрические и гидрохимические характеристики ручьев п-ова Файлдс
 (между российской и уругвайской научными станциями)

Table 1

Main hydrometrical and hydrochemical features of the streams of the Fildes peninsula
 (between Russian and Uruguayan research stations)

№ ручья, дата измерения	Створ	Ширина створа, м	Скорость течения, м/с	Расход воды, л/с	Средняя глубина, см	Концентрация растворенного кислорода O ₂		Температура воды, °C	Электропроводность, мкСм/см
						мг/л	% насыщ.		
Ручей 1, 08.02.20	Верхний	0,65	0,11	0,9	1,9	12,15	104,2	8,1	65
	Нижний	0,95	0,11	1,9	2,2	8,76	77,4	9,3	73
Ручей 2, 08.02.20		6,00	0,11	0,9	1,9	12,15	104,2	8,1	65
Ручей 3, 15.02.20	Верхний	1,55	0,87	899	7,4	11,30	83,8	2,4	115
	Нижний	2,50	0,91	936	6,3	11,40	85,9	3,0	118
Ручей 3, 20.02.20	Нижний	2,20	0,29	384	7,2				
Река *		2,60	1,17	564000	52,0				
Ручей из оз. Китеж	Водослив в районе станции		0,96**	2993**					

Примечание. * река в районе уругвайской станции — формируется стоком с ледника; ** указаны максимальные за период наблюдений значения; створ расположен возле станции Беллинсгаузена — водослив из запруды ручья.

может сильно изменять свои размеры: если в начале наблюдений его размеры были 60 × 80 м, то через две недели, на момент измерений на ручье, оно уменьшилось примерно до 20 м в длину и 5 м в ширину. Дно ручья покрыто бактериальными матами и длинными зелеными водорослями. Длина ручья — 112 м, перепад высот — 3 м. Для гидрологических измерений в ручье выбран прямолинейный участок ближе к оз. Мираж. Вода текла несколькими струями, измерения проведены в самой крупной из них. Расход воды во второй струе, которая ответвляется выше, существенно меньше (примерно 5 % стока основного русла), поэтому в расчет не принимался. Дно — каменисто-песчаное. Ширина створа 6 м. Средняя глубина — 1,9 см. Расход воды, измеренный поверхностными поплавками, составил 0,009 м³/с. Средняя скорость течения — 0,11 м/с. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет 12,15 мг/л, или 104,2 % при температуре воды 8,1 °C; электропроводность — 65 мкСм/см.

Ручей 3 (62°11'14,1" ю. ш., 58°56'21,0" з. д., измерения выполнены 15.02.2020). Ручей берет свое начало из трех снежников в предгорьях большого горного массива полуострова, впадает в залив Максвелл в районе нефтебазы. Сливаются три потока, затем до средней части ручей имеет одно русло. В середине и ниже (до

каньона) в ручей впадают некоторые мелкие ручьи с водосбора, расход которых несуществен. Русло ручья на всем протяжении каменистое, водорослей нет. Уклон ручья значительный. Русло ручья до конца не выработано, однако существует уже давно — в ручье есть каньоны. Наблюдаемые русловые формы — прямолинейное течение (верхняя часть русла), ограниченное меандрирование (средняя часть $62^{\circ}11'24,0''$ ю. ш., $58^{\circ}56'21,2''$ з. д.), пойменная многорукавность, каньон (нижнее течение) и устьевая область (эстуарий, частично перекрытый от моря прибрежным валом, $62^{\circ}11'38,7''$ ю. ш., $58^{\circ}56'07,0''$ з. д.). Общая длина ручья — 785 м. Превышение истока ручья над устьем — 23 м.

Для измерения в верхнем течении ручья ($62^{\circ}11'17,0''$ ю. ш., $58^{\circ}56'20,0''$ з. д.) выбрано место после слияния трех ручьев со снежников. Участок прямолинейный. Ширина верхнего створа — 1,55 м, средняя глубина — 7,4 см. Расход воды, измеренный поверхностными поплавками, равен $0,899 \text{ м}^3/\text{с}$. Средняя скорость течения — $0,87 \text{ м/с}$. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет $11,3 \text{ мг/л}$, или $83,8 \%$ насыщения при температуре воды $2,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$; электропроводность — 115 мкСм/см .

Нижний створ ($62^{\circ}11'24,0''$ ю. ш., $58^{\circ}56'21,2''$ з. д.) выбран в месте после пойменной многорукавности, до каньона. Русло одно, скорость течения значительная и составляет $0,91 \text{ м/с}$. Ширина створа — 2,5 м, средняя глубина — 6,3 см. Расход воды $0,936 \text{ м}^3/\text{с}$. Расход в нижнем течении немного больше за счет притока с водосбора ручья. Концентрация измеренного на створе растворенного кислорода составляет $11,4 \text{ мг/л}$, или $85,9 \%$ при температуре воды 3°C ; электропроводность — 118 мкСм/см . Повторное измерение в нижнем створе ручья 20.02.2020 показало уменьшение скорости течения по сравнению с предыдущим измерением 15.02.2020 до $0,29 \text{ м/с}$. Ширина створа 2,2 м, средняя глубина — 7,2 см. Расход воды составил $0,384 \text{ м}^3/\text{с}$.

Измерение гидрофизических и гидрохимических параметров на малых ручьях оазиса, выполненное в феврале 2020 г., показывает довольно хорошее насыщение растворенным кислородом — до 77% и выше, электропроводность составляет от 65 до 118 мкСм/см .

Результаты гидрохимических наблюдений

Температура воды. Температура в озерах в период отбора проб варьировала от озера к озеру. Коэффициент вариации составляет 41% и показывает неоднородность данных при большой амплитуде значений, что неудивительно для летнего сезона.

В среднем температура озёр составляла $7,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом максимальная температура $15,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ отмечалась в небольшом водоеме на о. Ардли ($62^{\circ}12'40,2''$ ю. ш., $58^{\circ}56'30,2''$ з. д.), также значение $15,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ имел временный водоем в другой части оазиса — недалеко от старой бразильской станции ($62^{\circ}10'19,0''$ ю. ш., $58^{\circ}57'05,4''$ з. д.), что, безусловно, связано с метеоусловиями данного времени года. Минимальная температура воды характерна для криоконитов ($0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) на леднике и ручьях, с него стекающих ($0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$), а также приледниковых водоемах, например, $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в оз. Подледное ($62^{\circ}10'58,3''$ ю. ш., $58^{\circ}52'19,7''$ з. д.). Такое различие температур связано не только с близостью ледника, но и с глубиной озёр. Озеро, в котором наблюдалась температура $15,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, мелкое, не глубже двадцати сантиметров. Именно из-за небольшой глубины и нахождения в озере темно-бурых матов водорослей оно смогло так сильно прогреться.

