

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.5

ТИПИЗАЦИЯ ОЗЕР ОАЗИСОВ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

© 2023 г. Г. В. Пряхина^{a, *}, М. Р. Кузнецова^{a, b}, Е. С. Зелепукина^c, А. С. Боронина^{a, d, e},
С. В. Попов^{a, e, f}, С. Д. Григорьева^b, А. А. Четверова^{a, b}, М. П. Кашкевич^a

^aСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^bАрктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

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

^dГосударственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

^eИнститут мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

^fПолярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: g.pryahina@spbu.ru

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

После доработки 20.05.2023 г.

Принята к публикации 22.06.2023 г.

Актуальность создания комплексной типизации озер оазисов Восточной Антарктиды продиктована не только необходимостью учета современных накопленных данных об антарктических водоемах, но и необходимостью обобщения представлений о гидрологическом режиме озер для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач. При разработке комплексной типизации озер антарктических оазисов, в отличие от существующих классификаций, впервые в качестве критерия использованы особенности хода уровня воды озер. Работа выполнена на основе анализа литературных и фондовых материалов (оазисы Холмы Ларсеманн, Ширмахера, Бангера, Молодежный, Вестфолль и Сухие Долины Мак-Мердо), а также собственных экспедиционных данных (полевые сезоны 2017–2022 гг., оазис Холмы Ларсеманн). Для получения целостного представления об уровне озер, помимо прямых критериев (продолжительность фазы наполнения озера, величина роста уровня воды и др., требующих организации фактических наблюдений), предложена группа косвенных критериев (наличие и тип естественной плотины, положение в каскаде, характер проточности и др.). Важно, что характеристика большей части косвенных критериев может быть получена в ходе визуального обследования местности при рекогносцировке либо при анализе картографического материала и данных дистанционного зондирования. Выделенные 4 типа (прорывной, тенденциальный, транзитный, приливно-отливной) и 8 подтипов озер, проиллюстрированные обобщенными графиками уровня колебаний, объективно характеризуют особенности гидрологического режима водоемов. Открытость типизации предполагает возможность актуализации по мере накопления новых научных знаний и материалов.

Ключевые слова: антарктические озера, уровень воды, прорывной паводок, гидрологический режим, снежно-ледовые плотины

DOI: 10.31857/S2587556623050060, **EDN:** TMWAKU

ВВЕДЕНИЕ

Озера широко распространены в Антарктическом регионе, включая островные, прибрежные и внутриконтинентальные районы. Особенным разнообразием водоемов отличаются антарктические оазисы. Согласно современным представлениям, антарктический оазис — это свободная от ледникового покрова территория, имеющая особый местный климат, почвы, биоту и непромерзающие водоемы (Сократова, 2007). Хотя суммарная площадь оазисов не превышает 0.3% площади Антарктиды, в каждом из более чем 20 оазисов расположено от нескольких десятков до несколь-

ких сотен водоемов (Сократова, 2007). Озера различаются по водному, ледовому, термическому, гидрохимическому режимам, что обусловлено особенностями их расположения: в краевых частях ледников, на свободных ото льда пространствах, вплотную к снежникам, выполняющим роль подпруживающей плотины, и др.

В силу труднодоступности территории и суровых климатических условий степень гидрологической изученности водоемов Антарктики, несмотря на довольно длительные исследования, невелика: систематические многолетние наблюдения на объектах редки и обычно ограничены

теплым периодом года (3–4 мес.). С течением времени накапливаемый объем информации о морфометрических, гидрологических и гидрохимических характеристиках, температурном и ледовом режимах озер антарктических оазисов систематизировался. Был разработан ряд классификаций и типизаций по происхождению котловин, питанию, ледовому и термическому режимам, концентрации солей, условиям седиментации (Короткевич, 1972; Симонов, 1971; Федорова, 2003). Обобщения характеристик антарктических водоемов для территорий Вестфолль, Сухих долин Мак-Мердо и субантарктических островов представлены в (Laybourn-Parry and Wadham, 2014). В последние годы много внимания уделяется систематизации результатов гидрологических работ в оазисах (Сократова, 2011), в том числе данных о прорывных озерах Восточной Антарктиды (Боронина, 2022). Тем не менее ни в одной из существующих классификаций в качестве критерия не используется такая важнейшая гидрологическая характеристика, как уровень воды. Изменение уровня воды, с одной стороны, является результатом природных процессов на водосборах, а с другой стороны, определяет внутренние процессы и свойства самого водоема (например, ледово-термический и гидрохимический режимы).

Целью настоящей работы является комплексная типизация озер оазисов Восточной Антарктиды, построенная с учетом накопленного к настоящему времени объема сведений об уровнях воды озер в разных антарктических оазисах, в том числе данных непосредственных измерений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили 42 водоема оазисов, расположенных в пришельфовой (Ширмахера, Бангера), приморской (Холмы Ларсеманн, Молодежный, Вестфолль) и горной (Сухие Долины Мак-Мердо) частях Восточной Антарктиды. В связи с тем, что озера оазиса часто оказываются гидравлически связаны с водными объектами на прилегающих ледниках, в рамках данной работы рассматривались водоемы, расположенные как в пределах оазисов, так и на непосредственно прилегающих к ним ледниковых территориях (рис. 1).

Среди рассматриваемых оазисов самую большую площадь занимают Сухие Долины Мак-Мердо (1346 км²), которые характеризуются наименьшим показателем озерности (3%), при этом средняя площадь водоемов не превышает 2 км². В оазисе Бангера (952 км²) расположено самое крупное озеро – Фигурное (площадь 14.3 км², средняя глубина 32 м) (ААНИИ, № О-3032). В оазисе Вестфолль (413 км²) коэффициент озерности достигает 9%, при этом некоторые водоемы име-

ют весьма внушительные размеры: площадь оз. Крукватнет – 9 км², глубина оз. Дип – 50 м (Riffenburgh, 2007). Для оазисов Ширмахера (35 км²), Холмы Ларсеманн (40 км²), Молодежный (9 км²) характерны озера с площадями водной поверхности до 0.5 км², средними глубинами от 1–3 до 10 м, максимальные глубины объектов составляют от 3–5 до 20–120 м (Атлас океанов ..., 2005; План ..., 2014; Шаров, Толстиков, 2018, 2022)¹. В оазисах Восточной Антарктиды встречаются соленые и горько-соленые озера, которые наиболее распространены в оазисах Вестфолль и Бангера. Своеобразие ледового режима антарктических водоемов заключается в непродолжительном (1–2 мес.) полном или частичном освобождении ото льда, при этом ряд объектов не вскрывается на протяжении нескольких лет, а некоторые – десятилетиями. Отличительной чертой гидрологического режима озер антарктических оазисов являются прорывы (Боронина, 2022) – резкие сбросы озерных вод, сопровождающиеся образованием каналов в снежниках или ледниках.

