



Трансформация экосистем Ecosystem Transformation www.ecosysttrans.com

Гидрологический и биологический режимы озер Восточной Антарктиды

А.Н. Шаров^{1*}, А.В. Толстикова²

¹ Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанова РАН, 152742, Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109

² Институт водных проблем Севера (обособленное подразделение Карельского научного центра РАН), 185030, Россия, Республика Карелия, Петрозаводск, пр. Александра Невского, д. 50

*sharov_an@mail.ru

Поступила в редакцию: 18.03.2020
Принята к печати: 26.04.2020
Опубликована онлайн: 03.07.2020

DOI: 10.23859/estr-200318
УДК 574.5

ISSN 2619-094X Print
ISSN 2619-0931 Online

В работе рассмотрены особенности гидрологического и биологического режимов разнотипных озер оазисов Восточной Антарктиды: Холмы Тала, оазис Ширмахера и Холмы Ларсеманн – в летний период 2010–2011 гг. В озерах, покрытых льдом, отмечена обратная температурная стратификация. В придонном горизонте воды температура (около 4 °С) близка к значениям, характерным для воды с максимальной плотностью. На вскрывшихся мелких озерах наблюдается изотермия, вода в некоторых водоемах прогревается до 8 °С. Донные сообщества цианобактерий и беспозвоночных представляют собой основную биологическую компоненту озер, в которых отсутствует классическая пищевая цепь и преобладает микробная петля. Исследования показали, что 3-метровый слой льда пропускает достаточное количество света даже до глубины 30 м. Свет не лимитирует развитие водорослей и цианобактерий. Однако низкое содержание биогенных веществ в воде ограничивает рост фитопланктона, обуславливая низкие значения биомассы (менее 0.01 мг/л) и концентрации хлорофилла а (0.1–0.45 мкг/л). Отмечена тенденция изменения климата в районе оазиса Ширмахера. В последние десятилетия некоторые озера, постоянно покрытые льдом в середине прошлого века, начали вскрываться в летние месяцы. В период, когда озеро находится подо льдом, устанавливается гомотермия с температурой воды 4 °С. После вскрытия водоема в результате ветро-волнового выхолаживания температура воды падает до 0.5–1 °С.

Ключевые слова: антарктические озера, донные сообщества, фитопланктон, хлорофилл, изменчивость климата.

Шаров, А.Н., Толстикова, А.В., 2020. Гидрологический и биологический режимы озер Восточной Антарктиды. *Трансформация экосистем* 3 (3), 77–86.

Введение

Экологические факторы, в том числе изменение климата и деятельность человека, имеют большой потенциал для воздействия на биологические сообщества озер посредством различных процессов, особенно заметных в полярных райо-

нах, где небольшие изменения в ледовых режимах и поступлении биогенных веществ могут иметь большой отклик (Филатов и др., 2013; Quesada et al., 2006). Функционирование исследовательских станций может быть важным фактором смены химических режимов в антарктических озерах (Ша-

ров и Толстикова, 2018). Например, поступление сточных вод и интенсивное разрушение пород гусеничными транспортными средствами (увеличение выветривания) способно привести к эвтрофикации озер (Ellis-Evans et al., 1997).

Восточная Антарктида представляет собой докембрийскую континентальную платформу. Ее чехол состоит в основном из морских осадков, перекрытых молодыми ледниковыми отложениями. Структура отложений свидетельствует о существенных изменениях климата в этом регионе (Филатов и др., 2013; Vincent and Laybourn-Parry, 2008). Большинство пресноводных озер Восточной Антарктиды большую часть года покрыты льдом. Они считаются чувствительным индикатором современных климатических изменений. Озера антарктических оазисов до сих пор являются слабо изученными природными объектами (Шаров и Толстикова, 2018).

Цель работы заключалась в выявлении особенностей современного состояния гидрологического и биологического режимов типичных озер антарктических оазисов, а также в сравнении новых данных с результатами, полученными ранее. Для выполнения работы были поставлены следующие задачи: выявление изменчивости гидрофизических и гидрохимических параметров, исследование особенностей структуры биологических сообществ озер и структуры донных осадков.

дование особенностей структуры биологических сообществ озер и структуры донных осадков.

Материалы и методы

Исследования антарктических озер проводились в рамках работы 56 Российской антарктической экспедиции Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) в период с декабря 2010 г. по апрель 2011 г. Изучались озера в оазисе Холмы Тала в окрестностях станции Молодежная (S 67°40', E 45°51') с 19.12.2010 по 06.02.2011; в оазисе Ширмахера в окрестностях станции Новолазаревская (S 70°44'–70°64'; E 11°20'–11°55') – с 09.02.2011 по 06.03.2011; в оазисе Холмы Ларсеманн у станции Прогресс (S 69°22', E 76°23') – 22.03.2011 (Рис. 1).

В оазисе Холмы Тала исследовались 13 озер, было собрано 26 проб фитопланктона, 15 – зоопланктона, 9 проб для анализа содержания хлорофилла *a*, 15 – гидрохимических проб, 7 колонок донных отложений. В оазисе Ширмахера работы проводились на 11 водоемах, взяты 12 проб фитопланктона, 10 – перифитона, 10 – для анализа содержания хлорофилла *a* в планктоне. В оазисе Холмы Ларсеманн проведены работы на трех озерах: Прогресс, Рейд, Степед. Здесь были отобра-