Водородный показатель (рН). Крайне однородны полученные показатели рН, коэффициент вариации составляет всего 8 %. По значению водородного показателя выделяются нейтральные, слабощелочные и сильнощелочные озера. Преобладают озера с нейтральной реакцией среды. Максимальное за рассматриваемый период значение водородного показателя составило 10,05, среднее — 7,56. Столь высокие показатели рН характерны для лагунных, слабосоленых, озер о. Кинг Джордж.

Растворенный кислород (O₂). Концентрация растворенного кислорода от озера к озеру варьирует сильно, коэффициент вариации составляет 64 %. Это связано главным образом с морфометрическими характеристиками озер, с близостью ледника и снежников, а также с динамикой водных экосистем озер и временных водоемов оазиса. В среднем концентрация O₂ составила 10,83 мг/л, максимальное содержание растворенного кислорода — 13,82 мг/л. Насыщение кислородом при этом соответствовало в среднем 85 %, максимальное значение — 137 %. Для многих озер характерно насыщение кислородом выше 100 %, что является отличительной чертой озер антарктических оазисов, поступление воды в которые обусловлено в основном талыми снежниковыми и ледниковыми водами, обогащенными растворенным кислородом.

Электропроводность. Большинство озер о. Кинг Джордж пресные, об этом свидетельствуют данные по электропроводности воды. Так, средняя электропроводность составляет 288 мкСм/см. Однако есть и соленое лагунное озеро, электропроводность которого составила 10200 мкСм/см, — неглубокое, до пятнадцати сантиметров глубиной, в него во время штормов поступает морская вода.

Содержание биогенных элементов. Концентрации биогенных элементов значительно варьируют от озера к озеру и изменяются в течение летнего периода. Для измеренных непосредственно в полевых условиях концентраций биогенных элементов в воде коэффициент вариации содержания фосфатов равен 112 %, нитратов (NO₃⁻) — 355 %. Содержание фосфатов довольно высоко, в среднем — 0,92 мг/л с амплитудой от 0 мг/л до 8,04 мг/л, при этом максимальное значение в 9 раз превышает медиану. Среднее содержание нитратов составляет 0,6 мг/л при амплитуде от 0 мг/л до 11,5 мг/л. Максимальное значение концентрации нитратов в 19 раз превышает среднее значение. Измерения содержания биогенных элементов (кремния Si, фосфатов, ионов аммония (NH₄⁺), суммы нитритов и нитратов (NO₂⁻+NO₃⁻) в лаборатории ОШЛ ААНИИ показали значительно меньшие значения. Анализ был проведен для меньшего количества проб: максимальное количество анализов для кремния составило 16 проб, а для аммония — всего 7 проб. Максимальная концентрация фосфатов в озерах равнялась 0,02 мг/л, а суммы нитратов и нитритов — 0,59 мг/л. И если значение нитратов с нитритами примерно такое же, как и среднее значение для полевых наблюдений, то содержание фосфатов отличается на два порядка. Однако в связи с тем, что возможны ошибки измерений как в полевых условиях (из-за плохой калибровки прибора), так и в ААНИИ (из-за транспортировки проб в замороженном виде и периоде их хранения более двух месяцев), в данной работе приводятся все имеющиеся результаты. Амплитуда Si изменялась от 0,01 до 2,80 мг/л при среднем измеренном значении 1,17 мг/л. Концентрации аммония варьировали от 0,01 до 0,3 мг/л при среднем значении 0,08 мг/л.

Цветность и мутность. Для озер о. Кинг Джордж п-ова Файлдс были определены такие параметры, как цветность (по шкале Хазена) и мутность. Данные по

этим параметрам варьируют значительно, коэффициент вариации для цветности составляет 195 %, для мутности — 163 %. Цветность изменялась от 0° до 420°. Максимальная цветность наблюдалась в неглубоком (максимум 15 см) озере с обильным присутствием бактериальных матов. Мутность изменялась от 0 ЕМФ до 72,6 ЕМФ, где ЕМФ — единицы мутности по формазину (примерное значение мутности, выраженной в мг/л). Максимальная мутность наблюдалась в неглубоком (20 см) озере с обильным присутствием матов.

Ионный состав воды. В ходе ионнохроматографического анализа был определен катионный (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+) и анионный (Cl^- , Br^- , F^- , SO_4^{2-}) состав воды некоторых озёр оазиса. Среди катионов преобладающим оказался натрий Na^+ , максимальная концентрация которого составила 0,763 мг-экв/л, минимальная — 0,05 мг-экв/л. Максимальная концентрация калия — 0,169 мг-экв/л, минимальная — 0,004 мг-экв/л. Амплитуда значений содержания магния была 0,008–0,535 мг-экв/л, кальция — 0,003–0,69 мг-экв/л. Среди анионов преобладающим в водах изучаемых озёр оказался хлорид, амплитуда значений составила 0,08–2,38 мг-экв/л. Содержание фтора изменялось от 0,001 мг-экв/л до 0,006 мг-экв/л, брома — от 0,005 до 0,02 мг-экв/л. Минимальная концентрация сульфат-иона составила 0,02 мг-экв/л, максимальная — 1,35 мг-экв/л. Концентрация гидрокарбонатов (HCO_3^-) оказалась ниже порога обнаружения в большинстве озёр за исключением значения 0,27 мг-экв/л в лагунном малом водоеме на первой морской террасе (глубиной до 0,6 м) и 0,062 мг-экв/л в оз. Норма ($62^\circ 11' 21,6''$ ю. ш., $58^\circ 55' 46,1''$ з. д.) напротив мыса Саффилд.