Материалами исследования послужили литературные и картографические источники, данные спутниковых снимков, экспедиционные отчеты² Российской и Советской Антарктических экспедиций (РАЭ и САЭ), а также результаты собственных полевых исследований авторов на озерах оазиса Холмы Ларсеманн, полученные в ходе сезонных работ 63–67 РАЭ (2017–2022 гг.) в районе станции Прогресс (Полевой отчет ..., 2018, 2019, 2020, 2022). Полевые исследования выполнены авторами по стандартной методике, которая подробно изложена в указанных полевых отчетах. Наблюдения за уровнем режимом водоемов проводились на временных водомерных постах, оборудованных согласно Наставлениям (Наставления ..., 1973). Тип поста (свайный/реечный или автоматический с установкой гидростатического уровнемера Гидрометрика-502 (Россия)), технические и погодные условия определяли дискретность измерений: в основном 1 раз в сутки, а в период резкого падения уровня (сброса воды по прорывному каналу) – каждые 5 мин. Точность измерений определяется точностью отсчета по водомерной рейке и составляет 0.5 см. Измерения температуры воды на вертикалях выполняли с лодки мультимонитором ULTRAPEN PT1 (США) после подъема пробы воды батометром. Наблюдения за ледовым режимом включали визуальную оценку площади ледового покрова на водоеме. Согласно информации из использован-

¹ См. также: сайт ФГБУ «ААНИИ»: станция Новолазаревская. http://www.aari.aq/stations/lazarev/lazarev_ru.html (дата обращения 12.05.2023).

² Фондовые материалы Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ).

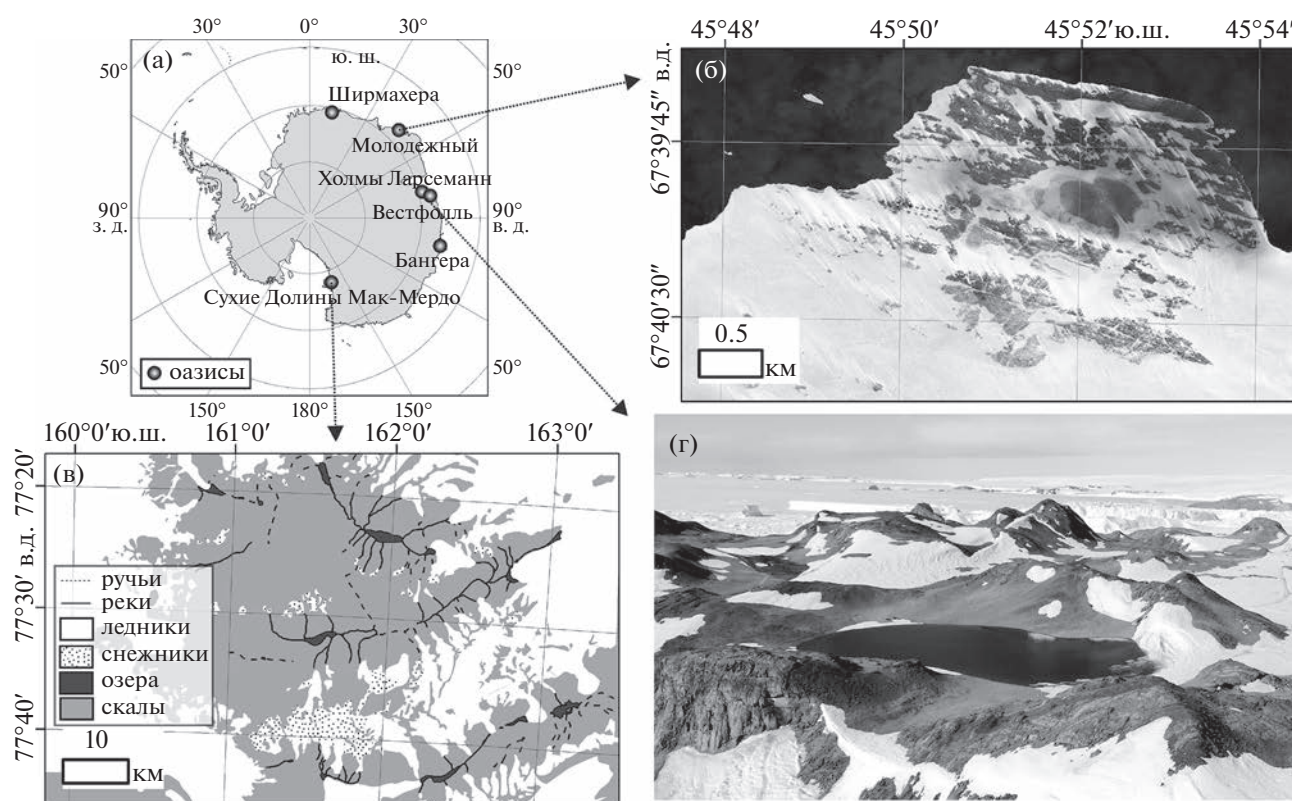


Рис. 1. Район исследования. (а) — схема расположения оазисов по (Сократова, 2007) (в скобках дано количество водоемов, шт.): Ширмахера [~180, (http://www.aari.aq/stations/lazarev/lazarev_ru.html)]; Молодежный [~40, (Атлас океанов ..., 2005)], Холмы Ларсеманн [более 150, (План управления ..., 2014)], Вестфолль [более 300, (Swadling et al., 2001)], Бангера [более 300, (Атлас океанов ..., 2005)], Сухие Долины Мак-Мердо [~30, (Атлас океанов ..., 2005)]; (б) — спутниковый снимок оазиса Молодежный (2006 г.) по *Google Earth Explorer Pro*; (в) — схема Сухих Долин Мак-Мердо по (Атлас океанов ..., 2005); (г) — оазис Холмы Ларсеманн, восточная часть п-ва Брокнес (фото авторов, 2022 г.).