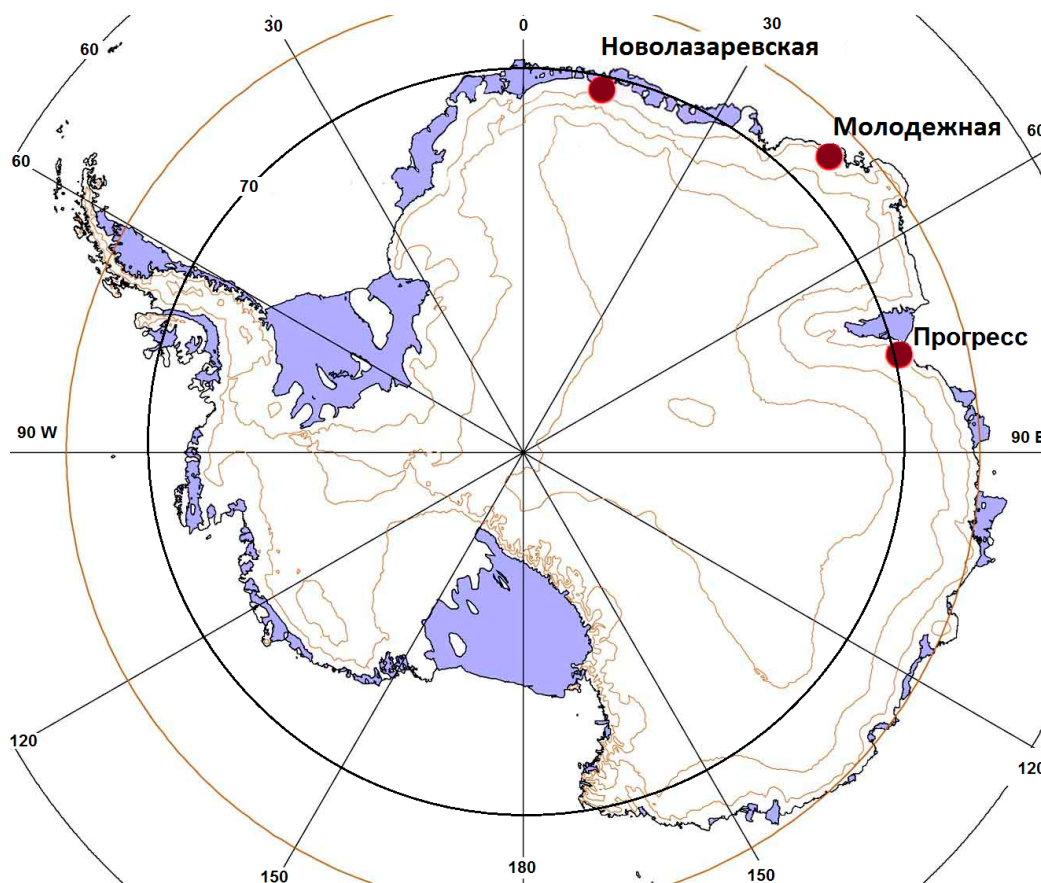


Рис. 1. Районы исследований, проведенных в ходе 56-й Российской Антарктической экспедиции.

ны 3 пробы фитопланктона и 2 – зоопланктона, а также 3 колонки донных отложений.

Работы включали в себя зондирование водной толщи озер при помощи CTD-зонда Quanta (США). Взятие проб осуществлялось батометром Рутнера (2 л), планктонной сетью Апштейна (сито № 64) и трубчатым дночерпателем (стратометром) в соответствии с ГОСТ Р 52.24.353-2012. Биологические пробы фиксировали 4% формалином или 96% спиртом, микробиологические пробы хранили в замороженном виде. Первичная обработка биологических проб выполнялась на антарктических станциях с использованием бинокюляра МБС 9 и стереомикроскопов Биомед и Микромед-1. Пробы фитопланктона концентрировали осадочным методом. Для определения концентрации хлорофилла *a* в планктоне воду пропускали через фильтры с диаметром пор 22 мкм.

Результаты и обсуждение

Озера оазисов Холмы Тала и Ширмахера представляют собой озерные системы, котловины которых расположены на разных уровнях друг относительно друга и связаны между собой временными водотоками, прорывающимися через ледяные дамбы раз в год или раз в несколько лет в теплое время. В результате данного процесса перераспределяются значительные объемы воды, соответственно, происходит колебание уровня озер, отмечается изменение структуры озерных экосистем. Этот процесс оказывает самое мощное воздействие на экосистемы озер в многолетнем аспекте. Периодичность прорывов, по-видимому, отражает колебания климата, поскольку теоретически это должно происходить в наиболее теплые годы после накопления значительных объемов воды в котловинах озер. Однако данный вопрос требует дополнительного исследования.

Для глубоких приледниковых озер характерна обратная температурная стратификация, а для мелких вскрывшихся ото льда водоемов летом отмечается изотермия. Тепло поступает за счет стока талых вод, а также интенсивной солнечной радиации, проходящей через ледяной покров. Большое значение в тепловом режиме озер имеет появление закраин в теплое время года.

Станция Молодежная (оазис Холмы Тала)

По структуре водной массы и объему воды изученные озера оазиса Холмы Тала можно разделить на три типа:

Глубокие озера, покрытые льдом в течение всего года. Характеризуются обратной температурной стратификацией, температура придонных вод около 4 °С. Летом образуются закраины. К этому типу относится всего 2 озера: Лагерное (глубина 5 м) и Глубокое (глубина 30 м).

Мелкие озера, промерзающие до дна. В теплое время года по берегам образуются закраины, однако большую часть озера покрывает лед. Насчитывается 3 озера данного типа (Овальное, Стоковое, Разливное), их глубина составляет около 3 м.

Мелкие озера (более 10, большинство не имеют названий), ледяной покров которых летом сходит полностью, и формируется изотермия водной массы. Глубины исследованных озер – менее 2 м.

При сравнении наших результатов с данными, полученными за многолетний период (Симонов, 1971; Каур, 1998), не выявлено существенного изменения гидрофизических параметров в озерах оазиса Холмы Тала. Следовательно, в данном районе Антарктики ярких примеров изменения климата не отмечено.

Самое большое озеро в районе станции Молодежная (Холмы Тала) – оз. Глубокое. Его дно каменистое и покрыто многослойным цианобактериальным матом. Черно-зеленая слоистая структура осадков говорит о цикличности различных условий освещения и кислородного режима. Согласно определению по L.J. Stal (1995), цианобактериальные маты в оз. Глубоком могут быть отнесены к категории гладкого типа. Керны донных отложений, собранные в озере из максимальных глубин (30 м) в течение исследуемого периода, имели длину около 40 см, а четкий верхний слой (15 см) этих отложений был представлен бактериальной слизью из цианобактерий.

В оз. Глубоком отмечались значения температуры воды около 0 °С непосредственно в пробуренных лунках, 4–4.1 °С в подледном слое воды и 4.2–4.3 °С в придонном слое (Рис. 2).