Для преобладающего числа озёр суммарная концентрация кальция и магния превышает суммарную концентрацию гидрокарбонат-иона и сульфат-иона. Однако есть озера, в которых наблюдается обратная ситуация. На основании проведенных анализов все озера были типизированы по классификации О.А. Алекина (1970) [27], согласно которой большинство водоемов п-ова Файлдс относятся к хлоридно-натриевым II типа. Генетически такие водоемы имеют унаследованный гидрохимический состав — после регрессий моря поверхность оазиса составляет основной источник солей при формировании водоемов. В водах II типа суммарная концентрация гидрокарбонат-ионов и сульфат-ионов превышает суммарную концентрацию ионов кальция и магния. В хлоридно-натриевом оз. Норма (C_I^{Na}) обнаружен I тип вод, где концентрация гидрокарбонат-ионов превышает суммарную концентрацию ионов кальция и магния. Шесть озёр, расположенных в лагунах и на 1-й морской террасе, имеют III тип вод. Немногочисленны водоемы сульфатного класса (оз. Подледное ($\text{S}_{II}^{\text{Na}}$) ($62^\circ 10' 58,3''$ ю. ш., $58^\circ 52' 19,7''$ з. д.) и два мелких водоема рядом с ним, а также оз. Длинное ($\text{S}_{II}^{\text{Ca}}$) и кальциевой группы (оз. Географов ($\text{C}_{II}^{\text{Ca}}$ Cl) и озеро ($62^\circ 13' 45,7''$ ю. ш., $58^\circ 59' 51,8''$ з. д.) на юге полуострова, рядом с проливом Файлдс ($\text{C}_{III}^{\text{Ca}}$). $\text{C}_{III}^{\text{Ca}}$

Корреляционный анализ гидрохимических показателей. Все рассчитанные статистические характеристики гидрохимических параметров озёр представлены в табл. 2. Для данных значений водородного показателя рН, электропроводности, нитратов, фосфатов, мутности, цветности мода и медиана больше среднего значения, для температуры и растворенного кислорода, наоборот, — среднее значение превышает моду и медиану. Это говорит о том, что данные не подчиняются нормальному закону распределения. Все ряды данных гидрохимических параметров, кроме насыщенности воды растворенным кислородом, имеют положительную асимметрию.

Таблица 2

Статистические параметры гидрохимических показателей озер полуострова Файлде

Table 2

Statistical parameters of the hydrochemical characters of the Fildes Peninsula lakes

Статистический параметр	pH	Температура воды, °C	Электропроводность, мкСм/см	Растворенный кислород O ₂ , мг/л	Растворенный кислород O ₂ , %	Нитраты, мг/л	Фосфаты, мг/л	Цветность, град.	Мутность, ЕМФ
Среднее значение	7,56	7,51	288,5	10,83	85,63	0,61	0,93	25,97	6,5
Медиана	7,40	7,10	166,0	10,67	90,40	0,00	0,78	9,87	3,4
Мода	7,37	8,60	112,0	12,10	90,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Max	10,05	15,90	10200,0	13,82	137,20	11,50	8,04	420,00	72,6
Min	6,47	0,10	0,0	6,05	9,62	0,00	0,00	0,00	0,00
Амплитуда	3,58	15,80	10200,0	7,77	127,58	11,50	8,04	420,00	72,6
Дисперсия	0,40	9,40	790843,4	47,59	442,94	4,65	1,09	2569	111,6
Стандартное отклонение	0,63	3,07	889,3	6,90	21,05	2,16	1,04	50,68	10,6
Cv, %	8	41	308,0	64	25	355	112	195	163,0
Cs	1,45	0,57	10,8	9,95	-0,79	4,18	3,36	5,01	3,9

Таблица 3

Корреляционная матрица гидрохимических параметров водоемов

Table 3

Correlation matrix of the hydrochemical parameters of the lakes

Параметр	Электропроводность	Водородный показатель pH	Растворенный кислород O ₂	Нитраты	Фосфаты	Мутность	Цветность
Электропроводность	1	0,21	0,00	0,15	0,03	0,03	-0,03
Водородный показатель pH	0,21	1	-0,12	0,30	0,01	0,03	0,05
Растворенный кислород O ₂	0,00	-0,12	1	0,17	-0,10	-0,05	0,11
Нитраты	0,15	0,30	0,17	1	0,46	0,71	-0,04
Фосфаты	0,03	0,01	-0,10	0,46	1	0,08	0,38
Температура воды	0,05	0,10	0,12	-0,06	0,21	-0,10	0,02

Расчет парной корреляции между гидрохимическими параметрами показал отсутствие значимой связи между нитратами и водородным показателем (кислотностью) ($r = 0,30$), наличие сильной прямой связи между нитратами и мутностью воды ($r = 0,71$), умеренной прямой связи между фосфатами и цветностью воды ($r = 0,38$), а также между фосфатами и нитратами ($r = 0,46$). Корреляционная матрица гидрохимических параметров, определенных в полевых условиях, посчитанная для 132 постоянных и временных озёр оазиса, представлена в табл. 3.

Гидроэкологические исследования

Для определения гидроэкологического состояния озёр полуострова использованы сведения о биоте, продукционно-деструкционных процессах и значения концентрации биогенных элементов. Водоемы п-ова Файлдс отличаются богатым биоразнообразием по сравнению с другими антарктическими оазисами. На рис. 3 представлены основные виды водорослей и бактериальные маты, встречаю-



Рис. 3. Различные виды водорослей в водоемах п-ова Файлдс

Fig. 3. Different species of algae of Fildes Peninsula aquatic objects



Рис. 4. Небольшое озеро в районе залива Коллинз с наличием большого количества красных водорослей и заболачиванием водосбора на фоне края ледникового купола

Fig. 4. A small lake in the Collins Bay area with large amounts of red algae and waterlogged catchment against the edge of the glacial cape

щиеся в озерах полуострова. Многие мелкие водные объекты, несмотря на незначительные размеры до 2 м², также имеют различные виды фито- и зоопланктона, невзирая на длительное промерзание зимой. Это также связано и с высоким содержанием в воде биогенных элементов из-за интенсивного поступления веществ с водосбора в летний период и активным испарением воды. Это способствует не только развитию гидробионтов, но и естественному эвтрофированию озер. Нужно также отметить, что многие поймы ручьев и озер заболачиваются, формируются торф и моховые ковры (рис. 4). Мощность торфа на водосборах озер и ручьев не превышает 30 см, однако наличие развитой наземной растительности подтверждает потепление климата (увеличение температуры воздуха и количества осадков, в том числе жидких) полуострова.

На леднике также были отмечены красные водоросли. Чаще всего такой цвет принадлежит зеленым водорослям *Chlamydomonas nivalis* и *Chlorosphaera antarctica*, которые аккумулируют фотозащитные красные эфиры [25].

Самоочищающая способность водоемов. Для исследования самоочищающей способности водных экосистем водоемов применялось D/P_{вал} отношение. В табл. 4 представлены результаты определения D/P_{вал} отношения. Для озера Метановое повторные измерения показали преобладание в начале февраля 2020 г. деструкции органического вещества над валовой первичной продукцией, что говорит о хорошей самоочищающей способности. А для озера Красных водорослей к концу февраля неравенство изменило знак на противоположный (D/P_{вал} < 1), указывая на наличие процессов эвтрофирования. Амплитуда значений D/P_{вал} изменялась от 0,69 до 44, т. е. была весьма значительной, свидетельствуя о неоднозначности продукционно-деструкционных процессов в озерах, но все-таки демонстрируя возможность озерных экосистем к самоочищению.