ных научно-технических отчетов САЭ и РАЭ, уровенные, ледовые наблюдения и определение распределения температуры воды на вертикалях производились аналогичным образом. На эпизельфовых водоемах (Привальное, оазис Ширмахера; Полянского, оазис Бангера) для определения уровенных колебаний применяли самописцы уровня воды. Все использованные при подготовке типизации материалы обобщены в реестр данных (табл. 1).

При создании типизации авторы придерживались следующего принципа: при минимальном наборе информации необходимо получить целостное представление о гидрологическом режиме водоема. Наиболее достоверно о типе уровенного режима водоема можно судить при помощи непосредственных наблюдений, а также информации о соотношении приходной и расходной частей водного баланса, продолжительности фазы наполнения озера и величине роста уровня воды. В настоящей работе указанные признаки названы прямыми. Так как в силу объективных причин для большинства водных объектов Антарктиды использовать прямые признаки не представляется возможным, для определения типа уровенного режима

авторами предложена группа косвенных признаков, опосредованно влияющих на колебания уровня воды: положение озера в оазисе, наличие и тип естественной плотины, тип питания, степень покрытия льдом в теплый период года, температурная стратификация, положение в каскаде и характер проточности. Для их определения могут быть использованы карты, космические снимки, визуальное обследование местности, опрос сотрудников станций, а также данные эпизодических полевых измерений.

Выявление типа водоема базировалось на последовательном анализе косвенных и прямых признаков, описание которых в тексте следует в соответствии с табл. 2. Для каждого типа озер приведены примеры конкретных объектов. Характер изменения уровня воды в таблице проиллюстрирован типовыми графиками хода уровня воды, полученными в результате обобщения данных фактических наблюдений на объектах разных оазисов Восточной Антарктиды.

Таблица 1. Реестр фактических данных по озерам Восточной Антарктиды

№	Название		Год сезонных наблюдений (круглогодичные наблюдения выделены полужирным шрифтом)		
	озеро	оазис	уровень воды	температура	степень покрытия льдом в теплый период
1	Белых Дымов	Бангера	1992 ¹	1992 ¹	1992 ¹ ; (2006, 2011) ²⁸
2	Болдер	Холмы Ларсеманн	(2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²	—	(2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²
3	Бонни	Сухие Долины Мак-Мердо	(1971–2010) ³	—	— ³ ; (2008) ²⁸
4	Брувиллер*	Холмы Ларсеманн	—	—	(2004, 2006, 2011) ²⁸
5	Ванда	Сухие Долины Мак-Мердо	—	— ^{4, 5}	— ⁵ ; (2004) ²⁸
6	Васка	Сухие Долины Мак-Мердо	— ³	—	— ³ ; (2004) ²⁸
7	Верхнее	Ширмахера	(1983–1984) ⁴ ; (2006– 2007) ²⁰ ; (2007–2008) ²¹ ; (2013–2014) ⁸ ; (2015– 2016) ¹⁴	(1983–1984) ⁴ ; (1976– 1977) ^{4, 6, 24}	(1961–1962, 1976–1977 , 1983–1984) ⁴ ; (1976–1977, 1984) ^{4, 24} ; (2006, 2012) ²⁸ ; (2013–2014) ⁸
8	Вида	Сухие Долины Мак-Мердо	(1972–2010) ³	—	— ³ ; (2004) ²⁸
9	Водоем на леднике Долк (у п/б Про- гресс-1)	Холмы Ларсеманн	2017 ⁷	—	— ²
10	Глубокое	Ширмахера	(1962) ⁶ ; (1976, 1983– 1984) ⁴ ; (2011–2012) ²² ; (2012–2013) ²³ ; (2013– 2014) ⁸ ; (2015–2016) ¹⁴	(1976–1977) ^{4, 6, 24} ; (1983–1984) ⁴	(1961–1962, 1976–1977 , 1983–1984) ⁴ ; (1976–1977, 1984) ^{6, 24} ; (2006, 2012) ²⁸ ; (2013–2014) ⁸
11	Глубокое	Молодежный	(1969) ⁴ ; (1969–1970) ²⁵ ; (2011) ¹	— ^{5, 6, 9}	(1977) ^{4, 5, 6} ; (2006, 2018) ²⁸
12	Далекое	Бангера	(1986–1987, 1989– 1990) ^{10, 19}	—	(2006, 2011) ²⁸
13	Дип	Вестфолль	—	— ^{4, 5}	— ⁵ ; (2006, 2009, 2011, 2012) ²⁸
14	Дискашн	Холмы Ларсеманн	(2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²	—	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²
15	Долинное	Бангера	(1992) ¹	(1979) ⁴	(2006, 2011) ²⁸
16	Камерон	Холмы Ларсеманн	(2019–2020) ²	(2021–2022) ²	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2019–2020, 2021–2022) ²
17	Крукватнет	Вестфолль	—	— ⁵	— ⁵
18	Лагерное	Молодежный	(1969–1970) ²	—	(2006, 2018) ²⁸

Таблица 1. Продолжение

№	Название		Год сезонных наблюдений (круглогодичные наблюдения выделены полужирным шрифтом)		
	озеро	оазис	уровень воды	температура	степень покрытия льдом в теплый период
19	Ледяное	Холмы Ларсеманн	(2017–2018, 2019–2020) ²	—	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²
20	Лоу	Холмы Ларсеманн	(2012–2013) ¹⁵ ; (2016) ¹⁴ ; (2016–2017) ²⁷ ; (2019– 2020, 2020–2021, 2021– 2022) ²	(2019–2020, 2021– 2022) ²	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²
21	Овальное	Молодежный	(1969) ¹¹	—	(2006, 2018) ²⁸
22	Ожидания	Ширмахера	— ⁶	(1962) ⁶	— ⁶ ; (2006, 2012) ²⁸
23	Озеро вблизи горы Примет- ная	Ширмахера	— ¹²	—	—
24	Полэст	Бангера	(1992) ^{1, 19}	—	(2006, 2011) ²⁸
25	Полянского	Бангера	(1988) ¹³	—	(1988, 1992) ^{1, 13} ; (2006, 2011) ²⁸
26	Поморника	Ширмахера	(1983–1984) ⁴ ; (2013– 2014) ⁸ ; (2015–2016) ¹⁴	(1983–1984) ⁴ ; (1976– 1977) ^{4, 24}	(1961–1962, 1976–1977 , 1983–1984) ⁴ ; (1976– 1977) ²⁴ ; (2006, 2012) ²⁸ ; (2013–2014) ⁸
27	Привальное (Лагерное)	Ширмахера	— ¹⁴ ; (2016) ¹⁶	(1963) ⁶ ; (1976– 1977) ²⁴	(1961–1962, 1976–1977 , 1983–1984) ⁴ ; (1976– 1977) ²⁴ ; (2006, 2012) ²⁸
28	Прогресс	Холмы Ларсеманн	(2012–2013) ¹⁵ ; (2016) ¹⁴ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²	(2017) ²⁷	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²
29	Рейд	Холмы Ларсеманн	(2012) ^{18, 26} ; (2012– 2013) ¹⁵ ; (2016) ¹⁴ ; (2016– 2017) ²⁷ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021– 2022) ²	(2021–2022) ²	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2017) ²⁷ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²
30	Сибторп	Холмы Ларсеманн	(2012–2013) ¹⁵ ; (2016) ¹⁴ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²	—	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2016) ¹⁴ ; (2017) ²⁷ ; (2017– 2018, 2018–2019, 2019– 2020, 2020–2021, 2021– 2022) ²