Средние значения электропроводности колебались от 0.020 мСм/см на поверхности до 0.042 мСм/см в толще воды озера и 0.053 мСм/см в придонном слое. По данным Е. Каур (1998), показатель рН в оз. Глубоком в 1968 г. составил 6.8, а в 1988 – 7.1. В период наших наблюдений рН соответствовал значениям 7.3–7.5 для горизонта, находящегося сразу подо льдом. Значения рН в придонном слое воды изменились с 6.7 (декабрь 2010 г.) до 7.2 (февраль 2011 г.). Среднее значение рН воды соответствовало нейтральной реакции среды, однако отмечались вариации, связанные с биологической активностью озер. Так, в течение января 2011 г. наблюдалось смещение значений рН в щелочную область в подледном (до 7.5) и придонном (7.2) слоях. Концентрация кислорода характеризовалась его пониженным содержанием в придонном слое (35–40%) в декабре 2010 г. и увеличением до значений 80–90% в январе 2011 г.

В толще воды оз. Глубокого концентрация хлорофилла *a* была на пределе значений определения и колебалась от 0.1 до 0.45 мкг/л (Sharov et al., 2015). Величины первичной продукции в 2011 г. сопоставимы с отмеченными в октябре – декабре

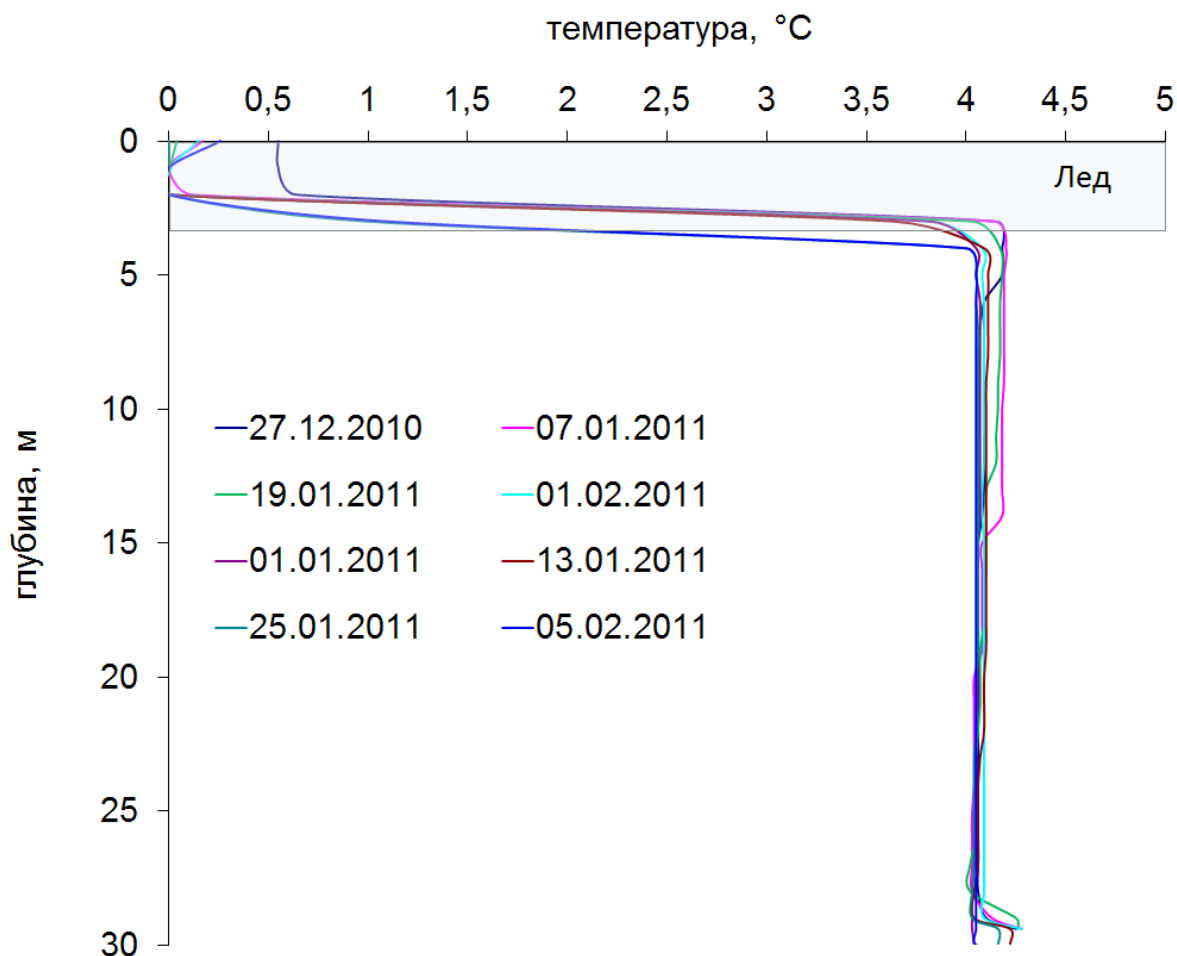


Рис. 2. Результаты измерения температуры воды в оз. Глубоком (оазис Холмы Тала).

1988 г, когда диапазон колебаний составлял от 0.2 до 4.8 мг С/(м³·сутки) (Каур, 1998). По уровню концентрации хлорофилла *a* в 2011 г. оз. Глубокое относится к ультра-олиготрофному типу, что характерно для большинства полярных озер (Vincent and Laybourn-Parry, 2008). Диапазон значений хлорофилла *a* в оз. Глубоком сопоставим с другими озерами Восточной Антарктиды, например, оз. Верхнее, оз. Дружбы и оз. Крукед (менее 1 мкг/л) (Henshaw and Laybourn-Parry, 2002), а также с озерами других районов Антарктики (0.5–3.0 мкг/л) (Andreoli et al., 1992; Contreras et al., 1991; Laybourn-Parry et al., 1992). Более высокие концентрации хлорофилла *a* были отмечены в самой глубокой зоне в результате седиментации (Contreras et al., 1991; Priddle et al., 1986).

В толще воды были обнаружены единичные экземпляры планктонных водорослей и организмов зоопланктона. Максимальное обилие планктонных организмов наблюдалось в январе, в период высоких температур воздуха в районе озера. Мы не обнаружили планктонные организмы в образцах, взятых из верхнего слоя (0–5 м) воды подо льдом, но они были найдены в интегрированных (весь столб воды) сетных пробах и на поверхности донных

осадков. Следовательно, можно предположить, что они концентрируются в придонном слое воды.