Таблица 4

Показатели деструкции и продукции в озерах Метановое и Красных водорослей

Table 4

Parameters of decomposition and production in lakes “Metanovoye” and “Red Algae”

Озеро	Дата измерения	Деструкция D, мгС/л в сут	Продукция P _{вал} , мгС/л в сут	D/P _{вал}	Преобладающий процесс
Метановое	06.02.20–08.02.20	0,064	0,002	44	D/P>1 Самоочищение
	08.02.20–10.02.20	0,03	0,009	3,4	D/P>1 Самоочищение
Красных водорослей	12.02.20–14.02.20	0,06	0,023	2,61	D/P>1 Самоочищение
	14.02.20–16.02.20	0,049	0,042	1,17	D/P>1 Самоочищение
	16.02.20–19.02.20	0,006	0,008	0,69	D/P<1 Эвтрофирование

Потоки парниковых газов с поверхности водоемов

Поток углекислого газа. CO₂ озер в течение летнего сезона немного возрастал с середины января до конца февраля (рис. 5), что связано, скорее всего, с повышением среднесуточной температуры воздуха. Также нужно отметить увеличение амплитуды значений CO₂ к началу февраля — середине летнего сезона. Минимальное значение 6,57 мкмоль было измерено в оз. Моховое (62°10'11,0" ю. ш., 58°51'11,1" з. д. (озеро № 6, см. рис. 1)) на высоте 23 м над уровнем моря. Водосбор озера полно-

стью зарос мхом, на дне — красные водоросли. Большие значения CO_2 , равные 51,13 мкмоль, отмечены в озере Подледное ($62^\circ 10' 58,3''$ ю. ш., $58^\circ 52' 19,7''$ з. д. (озеро № 27, см. рис. 1)), которое находится в непосредственной близости к леднику. Ранее данный водоем имел уровень воды выше нынешнего (на 05.02.2020) на 3,5 м, склоны ледника содержат большое количество красных водорослей, вода озера мутная (36,8 ЕМФ). Максимальное значение CO_2 86,68 мкмоль измерено в небольшом искусственном водоеме, расположенном возле китайской научной станции ($62^\circ 12' 10,3''$ ю. ш., $58^\circ 58' 11,3''$ з. д. (озеро № 32, см. рис. 1)), принимающем твердые технические отходы станции, вследствие чего вода имеет характерный запах гниения. Значения для этого водоема не учитывались при расчете статистических параметров, однако упомянуть о возможных больших потоках углекислого газа с подобного рода водоемов необходимо с точки зрения сохранения антарктических уникальных ландшафтов и возможных рекомендаций по их защите.

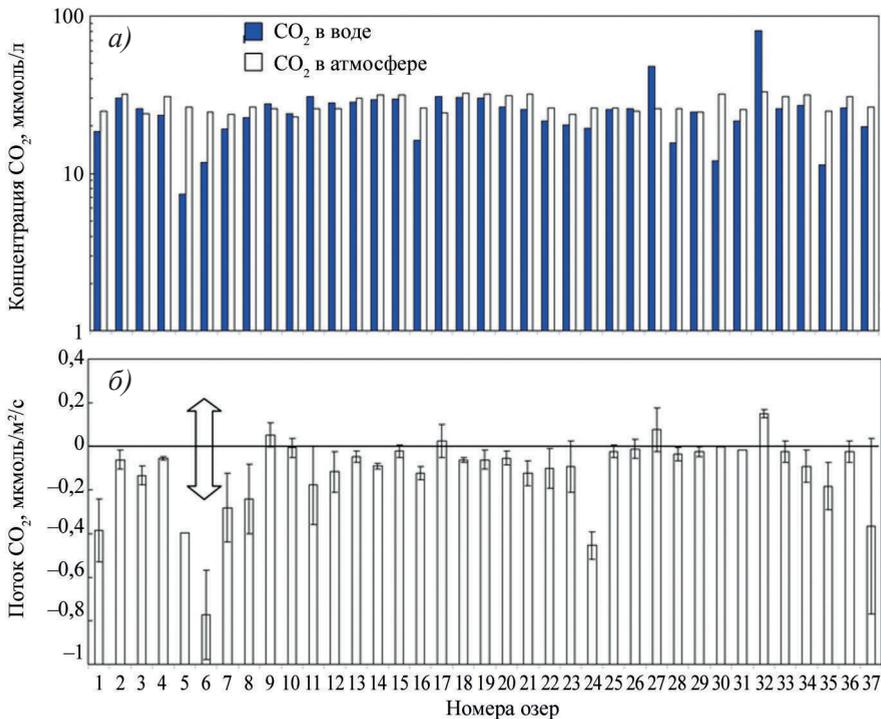


Рис. 5. Концентрация растворенного углекислого газа в воде озёр (pCO_2 (вода)) относительно равновесной концентрации в атмосфере (CO_2 (атм)) (а) и его потоки с поверхности озёр (б) в летний период (середина января — конец февраля 2020 г.).

Стрелками указаны эмиссия CO_2 в атмосферу (положительные значения) и поглощение CO_2 водным объектом (отрицательные значения). Места расположения озёр см. рис. 1

Fig. 5. The concentration of dissolved carbon dioxide in the water of the lakes (pCO_2 (water)) relative to the equilibrium concentration in the atmosphere (CO_2 (atm)) (a) and its flows from the lakes surface (b) during the summer period (mid-January — late February 2020).

The arrows indicate CO_2 emission into the atmosphere (positive values) and CO_2 absorption by a lake (negative values). The locations of the lakes are shown in Fig. 1

Пониженное содержание CO_2 в водах озер определяет преимущественно отрицательные величины потоков CO_2 (рис. 5б), что отражает поглощение CO_2 из атмосферы. Медианное значение потоков CO_2 для 37 озер составило $-0,06$ мкмоль/ $\text{м}^2/\text{с}$ ($-0,12 \pm 0,17$ мкмоль/ $\text{м}^2/\text{с}$, среднее \pm SD стандартное отклонение) при вариации от $-0,77$ до $+0,17$ мкмоль/ $\text{м}^2/\text{с}$. Более значимые потоки поглощения CO_2 из атмосферы характерны ручьям: медианное значение — $-0,52$ мкмоль/ $\text{м}^2/\text{с}$ при варьировании от $-0,14$ до $-0,95$ мкмоль/ $\text{м}^2/\text{с}$. Общая зависимость потоков диоксида углерода с водных поверхностей п-ова Файлдс от его концентраций в водных объектах приведена на рис. 6.