Таблица 1. Окончание

№	Название		Год сезонных наблюдений (круглогодичные наблюдения выделены полужирным шрифтом)		
	озеро	оазис	уровень воды	температура	степень покрытия льдом в теплый период
31	Скандретт	Холмы Ларсеманн	(2012) ¹⁸ ; (2016) ¹⁴ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²	(2019–2020) ²	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²
32	Смирнова	Ширмахера	(1983–1984) ⁴ ; (2013– 2014) ⁸ ; (2015–2016) ¹⁴	— ⁶	(1961–1962, 1976–1977 , 1983–1984) ⁴ ; (2006, 2012) ²⁸ ; (2013–2014) ⁸
33	Станционное	Ширмахера	(1983–1984) ⁴	(1976–1977) ²⁴	(1961–1962, 1976–1977 , 1983–1984) ⁴ ; (1976– 1977) ²⁴ ; (2006, 2012) ²⁸
34	Степпед	Холмы Ларсеманн	(2012) ¹⁸ ; (2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²	—	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2013) ¹⁵ ; (2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²
35	Фигурное	Бангера	(1987–1989) ⁴ ; (1990– 1991) ¹⁷ ; (1992) ¹	(1976–1977) ^{4, 5, 6}	— ^{5, 6} ; (2006, 2011) ²⁸
36	Фрюксель	Сухие Долины Мак- Мердо	(2006) ³	—	— ³ ; (2008, 2010, 2012) ²⁸
37	Хор	Сухие Долины Мак- Мердо	(1995–2012) ³	—	— ³ ; (2008) ²⁸
38	Челнок	Вестфолль	(1987–1988) ¹⁶	— ⁵	— ⁵ ; (2006, 2012) ²⁸
39	ЛН-55	Холмы Ларсеманн	(2020) ²	—	(2004, 2006, 2011) ²⁸
40	ЛН-56*	Холмы Ларсеманн	—	—	(2004, 2006, 2011) ²⁸
41	ЛН-59	Холмы Ларсеманн	(2019–2020, 2020– 2021, 2021–2022) ²	—	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²
42	ЛН-73	Холмы Ларсеманн	(2012) ²⁶ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021– 2022) ²	(2021–2022) ²	(2004, 2006, 2011) ²⁸ ; (2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021, 2021–2022) ²

Примечания: *Выполнены рекогносцировочные обследования озер: ЛН-56 (оазис Холмы Ларсеманн) в сезон 2019–2020 гг. и Брувиллер (оазис Холмы Ларсеманн) в сезоны 2019–2020 и 2021–2022 гг.; —ⁿ — в использованном литературном источнике не указан период наблюдений.

Источники данных: 1, (Научно-технический отчет ..., 1992); 2, Собственные материалы; 3, (Dugan, 2014); 4, (Атлас океанов ..., 2005); 5, (Короткевич, 1972); 6, (Симонов, 1971); 7, (Borovina et al., 2021); 8, (Отчет ..., 2014); 9, (Шаров, Толстиков, 2020); 10, (Отчет ..., 1991); 11, (Шаров, Толстиков, 2018); 12, (Федорова, 2010); 13, (Отчет ..., 1988); 14, (Научно-технический отчет ..., 2016); 15, (Shevnina and Kourzhneva, 2017); 16, (Bronge, 1989); 17, (Материалы ..., 1991); 18, (Отчет о выполнении научных ..., 2012); 19, (Клоков, Веркулич, 1994); 20, (Научно-технический отчет ..., 2007); 21, (Научно-технический отчет ..., 2008); 22, (Отчет о выполнении программы ..., 2012); 23, (Научно-технический отчет ..., 2013); 24, (Кауп, 1981); 25, (Отчет ..., 1970); 26, (Научно-технический отчет ..., 2012); 27, (Научно-технический отчет ..., 2017); 28, спутниковые снимки Google Earth Pro.