Многочисленные одиночные зеленые клетки микроводорослей (2–5 мкм) присутствовали в пробах в течение всего периода наблюдений. Представители фитопланктона больших размеров, например, колонии из четырех клеток (10–15 мкм) цианобактерий *Chroococcus turgidus* (Kützing) Nägeli, 1849, некоторые виды зеленых водорослей и диатомовых (8–35 мкм), являлись заметными компонентами в планктоне только в январе. Наиболее распространенными видами в планктоне были зеленые водоросли *Pediastrum duplex* var. *gracillimum* West & G.S. West, 1895 и *Chlamydomonas* sp., а также цианобактерии *Planktolyngbya limnetica* (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg, 1992 и *C. turgidus* (Sharov et al., 2015).

Диатомовые не играют важной роли в планктоне озера Глубокого; в разные периоды были обнаружены только несколько видов с низкой численностью. Наиболее частыми среди них были *Cyclotella kuetzingiana* Thwaites, 1848, *Diatoma tenuis* C. Agardh, 1812, *Synedra* sp. и *Fragilaria* sp.

В зоопланктоне были обнаружены коловратки *Lepadella patella* Müller, 1773, *Keratella cochlearis*

Gosse, 1851 и *Mniobia* sp. с очень низкой численностью 0–25 экз./л.

Основной биоценоз оз. Глубокого представлен цианобактериальными матами, в которых помимо цианобактерий присутствуют зеленые и диатомовые водоросли. Доминировали в донных матах представители цианобактерий из родов *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Nostoc*, *Pseudanabaena* и *Lyngbya*.

Беспозвоночные животные, связанные с цианобактериальными матами, были представлены коловратками (*Lepadella patella*, а также несколько видов *Bdelloidea*) и тихоходками, нематоды не обнаружены. Несколько видов коловраток *Bdelloidea* из семейства *Philodinidae* преобладали, достигая достаточно высокого обилия (до 1000 экз./м²). Тихоходки *Macrobiotidae* – также общий компонент бактериальных матов, однако их обилие было заметно ниже (100–500 экз./м²).

Чрезвычайно короткий летний сезон (примерно 1–1.5 месяца) и практически полное отсутствие поступления биогенных веществ с водосбора из-за многолетнего ледяного покрова приводят к ограниченной роли фитопланктона с преобладанием малых форм, таких как пикопланктон (< 2 мкм), что, скорее всего, является общей чертой многих озер данного региона. Например, в озерах северной части Земли Виктории пикопланктон составлял 50% всего фитопланктона (Andreoli et al., 1992). Кроме того, фитопланктон оз. Кривого (Холмы Вестфолл, Восточная Антарктида) также относится к пикопланктону (Laybourn-Parry et al., 1992). Появление мелких водорослей и цианобактерий в таких озерах может быть адаптацией для улучшения переноса питательных веществ вследствие увеличения удельной площади поверхности этих организмов (Gibson et al., 2006).

Благодаря высокой прозрачности воды и отсутствию снежного покрова на льду, солнечная радиация проникает до дна глубоких озер (Рис. 3). В оз. Глубоком, несмотря на трехметровый слой льда в летний период, 10–15% от измеренной проходящей солнечной радиации достигает глубины 30 м, составляя 3 Вт/м². Количество поступающей коротковолновой радиации (0.4–0.7 мкм) насчитывает в среднем 276 Вт/м² (максимум до 1200 Вт/м²). Средняя освещенность во всей толще воды была более 14 Вт/м².

Известно, что свет лимитирует развитие фитопланктона лишь при 7.0–1.6 Вт/м² (Reynolds, 2006). Согласно I. Hawes (1990), низкое обилие фитопланктона в антарктических озерах можно объяснить тем фактом, что, хотя интенсивность света и увеличивает скорость фотосинтеза, температура по-прежнему остается на низком уровне и ограничивает синтез белка, а следовательно, и рост организмов. Кроме того, в условиях острого недостатка питательных веществ высокий уровень освещенности может быть смертельным для био-

ты (Talling, 1979). Тем не менее, есть несколько исключений; например, в оз. Ваттс (холмы Вестфолд) фотосинтез не был обнаружен в июле к середине зимы, но достигал уровня 0.21 мкг С/(л·час) в августе и поднимался до максимума 6.39 мкг С/(л·час) в середине сентября (Heath, 1988). Такие данные свидетельствуют, что фитопланктон может быть адаптирован к низким уровням освещенности, низким температурам и ограничению питательных веществ (Gibson et al., 2006; Sharov et al., 2015). Значительная часть планктонных бактерий (до 75%) имеет экзоферментный потенциал и, следовательно, может использовать больше углеводов, белков и липидов (Ellis-Evans, 1981).

Воздействие человека может способствовать химическим изменениям поверхностных вод на водосборе, что приводит к увеличению количества биогенных веществ в озере (Kaup et al., 2001). В 1967–1968 гг. (MacNamara, 1970) содержание фосфатов в воде оз. Глубокого достигло 460 мкг Р/л, аммиака – 1300 мкг N/л в результате загрязнения вод от станции Молодежной. Возможность эвтрофикации озер при поступлении биогенных веществ из антропогенных источников в различных районах Антарктиды, в том числе холмах Тала в 1960–1980 гг., уже была показана ранее (Kaup, 1998). Результаты предыдущих исследований (Шаров и Толстиков, 2018; Sharov et al., 2015) свидетельствуют о наметившемся процессе очищения и возвращения оз. Глубокого в природное естественное состояние. Возможно, это связано с тем, что после прекращения эксплуатации станции Молодежная в большинстве сезонов с 1998 г. поступление биогенных веществ с водосбора снизилось.

Детальное изучение видового состава донных цианобактериальных матов (на глубине 5 м и 27 м) в оз. Глубоком было проведено в 1969–1970 гг. путем идентификации бактерий и водорослей после выращивания в лабораторных условиях (Starmach, 1995). Всего 85 таксонов водорослей были определены для всех озер Холмов Тала: *Cyanobacteria* – 54, *Chrysophyceae* – 1, *Xanthophyceae* – 10 и *Chlorophyceae* – 20 таксонов, в том числе 15 таксонов в оз. Глубоком (Starmach, 1995). Все виды водорослей и цианобактерий, найденные в 2010–2011 гг. (Sharov et al., 2015) на глубине 30 м в оз. Глубоком уже были обнаружены в 1969–1970 гг. (Starmach, 1995).