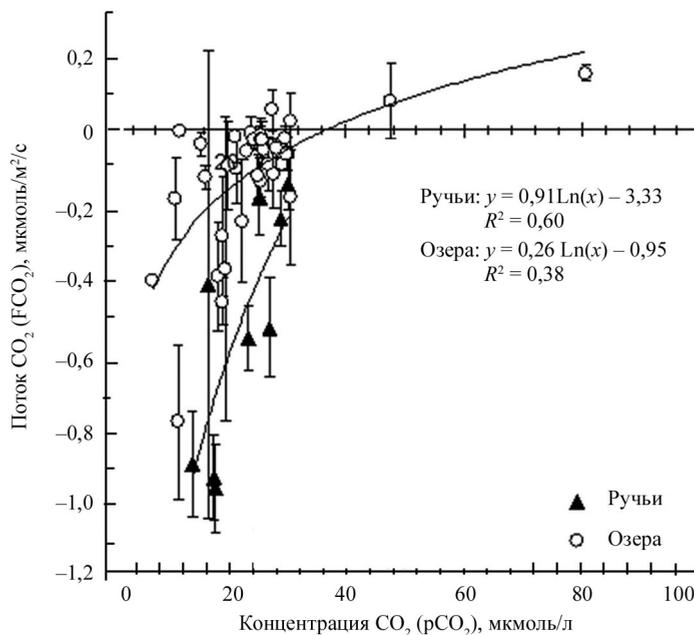


Рис. 6. Зависимость обменных потоков CO_2 с поверхности водного зеркала озер и ручьев от концентрации растворенного в воде CO_2

Fig. 6. The dependence of the CO_2 exchange fluxes from the surface of the lakes and streams on the concentration of dissolved CO_2

Потоки метана. В общей сложности определены потоки метана CH_4 с поверхности 101 водного объекта (рис. 7), включая поверхность водного зеркала и прилегающих территорий. Показано, что средние концентрации метана в воздухе при экспозиции камеры 2 мин над поверхностью озер площадью более 200 м^2 составляли от 7 до 14 ppm, водных объектов площадью от 50 до 200 м^2 — от 15 до 35 ppm, водных объектов площадью менее 50 м^2 — от 3 до 40 ppm. Интенсивнее всего выделение метана (свыше 1000 ppm за минуту) регистрировалось из отверстий в донных отложениях некоторых озер и малых водоемов. Самые низкие значения концентрации метана (0–3 ppm) улавливались с поверхности снежников. С прилегающей к водным объектам территории, которая характеризовалась усиленным водным режимом грунтов и наличием альго-бактериальных матов или мхов, концентрация

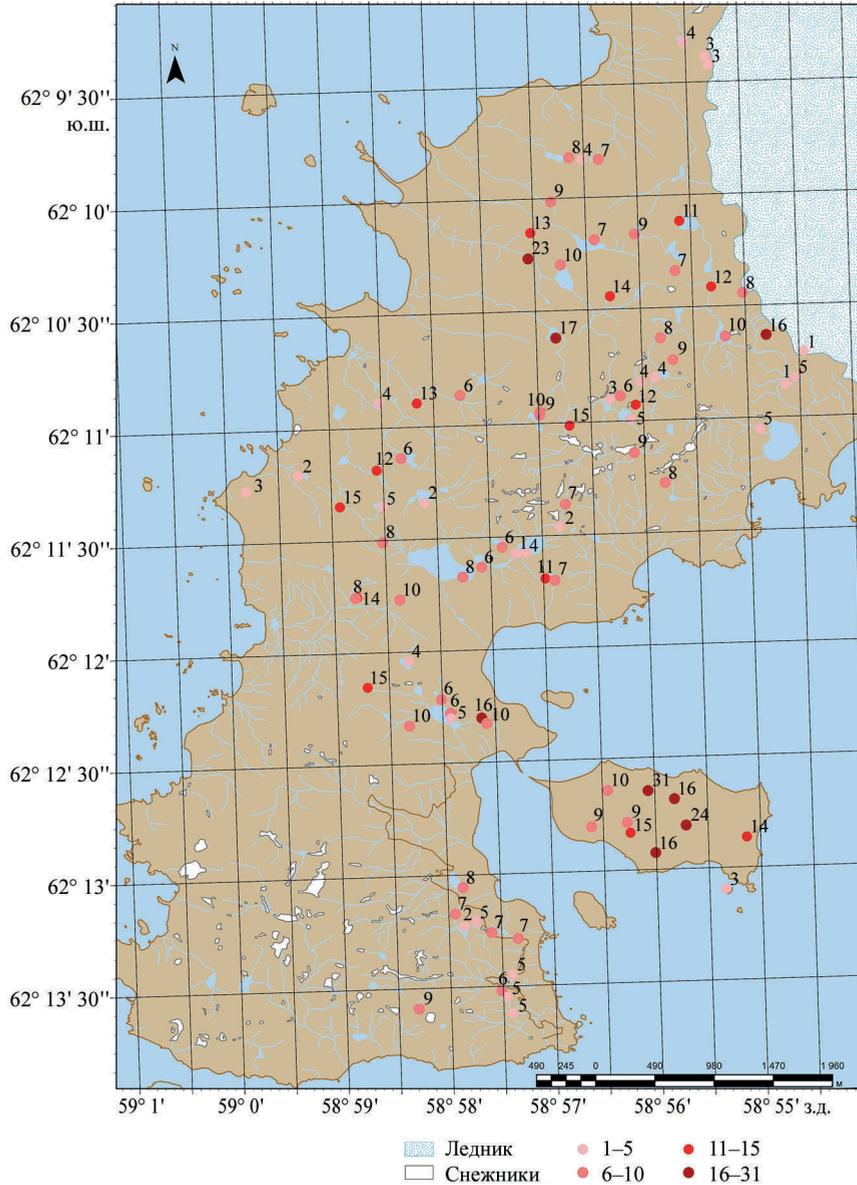


Рис. 7. Пространственное распределение значений эмиссии метана (CH_4) с поверхности озёр п-ова Файлдс

Fig. 7. Spatial distribution of methane emissions (CN_4) from the surface of Fildes Peninsula Lakes

метана в камере составляла от 0 до 15 ppm за 2 мин. С поверхности приледниковой морены величина концентраций регистрировалась в пределах 10–15 ppm, с поверхности ручьев в пределах 1–3 ppm. При анализе обобщенных данных выделения метана со всех исследованных водных объектов п-ова Файлдс был сделан вывод о том, что концентрация метана в образцах воздуха с поверхности водных объектов

увеличивалась по мере удаления водного объекта от ледника Коллинз. Исключение составляют водоемы о. Ардли, где высокая концентрация CH_4 в воздухе определялась в основном высоким содержанием органического вещества в орнитопочвах, которое подвергалось микробному разложению. Следует отметить, что концентрации метана, приведенные в данном исследовании, были зафиксированы при помощи течейска-теля метана SPD203 и представляют собой не столько количественную, сколько качественную характеристику. Тем не менее массив полученных данных и сравнение значений концентрации метана, улавливаемых течейска-телем SPD203 и переносным газоанализатором Picarro, которое было проведено в дальнейшем, позволяют определить диапазоны значений интенсивности выделения метана с поверхности водных объектов, где показания SPD203 в диапазоне 0–4 ppm соответствуют поглощению метана, а показания выше 5 ppm — его выделению.