Таблица 2. Типизация озер оазисов Восточной Антарктиды

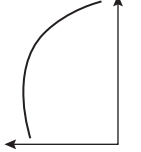
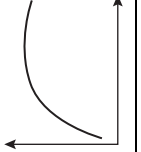
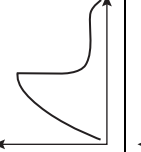
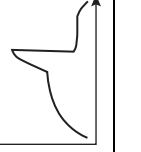
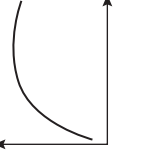
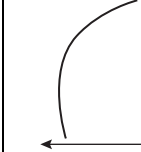
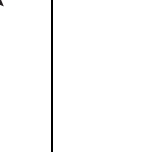
Положение в оазисе	Тип плотины	Преобладающий тип питания	Степень покрытия льдом в теплый период	Температурная стратификация	Положение в каскаде	Характер проточности озер	Особенности уровневого режима в теплый период				Примеры (год/сезон наблюдений: амплитуда колебаний уровня)	Тип озера ⁴¹
							Q^+ и Q^{-29}	продолжительность фазы наполнения	высота подъема/спала уровня	характер хода уровня		
На материковом леднике	Нет	Ледниковый	Полное ³⁰	Круглогодичная обратная	Вне каскада	Бессточные	8	9	10	11	12	13
							Бессточные	$Q^+ < Q^-$	Многолетняя	Нет данных		14
							$Q^+ > Q^- \rightarrow Q^+ < Q^-$	Многолетняя	Сезонная	От 1 м		II-2
					1-е или 2-е или следующее	Проточные периодические	$Q^+ > Q^- \rightarrow Q^+ < Q^-$	Сезонная с дополнительным ростом уровня при прохождении паводка	От 2 м		ЛН-56 ^{39,40} , оаз. Холмы Ларсеманн (2018–2020: 1.45 м)	I-1
					Вне каскада	Бессточные	$Q^+ > Q^-$	Многолетняя	От 5 м		ЛН-55 ^{39,40} , оаз. Холмы Ларсеманн (2020)	II-1
							$Q^+ > Q^-$	Сезонная	От 0.1 м		Бонни, долина Тейлор ³¹ (1971–2010: 10 м)	II-1
							$Q^+ > Q^-$	Многолетняя	–		Фрюксель, долина Тейлор ³¹ (2006: 0.18 м); Лоу ⁴⁰ , оаз. Холмы Ларсеманн	II-1
							$Q^+ < Q^-$	Многолетняя	–		Красное, оаз. Ширмахера ³²	II-2
							$Q^+ < Q^-$	Сезонная	–		Полэст, оаз. Бангера (1992: 1.05 м) ³³ ; Рейд ⁴⁰ , оаз. Холмы Ларсеманн (2020: 0.17 м) ⁴⁰	II-2

Таблица 2. Продолжение

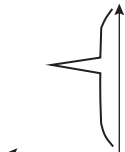
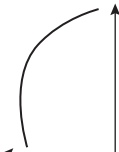
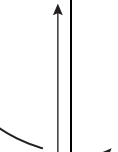
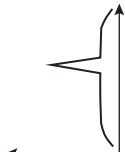
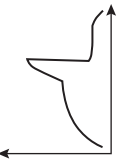
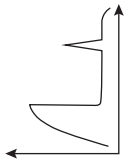
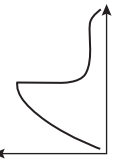
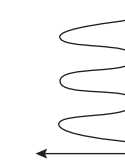
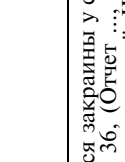
Вне ледника (в скально-глыновом основании)	Положение в оазисе	Тип плотины	Преобладающий тип питания	Степень покрытия льдом в теплый период	Температурная стратификация	Положение в каскаде	Характер проточности озер	Особенности уровневого режима в теплый период				Примеры (год/сезон наблюдения: амплитуда колебаний уровня)	Тип озера ⁴¹
								Q^+ и Q^{-29}	продолжительность фазы наполнения	высота подъема/спада уровня	характер хода уровня		
	I	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
						Проточные периодически	$Q^+ \approx Q^-$	Кратковременный подъем уровня при прохождении паводка	От 0.1 м		Сибторп ⁴⁰ , оаз. Холмы Ларсеманн (2020: 0.22 м)	III-2	
													Сточное периодически
						Бессточные	$Q^+ < Q^-$	Сезонная	–		Долинное, оаз. Бангера (1992: 0.18 м) ³³	II-2	
													2-е и следующие
						Сезонная	Нет данных		Вида, Васка, долина Виктория ³¹	II-1			
											Проточные постоянно	$Q^+ \approx Q^-$	Нет
						Проточные периодически	$Q^+ \approx Q^-$	Кратковременный подъем уровня при прохождении паводка	От 0.1 м				
											Сточное периодически	$Q^+ > Q^- \rightarrow Q^+ < Q^-$	Многолетняя

Таблица 2. Окончание

Положение в оазисе	Тип плотины	Преобладающий тип питания	Степень покрытия льдом в теплый период	Температурная стратификация	Положение в каскаде	Характер проточности озер	Особенности уровневого режима в теплый период				Примеры (год/сезон наблюдения: амплитуда колебаний уровня)	Тип озера ⁴¹
1	2	3	5	6	7	8	Q^+ и Q^- ²⁹	продолжительность фазы наполнения	высота подъема/спала уровня	характер хода уровня	13	14
					1-е			Сезонная	От 0.5 м		LN-59 ^{39,40} , оаз. Холмы Ларсеманн (2020: 0.58 м)	I-1
					2-е и следующие	Проточные периодически	$Q^+ > Q^- \rightarrow Q^+ < Q^-$	Сезонная	От 1 м		Глубокое, оаз. Ширмахера (2013–2014: 1.75 м) ³⁴	I-1
								Многолетняя	От 5 м		Глубокое, оаз. Молодежный (1969: 7.5 м) ³⁵	I-2
								Сезонное с дополнительным ростом уровня при прохождении паводка	От 0.5 м		Дискаш ⁴⁰ , оаз. Холмы Ларсеманн (2018: 0.99 м)	I-2
					Вне каскада	Сточное периодически	$Q^+ > Q^- \rightarrow Q^+ < Q^- \rightarrow Q^+ \approx Q^-$	Сезонное с кратковременным подъемом уровня при прохождении паводка	От 0.5 м		Сибторп ⁴⁰ , оаз. Холмы Ларсеманн (2012–2013: 0.8 м) ³⁷	I-3
	Материковый ледник							Многолетняя	Нет данных		Челнок, оаз. Вестфолль (1987–1988) ³⁸	I-1
								Многолетняя	Нет данных		Белых Дымов, оаз. Бангера ³³	IV
В краевой части шельфового ледника	Шельфовый ледник	Смешанный	Полное ³⁰	Гомотермия	Вне каскада	Эпишельфовые	Приливно-отливной характер уровневых колебаний				Ожидания, оаз. Ширмахера ³²	IV

Примечания: 29, Соотношение приливной (Q^+) и расходной (Q^-) частей водного баланса; 30, могут формироваться закраины у скальных выходов; 31, (Dugan, 2014); 32, (Симонов, 1971); 33, (Научно-технический отчет ..., 1992); 34, (Отчет ..., 2014); 35, (Атлас океанов ..., 2005); 36, (Отчет ..., 1991); 37, (Shevina and Kourzhneva, 2017); 38, (Боронина, 2022); 39, наименование дано по (Gillespie et al., 1990); 40, собственные материалы; 41, тип озера: I – прорывной, II – транзитный, IV – приливно-отливной.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании перечисленных критериев была разработана типизация водоемов оазисов Восточной Антарктиды, которая представлена в табл. 2.