Экосистема оз. Глубокого характеризуется бедным видовым составом биоты. Наиболее распространенные животные – придонные коловратки и тихоходки. Эти беспозвоночные обитают на поверхности донных осадков и цианобактериальных матов, не опускаясь ниже верхнего слоя толщиной в несколько сантиметров; источником пищи им служит бактериальный детрит. Найденные здесь организмы были обнаружены в цианобактериальных матах из разных озер других рай-

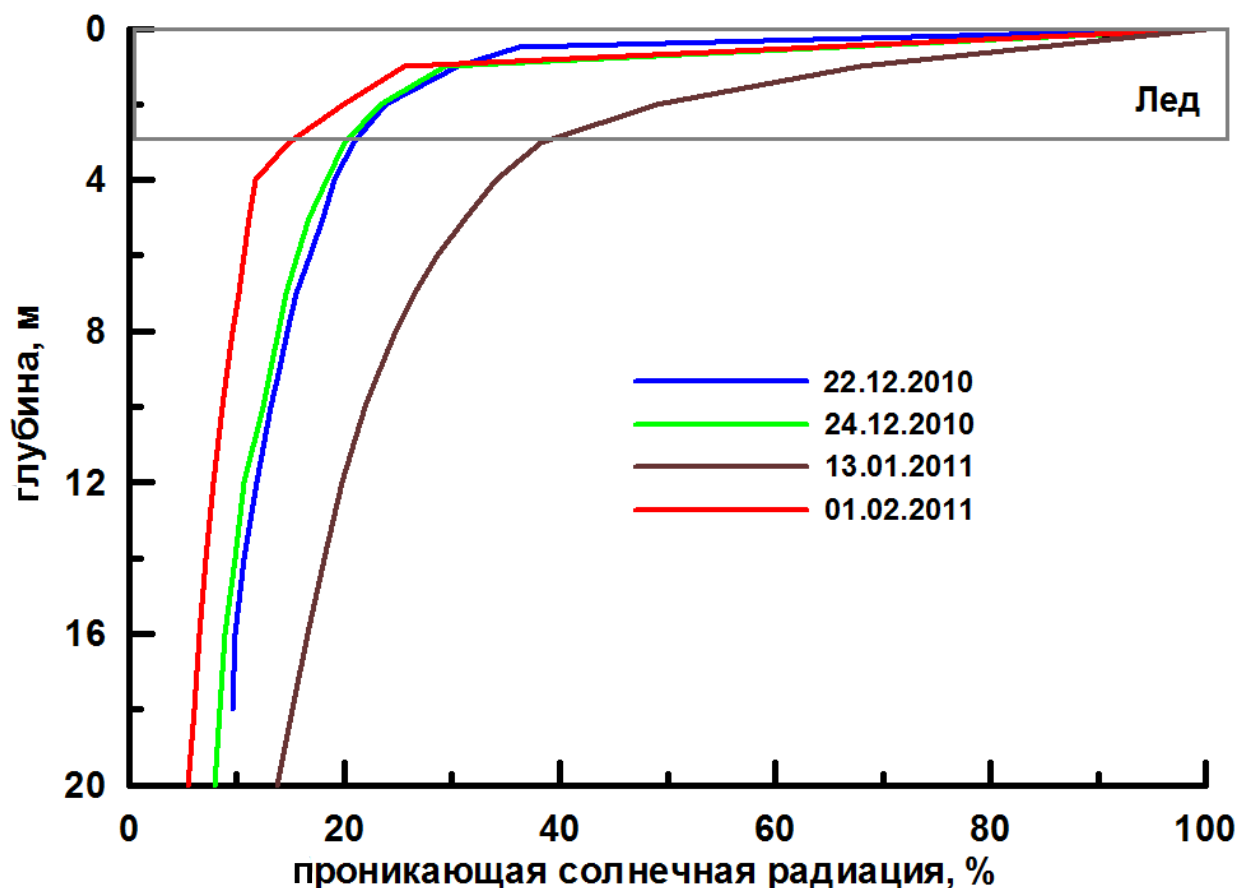


Рис. 3. Изменение поступающей коротковолновой радиации (оз. Глубокое, оазис Холмы Тала).

онов Антарктики, в том числе и небольших озер района Холмов Тала (Dartnall and Hollowday, 1985; Hansson et al., 2012; Hodgson et al., 2010; Ingole and Parulekar, 1993; McInnes and Pugh, 1998; Opalinski, 1972; Sanyal, 2004; Verlecar et al., 1996 и т.д.).

Другие озера в районе станции Молодежная были исследованы один раз, в летний период 2011 г. (Филатов и др., 2013). Видовой состав фитопланктона был крайне беден. В озерах преобладали бентосные формы водорослей и цианобактерий, однако в результате ветро-волнового перемешивания воды часть организмов фитобентоса и фитоперифитона оказывались в планктоне в большом количестве. Видовой состав фитопланктона был в целом аналогичен составу оз. Глубокое, доминировали цианобактерии из родов *Oscillatoria* и *Phormidium*. Общая биомасса фитопланктона составляла в среднем 0.02 ± 0.01 мг/л, а содержание хлорофилла *a* – 0.2 ± 0.1 мкг/л.

Станция Новолазаревская (оазис Ширмахера)

11 озер в районе станции Новолазаревская были исследованы в конце летнего сезона 2011 г. Озера региона относительно хорошо изучены благодаря долговременным исследованиям, начатым в 1959 г. Изученные озера в оазисе Ширмахера

делятся на 3 типа: постоянно покрытые льдом (Смирнова, Ледяное), вскрывающиеся (Верхнее, Поморник, Глубокое, Геодезистов, Красное, Зуб), эпিশельфовые (Привальное). Хорошим индикатором изменения климата является многолетняя динамика изменчивости льда в теплый период, его толщина и площадь покрытия. Известно (Захаров, 1970), что оз. Глубокое в 60–70-х гг. XX в. было не вскрывающимся, толщина льда в нем достигала 3–3.5 м. В настоящее время данный водоем каждое лето полностью освобождается от ледяного покрова. Кроме того, на карте 1972 г. (Т-05478 от 29.05.1972, подготовлена Союзморниипроект по состоянию на январь 1961 г.) видно, что конфигурация некоторых озер (например, Верхнего и Глубокое) отличается от современной, так как часть поверхности закрыта снежниками, в настоящее время отсутствующими. Все это, вероятно, свидетельствует о наблюдающемся потеплении климата в районе оазиса Ширмахера.