Дискуссия

Изучением озер п-ова Файлдс (о. Кинг Джордж) занимаются многие ученые на протяжении десятков лет. Однако до сих пор остаются вопросы по специфике функционирования водных экосистем и их особенностям.

Подробные работы на гидрологической системе оз. Китеж п-ова Файлдс ранее проводились в январе–марте 2012 г. [12]. Неоднократно измерены расходы воды в ручьях, даны значения скоростей течения, уровней воды, приведены батиметрические характеристики озер. В январе 2012 г. расход воды в ручье из оз. Китеж изменялся от 0,06 м³/с (09 января) до 0,135 м³/с (11 января), после чего происходило его постоянное падение до 0,02 м³/с (26 марта). Для января 2020 г. характерны большие значения расходов воды и смещение пика на конец января. Максимальный расход 3 м³/с наблюдался 28 января 2020 г. Измеренные расходы водотока из оз. Китеж и других временных ручьев имели также большие значения, чем в летний сезон 2012 г., что, видимо, связано с метеорологическими характеристиками данного конкретного года, это обуславливает необходимость изучения многолетнего изменения заснеженности полуострова, динамики снежников и скоростей отступления ледникового склона.

Значения электропроводности озер летом 2020 г. соотносятся с ранее полученными в летний период 2013–2014 гг. значениями для озер п-ова Файлдс [2] и оазиса Холмы Ларсеманн [18]. Для водоемов п-ова Файлдс минерализация имела амплитуду 11–151 мг/л. В летние месяцы 2011–2015 гг. минерализация водоемов оазиса Холмы Ларсеманн варьировала от 11 до 970 мг/л, а антарктическим летом 2017–2018 гг. изменялась от 14,9 до 477 мг/л [10]. Отмеченное максимальное значение — 1500 мг/л. Для озер оазиса Ширмахера значения минерализации укладываются в те же пределы, что и для водоемов п-ова Файлдс.

Концентрация растворенного кислорода в воде всех водоемов оазисов в летний период довольно высокая, часто отмечается перенасыщение. Среднее значение летом 2020 г. в озерах п-ова Файлдс было 10,8 мг/л, или 85,63 %, а для тех же водоемов летом 2013–2014 гг. концентрация O_2 изменялась от 63 до 106 % насыщения [2].

В озерах п-ова Файлдс концентрации кремния имели меньшие значения и амплитуду летом 2020 г., чем летом 2013–2014 гг.: они изменялись от 0,01 до 2,80 мг/л при среднем измеренном значении 1,17 мг/л. Для озер других оазисов были зафиксированы другие значения. Так, для озер оазиса Холмы Ларсеманн концентрации кремния составляли от 16,98 мг/л в оз. Степед до 24,55 мг/л в оз. Прогресс в период 60-й РАЭ. Возможно, разница в значениях на порядок связана

с методами определения кремния, хотя в обоих случаях пробы анализировались после доставки замороженных проб в Санкт-Петербург в ААНИИ на одном и том же приборе.

По данным более ранних исследований [25], водоемы оазиса Ширмахера относятся к хлоридно-натриевым III типа, а для озёр п-ова Файлдс определено, что они, по большей части, хлоридно-натриевые II типа. Согласно [9] озера Китеж, Слаломное и Длинное п-ова Файлдс классифицированы как хлоридно-сульфатные и сульфатно-хлоридные, при этом отмечена изменчивость класса озёр от года к году. Так, для описанного в работе 2020 г. оз. Длинное нами отмечены сульфатно-кальциевые воды. В [2] отмечается также наличие III типа водоемов, что было выделено и для лета 2020 г. — шесть озёр имели III тип вод. В целом нужно отметить морское влияние на формирование гидрохимического состава вод — либо в результате поступления солей из почвы и верхнего слоя грунтов, обогащенных минералами после отступления моря при снижении его уровня, либо в результате аэрозольного привноса солей с морских заливов. Влияние морских аэрозолей на тип вод отмечается и в работе [10], в которой указана последовательность ионов по мере убывания их концентрации в воде $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ и $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$ для водоемов оазиса Холмы Ларсеманн, т. е. преобладающими ионами являются натрий и хлорид. Также факторами, формирующими ионный состав вод, являются тип поверхностного и грунтового притока в озеро, геологическое строение котловины, флора и фауна водосбора.

Анализ содержания биогенных элементов в озерах весьма сложен. Это во многом зависит от времени отбора проб в течение летнего сезона, от метеопараметров определенного года и, соответственно, от динамики численности гидробионтов, от глубины отбора проб и, наконец, от метода хранения, консервации и обработки материала. Достаточно низкое содержание минерального фосфора или азота может указывать на то, что данные элементы являются лимитирующими для роста первичной продукции в экосистеме водоема. Иногда значения нитратов в озерах могут варьировать очень значительно, в том числе в течение летнего периода. Так, в 2012 г. содержание нитратов в оз. Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн) не превышало 0,06 мг/л, а в 2015 г. составляло 0,11 мг/л. Для оз. Степед характерны большие различия: для 2012 г. отмечена концентрация 0,58 мг/л, для 2015 г. это значение было 0,14 мг/л [17]. В водоемах о. Кинг Джордж летом 2020 г. концентрация нитратов имела существенную амплитуду от 0 до 11,5 мг/л. В более ранних исследованиях [6] значения биогенных элементов могли достигать 0,49 мг/л для фосфатов (оз. Вильямс, Холмы Вестфольда), 0,41 мг/л для нитратов и 0,41 мг/л для ионов аммония (оз. Аце, Холмы Вестфольда). Для озёр вблизи станции Беллинсгаузена ранее были отмечены максимальные значения фосфатов 0,02 мг/л и 0,1 мг/л нитратов NO_3^- в оз. Длинное в летний сезон 2009–2010 гг. [9].