Косвенные критерии

1. Положение в оазисе и характеристика озерной котловины

Классификации, представленные в работах (Короткевич, 1972; Симонов, 1971; Laybourn-Parry and Wadham, 2014), базируются на двух основных критериях: происхождение водоема и генезис озерной котловины. В силу того, что для выявления последнего требуются специальные исследования, мы предлагаем использовать в качестве критерия расположение водоема в оазисе относительно ледника: поскольку именно ледник во многом определяет рельеф и природные условия оазиса, формирование озерных котловин, приток талых вод и др. Таким образом, выделены следующие группы озер, исходя из их расположения:

- на материковом леднике;
- вне ледника (в скально-грунтовой основе);
- в краевой части шельфового ледника.

2. Наличие и тип плотины

Наличие подпруживающей плотины в большинстве случаев указывает на высокую вероятность прорыва водоема — резкого падения уровня воды в результате разрушения плотины и формирования стока из озера. В случае наличия плотины, она может быть представлена:

- окраинной частью ледника;
- навесным снежником.

3. Тип питания

В целом для антарктических озер характерны следующие источники питания: талые воды сезонного снега, снежников, ледников, в меньшей степени — атмосферные осадки и грунтовое питание. Так как основной приток воды в озера происходит за счет поступления талых вод ледников и снежников, для составления типизации были выделены два типа питания:

- ледниковый;
- смешанный (включает питание талыми водами снежников, сезонного снега и ледников в различных соотношениях).

4. Степень покрытия акватории льдом в теплый период

Ледовитость акватории опосредовано определяет термический режим, общую минерализацию озерных вод, а также некоторые элементы водного баланса (например, испарение), которые, в свою очередь, влияют на динамику уровня. В свя-

зи с тем, что в существующих классификациях водоемов по ледовому режиму (Короткевич, 1972; Симонов, 1971) определение ряда критериев предполагает проведение специальных исследований, мы предлагаем использовать более простую характеристику — степень покрытия озера льдом в теплый период, которая определяется визуально либо с использованием данных дистанционного зондирования (ДДЗ) и имеет следующие градации:

- полное покрытие;
- частичное покрытие;
- отсутствие ледяного покрова.

5. Температурная стратификация

Различия термического режима озер антарктических оазисов обусловлены рядом факторов: степенью покрытия льдом акватории, глубиной водоема, метеорологическими условиями конкретного года, преобладающим типом питания. На основе анализа литературных источников (Атлас океанов..., 2005; Короткевич, 1972; Симонов, 1971; Шаров, Толстиков, 2020) и собственных данных были выделены следующие градации температурной стратификации водоемов:

— круглогодичная обратная термическая стратификация, ледовый покров сохраняется в течение года, температура глубинных вод 4°C; в годовом ходе температур есть фазы весенне-летнего нагревания и осенне-зимнего охлаждения; четко выражены термические зоны, отсутствует ветровая циркуляция;

— сезонно меняющаяся стратификация:

— летом — прямая термическая стратификация, зимой — обратная; ледяной покров полностью или частично стает в течение лета, температура глубинных вод 4°C;

— летом — прямая термическая стратификация либо гомотермия; зимой — отсутствует по причине промерзания до дна; характерна для неглубоких озер (менее 3 м);

— летом — гомотермия, зимой — обратная стратификация; ледяной покров полностью или частично стает в течение лета;

— невыраженная термическая стратификация; ледяной покров сохраняется в течение года, температура в разрезе не превышает 0.5°C; незначительные изменения температуры по глубине, возможно периодическое перемешивание водных масс приливно-отливными течениями; характерна для эпিশельфовых озер;

— с неустойчивой стратификацией в течение года, в том числе периоды с выраженной обратной стратификацией; устойчивый ледовый покров не формируется; характерен для горько-соленых озер.

6. Положение в каскаде

Особенностью многих озер антарктических оазисов является возникновение гидравлической связи между водоемами в период прорывов или переливов при переполнении чаши, что зачастую формирует специфический вид каскада, существующий непродолжительный период времени. При типизации нами были выделены водоемы:

– вне каскада – озера, расположение которых не подразумевает возможность объединения в каскад с другими озерами;

– 1-е в каскаде;

– 2-е или последующие в каскаде.

7. Характер проточности

Положение озера в каскаде или вне его определяет характер проточности, который может меняться в течение летнего сезона. Периодическая проточность связана с прорывами озер, прохождением прорывных паводков, реже – с фильтрацией. По типу проточности в теплый период были выделены водоемы:

– бессточные;

– сточные (постоянно либо периодически);

– проточные (постоянно либо периодически);

– эпишельфовые, имеющие постоянную связь с морем, для которых характерны периодические затопки соленых морских вод.

Прямые критерии

8. Соотношение приходной (Q^+) и расходной частей (Q^-) водного баланса

Одним из критериев, определяющих тип уровня режима водоема, является соотношение приходной (Q^+) и расходной (Q^-) частей водного баланса. В настоящей работе выделено три градации:

– приходная часть больше расходной части (наполнение водоема);

– приходная часть меньше расходной части (сработка водоема);

– условное равенство приходной и расходной частей (постоянство объема водоема).

9–11. Продолжительность фазы наполнения, величина роста уровня и характер хода уровня

Анализ особенностей уровенных колебаний озер (продолжительность фазы наполнения, величина роста уровня и характер хода уровня) позволил выделить следующие типы уровенного режима:

I тип: прорывной

I-1. Длительный (от нескольких недель до нескольких лет) рост уровня и быстрое (от нескольких часов до нескольких недель) снижение при сбросе прорывного паводка; высота подъема

уровня от 0.5 м при сезонном наполнении и выше 1 м при многолетнем наполнении. После прорыва уровенные колебания обычно невелики (рис. 2а). Тип характерен для подпруженных снежно-ледовыми плотинами водоемов, расположенных 1-ми в каскаде или вне каскада.

I-2. Продолжительный (до нескольких месяцев) рост уровня с резким увеличением интенсивности подъема за счет поступления прорывного паводка из вышележащего озера, быстрое (до нескольких часов) снижение при собственном прорыве; амплитуда колебаний от 0.5 м. После прорыва уровенные колебания обычно невелики (рис. 2б). Тип характерен для подпруженных снежно-ледовыми плотинами водоемов, являющимися 2-ми или последующими в каскаде.