По сравнению с водоемами оазиса Холмы Тала, в оазисе Ширмахера активнее протекают процессы абляции, что приводит к увеличению периода открытой воды у вскрывающихся озер, включая самые глубокие водоемы. После схода льда достаточно быстро происходит конвекция, нарушается температурная стратификация вскрывающихся

озер и наступает изотермия водной массы. Динамика гидрофизических параметров приледниковых озер оазиса Ширмахера в период наших исследований также показала развитие в них конвекции за счет талой воды. В целом здесь отмечались те же процессы, что и на глубоких озерах оазиса Холмы Тала (Лагерном и Глубоком) в конце января – начале февраля. Среди объектов наших исследований лишь в эпишельфовом озере Привальном отмечалась прямая стратификация, однако выявленные градиенты были небольшими.

Содержание хлорофилла *a* в воде исследованных озер составляло от 0.05 до 0.25 мкг/л. Наименьшие концентрации были обнаружены в оз. Верхнем, вода которого используется для водоснабжения станции. Такие концентрации крайне низки даже для озер Антарктиды (Andreoli et al., 1992; Contreras et al., 1991; Henshaw and Laybourn-Parry, 2002; Laybourn-Parry et al., 1992).

В районе оазиса Ширмахера известно 218 видов цианобактерий и водорослей (The Shirmacher..., 1995). Помимо планктона озер, это число включает организмы, населяющие донные, на скальные и снежные местообитания. Во время наших исследований фитопланктон озер характеризовался крайне низкой численностью. Кроме характерных для Антарктики цианобактерий родов *Oscillatoria*, *Nostoc*, *Gloecapsa*, *Chroococcus*, *Phormidium* и *Lyngbya*, а также вида *Stenomitos frigidus* (= *Pseudanabaena frigida*) (F.E. Fritsch) Miscoe & J.R. Johansen, 2016, были обнаружены типичные представители фитопланктона северных озер: диатомовые водоросли *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen, 1979, *Lindavia comta* (= *Cyclotella comta*) (Kützing) Nakov, Gullory, Julius, Theriot & Alverson, 2015, *Tabellaria fenestrata* (Grunow) Skabichevskii, 1960, *Diatoma elongatum* (Lyngbye) C. Agardh, 1824, *Asterionella formosa* Hassall, 1850, *Fragilaria pinnata* Ehrenberg, 1843, зеленые водоросли *Crucigenia* spp., *Scenedesmus* spp. и харовые *Cosmarium* spp. Основные скопления организмов были в цианобактериальных матах и перифитоне. На дне озер преобладали цианобактерии *Stenomitos frigidus* (*Phormidium frigidum*) (F.E. Fritsch) Miscoe & J.R. Johansen, 2016.

Станция Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн)

Исследования в районе станции Прогресс проводились в марте 2011 г. Были исследованы озера Прогресс, Рейд и Степпед, в которых в это время зафиксирована обратная температурная стратификация. Насыщение кислородом в момент измерения во всех озерах составляло 100% по всей толще водной массы. По сравнению с другими антарктическими озерами, озера оазиса Холмы Ларсеманн солоноватоводные, что, по-видимому, обусловлено влиянием горных пород, слагающих

озерную котловину, а также близостью моря Содружества.

На оз. Прогресс выделяется эпилимнион мощностью 18 м, металимнион – от 18 до 22 м, и гипolimнион – от 20 до 31 м. В придонном горизонте воды температура (около 4 °С) близка к значениям, характерным для воды с максимальной плотностью. Соленость водной массы у дна составляет 0.2‰, что является наименьшим значением среди всех озер оазиса Холмы Ларсеманн. Значения pH близки к показателям нейтральной среды (7.12 на поверхности и 7.34 – в придонном слое).

Глубина оз. Рейд в районе австралийской полевой базы Low достигает около 5 м, толщина льда – 40 см. В точке наших измерений температура воды (4.2 °С) соответствовала значениям, свойственным для воды с максимальной плотностью. Это наиболее соленое из трех исследованных нами озер (1.6 на поверхности, 2.5‰ у дна). Значение pH – 7.18.

На оз. Степпед максимальная глубина составила 5 м, толщина льда во время измерений – 20 см. Температура воды в лунке – 0.80 °С, подо льдом – 3.33 °С, а у дна – 4.48 °С. Соленость озера – 1.1‰, pH – 7.07.

В озерах были обнаружены донные осадки черного цвета и интенсивное выделение газа с характерным болотным запахом, что говорит о проходящих здесь анаэробных процессах. На оз. Рейд и Степпед наблюдалось массовое всплытие цианобактериальных матов. Большинство из них вморожено в лед на различных слоях, высохшие маты лежали по берегам озера. В поверхностном слое донных обрастаний обнаружены скопления различных видов цианобактерий, водорослей и коловраток Bdelloida. Основу матов составляют нитчатые цианобактерии Oscillatoriales. В донных матах оз. Степпед были обнаружены тихоходки (10 экз./мг), нематоды и два вида коловраток *Lepadella patella* и *Philodinidae* sp., различные виды цианобактерий и отмершие диатомовые водоросли. В толще воды в большом количестве присутствовали ветвистоусые ракообразные *Daphniopsis studeri* Ruhe, 1914 (более 1000 экз./м³), причем у дна их численность увеличивалась. Обильное развитие беспозвоночных в оз. Степпед, вероятно, связано с гнездованием поморников, приносящих с пометом большое количество биогенных веществ.

На дне некоторых озер Антарктиды обнаружен мох (Короткевич, 1958; Симонов, 1971; Kurbatova and Andreev, 2015; Li S.-P. et al., 2009). В оазисе Холмы Тала нами не было найдено ни одного озера с содержанием мха в донных пробах, в то время как в озерах оазисов Ширмахера и Холмы Ларсеманн он встречается часто. Мох на дне оз. Глубокого (оазис Ширмахера) имеет три ярко выраженных слоя на разной глубине колонки. Скопления

стеблей говорят о благоприятных для роста мха условиях в определенные периоды жизни озера, которые, возможно, могут быть связаны с наличием или отсутствием ледяного покрова на водоеме. В оз. Поморник (оазис Ширмахера) и Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн) на дне обитает наиболее распространенный в Антарктиде (Kurbatova and Andreev, 2015; Li S.-P. et al., 2009) глубоководный мох *Bryum pseudotriquetrum* P.G. Gärtner, B. Meyer & Scherbius, 1802, а в оз. Глубоком (оазис Ширмахера) – *Plagiothecium orthocarpum* Mitten., 1869, который пока не обнаружен в других озерах Антарктиды (Li S.-P. et al., 2009).