Для п-ова Файлдс в среднем концентрация фосфатов составляет 0,92 мг/л с амплитудой от 0 мг/л до 8,04 мг/л, а летом 2015 г. значения фосфатов в озерах оазиса Холмы Ларсеманн не превышали 0,05 мг/л. В некоторых озерах (Террасовое, Снежное, Радостное) отмечено большое содержание бактериальных матов, рачков, зеленых и красных водорослей, что позволяет сделать вывод о том, что именно разложение отмершего органического вещества приводит к повышению концентрации биогенных элементов в воде.

Данные по измерению растворенного углекислого газа и его потоков с поверхности озер показали, что все типы водных объектов п-ова Файлдс, как правило, характеризуются поглощением углекислоты из атмосферы, независимо от их размера и температурного режима. Полученные нами данные согласуются с ранее опубликованными в работе [22] для оз. Китеж. Поглощающая способность, вероятно, зависит от трофности водоемов или связана с иными природными факторами, которые будут выявлены в результате всестороннего анализа всех полученных материалов. Значительный поток метана в атмосферу с поверхности водоемов отмечается в непосредственной близости от края ледникового щита, с поверхности небольших озер, расположенных на обогащенной органическим веществом морене, а также с поверхности озер на о. Ардли в зоне расположения колоний пингвинов.

Самоочищающая способность водных экосистем ранее определялась для антарктических исследований для других оазисов. Так, согласно работе [17], для оз. Степед оазиса Холмы Ларсеманн отношение $D/P_{\text{вал}}$ равно 4,3, а для оз. Прогресс — 7,1. Для озер Верхнее и Водоросли оазиса Ширмахера $D/P_{\text{вал}}$ было 9,3 и 3,3 соответственно, что свидетельствует о высокой самоочищающей способности водоемов. Для озера Метановое на п-ове Файлдс отмечено существенное превышение деградации органического вещества над валовой первичной продукцией. Однако для озера Красных водорослей п-ова Файлдс получены значения $D/P_{\text{вал}} < 1$, что говорит о более высоком трофическом статусе некоторых водоемов о. Кинг Джордж. Наличие мезотрофных водоемов подтверждается количественными значениями биогенных элементов, а также большой биомассой фито- и зоопланктона в некоторых водоемах. Происходит заболачивание некоторых долин водотоков оазиса.

Ранее в работе [1] отмечалось, что, невзирая на малое биоразнообразие в антарктических оазисах, именно эти уникальные экосистемы могут служить индикаторами климатических изменений.

Заключение

Проведенные в январе–феврале 2020 г. исследования показали разнообразие параметров озер и небольших, зачастую временных, водных объектов. Водные экосистемы изменяются в течение непродолжительного летнего сезона, но в целом остаются довольно постоянными за многолетний период, что подтверждает выполненное сравнение характеристик за ряд лет [19, 2, 9, 12]. Можно только отметить наличие заболоченных территорий в некоторых долинах ручьев и приморских территориях, хотя это тоже, скорее всего, циклично, т. к. остатки мха были найдены в разрезах приледниковых морен [13]. Гидроэкологические процессы в малых водоемах п-ова Файлдс неоднозначны, полностью зависят от климатических и метеорологических особенностей и требуют дальнейшего изучения. Гидрохимические показатели водоемов свидетельствуют об увеличивающейся антропогенной нагрузке, а в работе [2] говорится еще о превышении содержания тяжелых металлов в воде озер вблизи антарктических научных станций на п-ове Файлдс. В данной работе выявлены высокие концентрации фосфатов в воде озер, отмеченные в районах гнездования птиц, что явно носит природный характер или возникает ввиду разбавления отложенного на дне органического вещества. Дальнейшее потепление на полуострове принесет неизбежное увеличение биоразнообразия и продолжение эвтрофирования озер.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Результаты анализа данных использованы для выполнения гранта Российского научного фонда (РНФ № 23-27-00201 «Создание электронного атласа озёр антарктических оазисов»). Анализ потоков метана проведен при поддержке гранта РНФ № 21-17-00163.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Российской антарктической экспедиции (РАЭ ААНИИ) за логистику исследований в период летнего сезона 65-й РАЭ, а также лабораториям ОШЛ ААНИИ и Ресурсному центру СПбГУ «Методы анализа состава вещества» за выполненные гидрохимические анализы.

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The results of the data analysis were used to the grant report of the Russian Scientific Foundation (RSF No. 23-27-00201 “Creation of an electronic atlas of Antarctic oases lakes”). Methane flux was analyzed within grant RSF No. 21-17-00163.

Acknowledgments. The authors express gratitude to the Russian Antarctic Expedition (RAE AARI) for the logistics of research during the summer season of 65 RAE and to the laboratories of the OSL AARI and the Resource Center of St. Petersburg State University “Methods of substance composition analysis” for the hydrochemical analyses performed.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Bargagli R. Atmospheric chemistry of mercury in Antarctica and the role of cryptogams to assess deposition patterns in coastal ice-free areas. *Chemosphere*. 2016;163:202–208. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.007>
2. Skorospelkova T.V., Fedorova I.V., Chetverova A.A., Alekseeva N.K., Verkulich S.P., Ёжиков И.С., Козачек А.В. Особенности гидрохимического режима водных объектов полуострова Файлдс (о. Кинг Джордж, Западная Антарктика). *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016;(2):79–91.
Skorospelkova T.V., Fedorova I.V., Chetverova A.A., Alekseeva N.K., Verkulich S.P., Yozhikov I.S., Kozachek A.V. Features of the hydrochemical regime of water bodies of the Files Peninsula (King George Island, West Antarctica). *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2016;(2):79–91. (In Russ.).
3. Симонов И.М. *Оазисы восточной Антарктиды*. Л.: Гидрометеиздат; 1971. 176 с.
4. Convey P., Chown S.L., Clarke A., Barnes D.K.A., Bokhorst S., Cummings V., Ducklow H.W., Frati F., Green T.G., Gordon S., Griffiths H.J., Howard-Williams C., Huiskes A.H.L., Laybourn-Parry J., Lyons W.B., Mcminn A., Morley S.A., Peck L.S., Quesada A., Robinson S.A., Schiaparelli S., Wall D.H. The spatial structure of Antarctic biodiversity. *Ecological Monographs*. 2014;84(2):203–244.
5. Laybourn-Parry J., Pearce D. A. The biodiversity and ecology of Antarctic lakes: models for evolution. *Phil. Trans. R. Soc. B*. 2007;362:2273–2289.
6. Laybourn-Parry J., Wadham J.L. *Antarctic Lakes*. Oxford University Press; 2014. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199670499.001.0001>
7. Kavan J., Nedbalova L., Nyvlt D., Tomas Č.E., Juan M.L. Status and short-term environmental changes of lakes in the area of Devil’s Bay, Vega Island, Antarctic Peninsula. *Antarctic Science*. 2021;33(2):150–164. <https://doi.org/10.1017/S0954102020000504>
8. Сократова И.Н. *Антарктические оазисы. История и результаты исследований*. СПб.: ААНИИ; 2010. 274 с.
9. Onishchuk N.A., Golobokova L.P., Vershinin K.E., Zhuchenko N.A. Hydrochemical composition of glacial lakes on inshore Russian Antarctic stations. *Geochemistry*. 2020; 80(3):125591. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125591>