I-3. Длительный (от нескольких недель) рост уровня и быстрое (от нескольких часов до нескольких недель) его снижение при сбросе прорывного паводка, после прорыва на фоне незначительных уровенных колебаний происходит кратковременный (до нескольких суток) подъем уровня при пропуске прорывного паводка из вышележащего водоема; величина роста уровня до прорыва от 0.5 м, при прохождении прорывного паводка от 0.1 м (рис. 2в). Характерен для прорывающихся водоемов, являющимися вторыми или последующими в каскаде.

II тип: тенденциальный

II-1. Направленный рост уровня воды (от нескольких недель до нескольких лет); величина роста уровня от 0.1 м при сезонном и от 2 м при многолетнем наполнении (рис. 2г). Характерен для бессточных водоемов, в конце теплого сезона может отмечаться незначительное снижение уровня за счет потерь воды на ледообразование и фильтрацию.

II-2. Направленное снижение уровня воды (от нескольких недель до нескольких лет); величина снижения уровня от 0.1 м при сезонном и от 2 м при многолетнем опорожнении (рис. 2д). Характерен для бессточных водоемов, в начале теплого сезона может отмечаться незначительное повышение уровня за счет притока талых вод.

III тип: транзитный

III-1. Ненаправленные колебания уровня воды (рис. 2е). Характерен для проточных и сточных водоемов, общая амплитуда колебаний составляет первые сантиметры. Отток из некоторых озер может формироваться не сразу: из-за особенностей вскрытия озера ото льда [оз. Смирнова, 2013–2014 гг. (Отчет ..., 2014)] или при формировании сосредоточенной фильтрации через протавившие каналы в бортах котловины (оз. Рейд, 2019–2020 гг., собственные материалы). В этих случаях график хода уровня по форме более выпуклый, общая амплитуда колебаний составляет до 0.5 м.

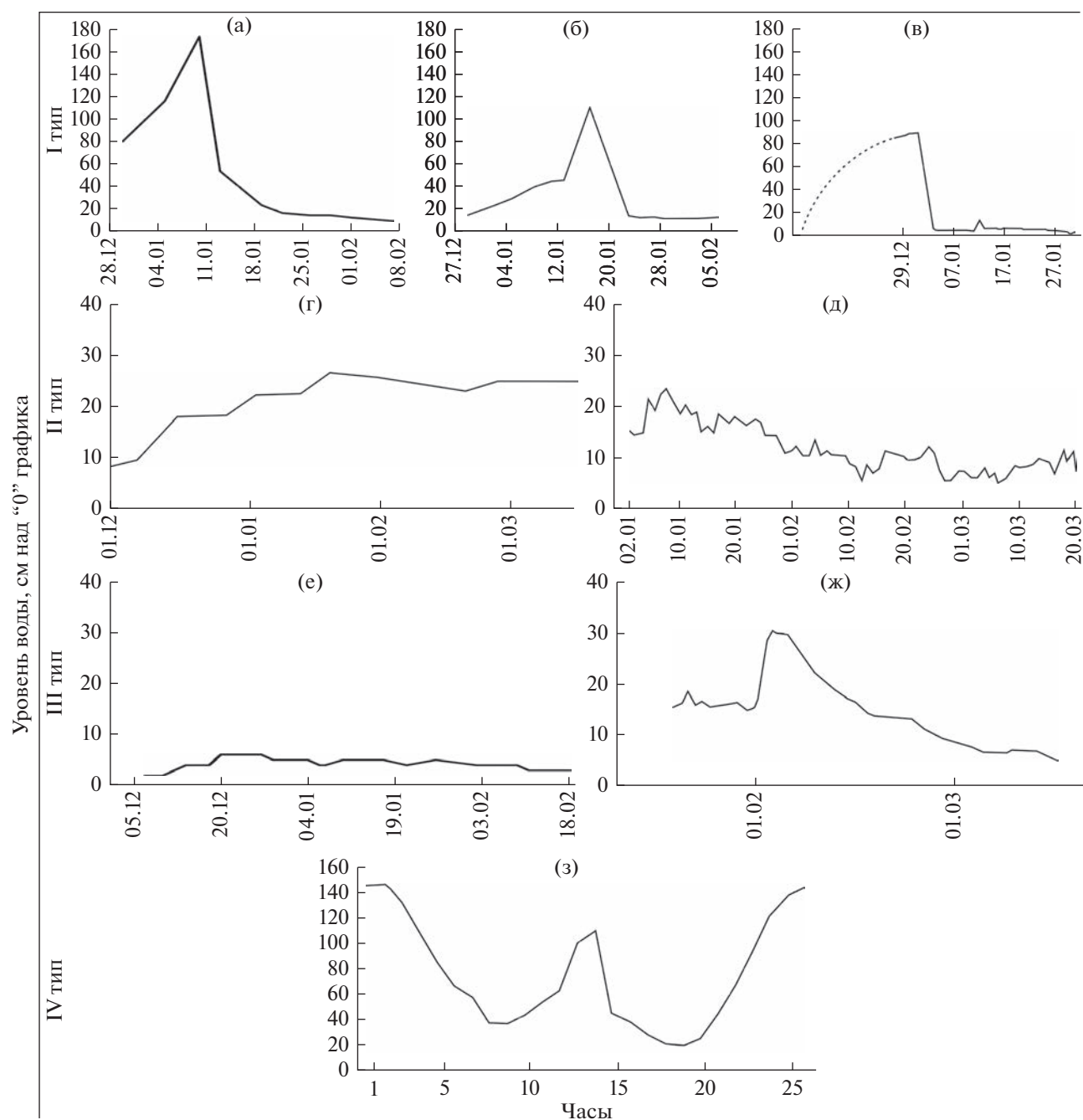


Рис. 2. Примеры наблюдаемых уровней колебаний антарктических озер различных типов. (а) – Глубокое (2013–2014 гг.) (Отчет ..., 2014), (б) – Дискашн (2017–2018 гг.), (в) – Сибторп (2013–2014 гг.) по (Shevnina and Kourzneva, 2017), (г) – Фрюкселль (2005–2006 гг.) по (Dugan, 2014), (д) – Долинное (1992 г.) по (Научно-технический отчет ..., 1992), е – Скандретт (2021–2022 гг.), (ж) – Фигурное (1987 г.) по (Атлас океанов ..., 2005), (з) – Полянского (1988 г.) по (Отчет ..., 1988). Пунктиром показан экстраполированный ход уровня.