Выводы

Низкие количественные показатели (содержание хлорофилла *a* 0.1–0.45 мкг/л; биомасса фитопланктона 0.02 ± 0.01 мг/л) и видовое разнообразие являются характерными чертами антарктических озер. Здесь отсутствует классическая пищевая цепь и преобладает микробная петля с энергией, поток которой проходит через сообщество бентоса.

Наблюдаемые тенденции изменения климата за последние 50 лет в отдельных районах Восточной Антарктиды неоднозначны. В оазисе Холмы Тала заметных отклонений не выявлено, однако здесь отмечается рост изменчивости метеорологических параметров за многолетний период. Так, в настоящее время наблюдается увеличение количества дней с сильным ветром, осадками и метелями в летний период по сравнению с 60-ми гг. XX в. В оазисе Ширмахера отмечается потепление климата. Здесь с 70-х гг. XX в. к настоящему времени произошло изменение конфигурации озер (растаяли снежники по берегам), некоторые озера перешли из разряда постоянно покрытых льдом в категорию вскрывающихся.

Основная реакция озер антарктических оазисов на климатические изменения проявляется в смене ледового режима. Особенностью является то, что освобождение ото льда не приводит к увеличению вегетационного периода, как это характерно для озер Восточной Фенноскандии (Filatov et al., 2012). После схода льда происходит быстрое остывание водной массы от поверхности до дна в результате траты тепла на таяние, радиационного выхолаживания, испарения под воздействием ветро-волнового перемешивания. При этом устанавливается изотермия с температурой 0.5 °C, которая как минимум на 3 °C ниже, чем в озерах, покрытых льдом.

Оптические свойства воды и льда исследованных озер Антарктиды позволяют проходить достаточному количеству света до глубины свыше 30 м, что одновременно с постоянной температурой воды около 4 °C обеспечивает хорошие условия для развития цианобактериальных матов и мха на дне озер.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 10–05–00963 «Реакция озер на изменения климата» и № 19–04–01000 «Зимние биологические процессы в малых озерах», а также при поддержке Минобрнауки России по теме АААА–А18–118012690096–1. За организацию работ и содействие в их проведении выражаем искреннюю благодарность начальнику станции Молодежная 56 РАЭ В.В. Киселеву, коллегам и товарищам по работе. Отдельная благодарность ведущему инженеру, к.ф.-м.н. О.М. Андрееву за измерение ослабления проникающей в водную толщу солнечной радиации и Ю.Л. Сластиной за измерение содержания хлорофилла *a* в воде.

Список литературы

- Захаров, В.Ф. 1970. К вопросу о термическом режиме озера Глубокого (оазис Ширмахера). *Бюллетень САЭ* 77, 90–95.
- Короткевич, В.С., 1958. Население водоемов оазисов в Восточной Антарктиде. *Информационный бюллетень САЭ* 3, 91–98.
- Симонов, И.М., 1971. Оазисы Восточной Антарктиды. Гидрометеиздат, Ленинград, СССР, 176 с.
- Филатов, Н.Н., Георгиев, А.П., Ефремова, Т.В., Назарова, Л.Е., Пальшин, Н.И., Руховец, Л.А., Толстиков, А.В., Шаров, А.Н., 2013. Влияние изменений климата на экосистемы озер. *Вестник РФФИ* 2 (78), 43–50.
- Шаров, А.Н., Толстиков, А.В., 2018. Экологические проблемы озер Восточной Антарктиды. *Региональная экология* 3 (53), 5–14. <http://www.doi.org/10.30694/1026-5600-2018-3-5-14>
- Andreoli, C., Scarabel, L., Spini, S., Grassi, C., 1992. The picoplankton in Antarctic lakes of northern Victoria Land during summer 1989–1990. *Polar Biology* 11, 575–582.
- Contreras, M., Cabrera, S., Montecino, V., Pizarro, G., 1991. Dinamica abiotica del lago Kitiesh. *Antartica. Ser Cient INACH* 41, 9–32.
- Dartnall, H.J.G., Hollowday, E.D., 1985. Antarctic rotifers. *British Antarctic Survey Scientific Reports* 100, 46 p.
- Ellis-Evans, J.C., 1981. Freshwater microbiology at Signy Island, South Orkney Islands, Antarctica. PhD thesis. Council for National Academic Awards, 283 p.