10. Magesh N.S., Botsa S.M., Dessai S., Mestry M., Leitao T.D.L., Tiwari A. Hydrogeochemistry of the deglaciated lacustrine systems in Antarctica: Potential impact of marine aerosols and rock-water interactions. *Science of the Total Environment*. 2020;706:135822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135822>
11. Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Кокош Ю.Г., Саливончик С.В., Кудревич М.А., Гигиняк Ю.Г., Мямин В.Е., Лукашанец Д.А. Пространственные особенности химического состава снежного покрова Холмов Тала, Восточная Антарктида. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021;67(1):28–43. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-28-43>
Kakareka S.V., Kukharchyk T.I., Kokosh Yu.G., Salivonchik S.V., Kudrevich M.A., Giginyak Y.G., Myamin V.E., Lukashanets D.A. Spatial features of the chemical composition of Thala Hills surface snow, East Antarctica. *Arctic and Antarctic Research*. 2021;67(1):28–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-28-43>
12. 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. <https://doi.org/10.1080/16000870.2017.1317202>
13. Веркулич С.Р. Изменения климата, уровня моря и оледенения в краевой зоне Антарктиды в течение последних 50 тысяч лет. *Криосфера Земли*. 2022;26(2): 3–24. <https://doi.org/10.15372/KZ20220201>
Verkulich S.R. Changes in climate, sea level and glaciation in the regional zone of Antarctica over the past 50 thousand years. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2022;26(2):3–19. <https://doi.org/10.15372/KZ20220201>
14. Carrizo D., Sánchez-García L., Javier M.R., García-Rodríguez F. Discriminating sources and preservation of organic matter in surface sediments from five Antarctic lakes in the Fildes Peninsula (King George Island) by lipid biomarkers and compound-specific isotopic analysis. *Science of the Total Environment*. 2019;672:657–668. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.459>
15. Nabokin M. Faunistic analysis of freshwater zooplankton in small rock pools of Maritime Antarctica. *Ukrainian Antarctic Journal*. 2022;20(1):113–124. <https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2022.694>
16. Vincent W.F., Laybourn-Parry J. *Polar lakes and rivers — limnology of Arctic and Antarctic aquatic ecosystems*. Oxford University Press; 2008. 346 p.
17. Нигаматзянова Г.Р., Федорова И.В., Духова Л.А. Результаты мониторинга зоопланктонных сообществ пресноводных озер оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида). *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2015;8(1):56–65.
Nigmatzyanova G.R., Fedorova I.V., Dukhova L.A. Results of Monitoring the Zooplankton Communities of Freshwater Lakes Oasis of Larsemann Hills (East Antarctica). *Sovremennyye tendenzii razvitiya nauki i tehnologiy = Current trends in the development of science and technology*. 2015;8(1):56–65. (In Russ.).
18. Burdo A., Nikitina V., Abakumov E. Algae of terrestrial biotopes near the Russian Antarctic scientific station Bellingshausen, King George Island. *Biological Communications*. 2019;64(3):189–200. <https://doi.org/10.21638/spbu03.2019.303>
19. Поважный В.В. Гидробиологические наблюдения на станции Беллинсгаузен в период работы 52-й РАЭ. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2009;3(83):49–63.
Povazhny V.V. Hydrobiological observations at the Bellingshausen station during the operation of the 52nd RAE. *Problemy Arktiki I Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2009;3(83):49–63. (In Russ.).
20. Gregorich E.G., Hopkins D.W., Elberling B., Sparrow A.D., Novis P., Greenfield L.G., Rochette P. Emission of CO, CH₄ and N₂O from lakeshore soils in an Antarctic dry valley. *Soil Biology & Biochemistry*. 2006; 38:3120–3129. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.015>

21. Roldán D.M., Carrizo D., Sánchez-García L., Menes R.J. Diversity and effect of increasing temperature on the activity of methanotrophs in sediments of Fildes Peninsula Freshwater Lakes, King George Island, Antarctica. *Front. Microbiol.* 2022;13:822552. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.822552>
22. Thalasso F., Sepulveda-Jauregui A., Cabrol L., Lavergne C., Olgun N., Martinez-Cruz K., Aguilar-Muñoz P., Calle N., Mansilla A., Astorga-España M.S. Methane and carbon dioxide cycles in lakes of the King George Island, maritime Antarctica. *Science of the Total Environment.* 2022;848:157485. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157485>
23. Короткевич Е.С. *Полярные пустыни*. Л.: Гидрометеоздат; 1972. 420 с.
24. SCAR Composite Gazetteer of Antarctica. Available at: <https://data.aad.gov.au/aadc/gaz/scar/> (accessed: 12.03.2024).
25. Bidigare R.R., Ondrusek M.E., Kennicutt M.C. II, Iturriaga R., Harvey H.R., Hoham R.W., Macko S.A. Evidence for a photoprotective function for secondary carotenoids of snow algae. *J. Phycol.* 1993;29(4):427–434. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1993.tb00143.x>
26. Дмитриев В.В., Боброва О.Н., Грачева И.В., Колодкин П.А., Примак Е.А., Седова С.А., Четверова А.А. Мониторинг и моделирование продукционно-деструкционных отношений в водных экосистемах. *Успехи современного естествознания*. 2019;(1): 82–87.
Dmitriev V.V., Bobrova O.N., Gracheva I.V., Kolodkin P.A., Primak E.A., Sedova S.A., Chetverova A.A. Monitoring and modeling of production and destruction relations in aquatic ecosystems. *Uspexhi sovremennogo estestvoznaniya = Successes in modern natural science*. 2019;(1):82–87. (In Russ.)
27. Алекин О.А. *Основы гидрохимии*. Л.: Гидрометеорологическое издательство; 1970. 444 с.