- Ellis-Evans, J.C., Laybourn-Parry, J., Bayliss, P., Perriss, S., 1997. Human impact on an oligotrophic lake in the Larsemann Hills. In: Battaglia, B., Valencia, J., Walton, D.W.H. (eds.), *Antarctic Communities: Species, Structure and Survival*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 396–404.
- Filatov, N.N., Georgiev, A.P., Efremova, T.V., Nazarova, L.E., Pal'shin, N.I., Rukhovets, L.A., Tolstikov, A.V., Sharov, A.N., 2012. Response of Lakes in Eastern Fennoscandia and Eastern Antarctica to Climate Changes. *Doklady Earth Sciences* **2** (444), 752–755.
- Gibson, J.A.E., Wilmotte, A.T., Taton, A., Van de Vijver, B., Beyens, L., Dartnall, H.J.G., 2006. Biogeographic trends in Antarctic Lake Communities. In: Bergstrom, D.M., Convey, P., Huiskes, A.H.L. (eds.), *Trends in Antarctic Terrestrial and Limnetic Ecosystems: Antarctica as a Global Indicator*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 71–99.
- Hansson, L.-A., Hylander, S., Herbert, J.G., 2012. High zooplankton diversity in the extreme environments of the McMurdo Dry Valley lakes, Antarctica. *Antarctic Science* **24** (02), 131–138.
- Hawes, I., 1990. Eutrophication and vegetation development in maritime Antarctic lakes. In: Kerry, K.R., Hempel, G. (eds.), *Antarctic Ecosystems. Ecological Change and Conservation*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany, 83–90.
- Heath, C.W., 1988. Annual primary productivity of an Antarctic continental lake: phytoplankton and benthic algal mat production strategies. *Hydrobiologia* **165**, 77–87.
- Henshaw, T., Laybourn-Parry, J., 2002. The annual pattern of photosynthesis in two large, freshwater, ultra-oligotrophic Antarctic lakes. *Polar Biology* **25**, 744–752.
- Hodgson, D.A., Convey, P., Verleyen, E., Vyverman, W., McInnes, S.J., Sands, C.J., Fernández-Carazo, R., Wilmotte, A., De Wever, A., Peeters, K., Tavernier, I., Willems, A., 2010. The limnology and biology of the Dufek Massif, Transantarctic Mountains 82 South. *Polar Science* **2** (4), 197–214.
- Ingole, B.S., Parulekar, A.H., 1993. Limnology of freshwater lakes at Schirmacher Oasis, East Antarctica. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences* **6** (59), 589–600.
- Kaup, E., 1998. Trophic status of lakes in Thala Hills, Antarctica – records from the years 1967–68 and 1988. *Proceedings of the National Institute of Polar Research Symposium on Polar Biology* **11**, 82–91.
- Kaup, E., Ellis-Evans, J.C., Burgess, J.S., 2001. Increased phosphorus levels in the surface waters of Broknes, Larsemann Hills, Antarctica. *Verhandlungen International Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie* **27**, 3137–3140.
- Kurbatova, L.E., Andreev, M.P., 2015. Bryophytes of the Larsemann Hills (Princess Elizabeth Land, Antarctica). *Новости систематики низших растений* **49**, 360–368.
- Laybourn-Parry, J., Marchant, H.J., Brown, P.E., 1992. Seasonal cycle of microbial plankton in Crooked Lake, Antarctica. *Polar Biology* **12**, 411–416.
- Li, S.-P., Ochyra, R., Wu, P.-C., Seppelt, R.D., Cai, M.-H., Wang, H.-Y., Li, C.-S., 2009. *Drepanocladus longifolius* (Amblystegiaceae), an addition to the moss flora of King George Island, South Shetland Islands, with a review of Antarctic benthic mosses. *Polar Biology* **32**, 1415–1425. <http://www.doi.org/10.1007/s00300-009-0636-z>
- MacNamara, E.E., 1970. Some limnological observations from Enderby Land, Antarctica. *Limnology and Oceanography* **15**, 768–775.
- McInnes, S.J., Pugh, P.J.A., 1998. Biogeography of limno-terrestrial Tardigrada, with particular reference to the Antarctic fauna. *Journal of Biogeography* **25**, 31–36.
- Opalinski, K.W., 1972. Flora and fauna of freshwater bodies of the Thala Hills oasis (Enderby Land, Eastern Antarctica). *Polskie Archiwum Hydrobiologii* **19**, 383–398.
- Priddle, J., Hawes, I., Ellis-Evans, J.C., Smith, T.J., 1986. Antarctic aquatic ecosystems as habitats for phytoplankton. *Biological Reviews* **61**, 199–238.
- Quesada, A., Vincent, W.F., Kaup, E., Hobbie, J.E., Laurion, I., 2006. Landscape control of high latitude lakes in a changing climate. In: Bergstrom, D.M., Convey, P., Huiskes, A.H.L. (eds.), *Trends in Antarctic Terrestrial and Limnetic Ecosystems: Antarctica as a Global Indicator*. Springer, Dordrecht, Germany, 221–252.
- Reynolds, C.S., 2006. *The ecology of phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 535 p.
- Sanyal, A.K., 2004. Diversity of Invertebrate Fauna of Schirmacher Oasis, East Antarctica. Nineteenth Indian Expedition to Antarctica. Scientific Report.

- Department of Ocean Development. Technical Publication 17, 173–187.
- Sharov, A.N., Berezina, N.A., Tolstikov, A.V., 2015. Life under ice in the perennial ice-covered Lake Glubokoe in Summer (East Antarctica). *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 20, 120–127.
- Stal, L.J., 1995. Physiological ecology of cyanobacteria in microbial mats and other communities. *New Phytologist* 131, 1–32.
- Starmach, K., 1995. Freshwater algae of the Thala Hills oasis (Enderby Land, East Antarctic). *Polish Polar Research* 3–4 (16), 113–148.
- Talling, J.F., 1979. Factor interactions and implications for the prediction of lake metabolism. *Archiv für Hydrobiologie – Beiheft Ergebnisse der Limnologie* 13, 96–109.
- The Schirmacher Oasis, Queen Maud Land, East Antarctica, and its surroundings, 1995. Bormann, P. and Fritzsche, D. (eds.). Justus Perthes Verlag, Gotha, Germany, 448 p.
- Verlecar, X.N., Dhargalkar, V.K., Matondkar, S.G.P., 1996. Ecobiological studies of the freshwater lakes at Schirmacher Oasis, Antarctica. Twelfth Indian Expedition to Antarctica. Scientific Report. Department of Ocean Development. Technical Publication 10, 233–257.
- Vincent, M., Layburn-Parry, J., 2008. Polar Lakes and Rivers. Limnology of Arctic and Antarctic Aquatic Ecosystems. Oxford University Press, New York, USA, 320 p.

Hydrological and biological regimes of lakes of East Antarctica

Andrey N. Sharov^{1*}, Alexey V. Tolstikov²

¹ I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok 109, Nekouzsky District, Yaroslavl Region, 152742 Russia

² Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, pr. Aleksandra Nevskogo 50, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185030 Russia

*sharov_an@mail.ru

Hydrological and biological regimes of different types of lakes of oases of East Antarctica, Thala Hills, Schirmacher Oasis and Larsemann Hills, were studied in the summer of 2010–2011. In lakes covered with ice, inverse temperature stratification is recorded. In the bottom layers of the water, the temperature (about 4 °C) is close to the values characteristic of water with a maximum density. Isothermy is observed on the opened small lakes, and water in some reservoirs warms up to 8 °C. Benthic communities of cyanobacteria and invertebrates are the main biological component of lakes, where there is no classical food chain and a microbial loop prevails. Studies have shown that a 3-meter layer of ice permits a sufficient amount of light even to a depth of 30 m. Light does not limit the development of algae and cyanobacteria. However, the low content of nutrients in the water limits the growth of phytoplankton, causing low values of biomass (less than 0.01 mg/l) and concentration of chlorophyll a (0.1–0.45 µg/l). A tendency to climate change around the Schirmacher oasis is recorded. In recent decades, some lakes, which in the middle of the last century were constantly covered with ice, began to open in the summer months. In the period when the lake is covered with ice, homothermy is established with a water temperature of 4 °C. After having opened, the water temperature in the lake drops to 0.5–1 °C because of wind-wave cooling.

Keywords: Antarctic lakes, bottom communities, phytoplankton, chlorophyll, climate change.