III-2. Низкоамплитудные колебания с кратковременным (до нескольких суток) подъемом уровня при прохождении прорывного паводка из вышележащего водоема; амплитуда колебаний уровня от 0.1 м (рис. 2ж). Тип характерен для сточных (в случае формирования гидравлического каскада) и проточных водоемов, не подпруженных естественными плотинами.

IV тип: приливно-отливной

Внутрисуточные колебания уровня, обусловленные приливно-отливными явлениями (рис. 2з)³.

³ Для примера дан график хода уровня оз. Полянского (оазис Бангера); согласно (Научно-технический отчет..., 1992; Отчет ..., 1988) характер колебаний эпителизовых озер этого оазиса неправильный суточный.

Уровенные колебания озер оазисов Восточной Антарктиды проявляются в различных временных масштабах (вековом, многолетнем, сезонном, суточном), что в настоящей типизации нашло отражение в разной продолжительности фазы наполнения: многолетней или сезонной. Выраженные суточные колебания известны только для эпিশельфовых озер. Таким образом, типизация предполагает все варианты, кроме векового.

За рамками настоящей работы остались *внутриледниковые и подледниковые озера*, фактической информации о которых крайне мало. Примером внутриледникового водоема является объект в оазисе Холмы Ларсеманн, расположенный в выводной части ледника Долк (Boronina et al., 2021). Примеров подледниковых водоемов непосредственно вблизи оазисов Восточной Антарктиды пока не выявлено, однако их потенциальное существование возможно. Аналогичные объекты широко представлены во внутриконтинентальных районах. Эти водоемы перекрыты ледником, питание происходит в основном за счет талых ледниковых вод. Изменение их объема и может происходить как в многолетнем, так и в сезонном временном масштабе (Siegfried and Fricker, 2021; Smith et al., 2009). В отличие от поверхностных водоемов, уровенные колебания таких озер во многом обусловлены динамикой ледника. Абсолютные значения величины роста уровня могут составлять как первые десятки сантиметров, так и первые метры. Примечательно, что внутриледниковые и подледниковые водоемы так же могут прорываться и образовывать каскады (Fricker and Scambos, 2009). Таким образом, теоретически их можно отнести к типам I и II.

Отметим, что уровенный режим водоемов, подпруженных снежно-фирновыми плотинами, с течением времени может изменяться в зависимости от механического состояния последних. Здесь авторы имеют в виду ситуацию формирования/неформирования снежников на пути оттока воды из озера. Так, отток из оз. Поморника и Смирнова в оазисе Ширмахера не был затруднен снежником в 2013–2014 гг. и характерные для этих озер прорывы через снежники в этот сезон не происходили (Отчет ..., 2014). Формирование снежника на пути оттока воды из оз. Скандретт в оазисе Холмы Ларсеманн спровоцировало его прорыв в 2017–2018 гг., при этом в последующие годы снежник отсутствовал.

В условиях меняющегося климата такие процессы как деградация оазисов, иссушение территорий, сокращение/увеличение площадей снежников и др. обуславливают изменения гидрологического режима водоемов. Предложенная типизация позволяет учитывать эти трансформации через выявленные закономерности смен типов озер:

— для озер, расположенных на материковом леднике, возможна смена режимов прорывного (I) типа на тенденциальный (II) и наоборот, при этом принципиально невозможен уровенный режим транзитного типа (III);

— для внеледниковых водоемов возможна смена режимов прорывного (I) типа на транзитный (III) и наоборот, а также смена между подтипами II-1 (направленный рост) и II-2 (направленное снижение уровня);

— для эпিশельфовых водоемов смена типа (IV – приливно-отливной) мало вероятна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы выявлены 4 типа (прорывной, тенденциальный, транзитный, приливно-отливной) и 8 подтипов уровенного режима водоемов оазисов Восточной Антарктиды. Впервые при типизации антарктических озер в качестве критерия использовался характер изменения уровня воды, который, с одной стороны, является интегральным показателем совокупности природных процессов на водосборах, а с другой – внутренних процессов и свойств самого водоема. Теоретическая значимость предложенной типизации заключается в обобщение и систематизации новых данных о процессах и явлениях, протекающих в водоемах, и факторах, на них влияющих, т.е. получение нового знания. Предлагаемая типизация, в отличие от аналогичных, может быть использована для решения практических задач, позволяя в условиях недостаточной изученности водоемов по минимальному набору информации быстро получить объективное представление о типе уровенного режима и некоторых других характеристиках гидрологического режима водоемов (в том числе их прорывоопасности). Это является важным при принятии решений по организации логистических путей, водоснабжения полярных станций и полевых баз, выборе репрезентативных полигонов для проведения мониторинговых наблюдений, а также по защите территории и людей от опасных явлений. Отметим, что необходимая для определения типа водоема информация может быть получена оперативно: в ходе визуального обследования местности при рекогносцировке либо анализе картографического материала и данных ДДЗ. Типизация является открытой и будет актуализироваться по мере накопления информации об озерах антарктических оазисов. Предложенный принцип типизации водоемов, использующий особенности уровенного режима, может быть применен к озерам, встречающимся в других районах криолитозоны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Российскую Антарктическую экспедицию за возможность проведения полевых работ и помощь в их организации. Также авторы благодарят Э.Р. Киньябаеву за предоставленные материалы гидрологических наблюдений в сезон 66 РАЭ.

FUNDING

The work was carried out with the financial support of the RFBR grant no. 20-05-00343 A.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the Russian Antarctic Expedition for the opportunity to conduct and assist in field work organization, as well as to E.R. Kiniabaeva for the provided data of hydrological observations of the 66th RAE season.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас океанов. Антарктика / отв. ред. В.И. Куроедов. Главное управление навигации и океанографии министерства обороны Российской Федерации, 2005. 280 с.
- Боронина А.С. Крупные прорывы озер антарктических оазисов: обобщение современных знаний // Лёд и Снег. 2022. № 1 (62). С. 141–160. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010122>
- Каун Э.Б. Водоемы оазиса Ширмахера. Общая характеристика, температурный и радиационный режим // Информационный бюллетень Советской Антарктической экспедиции. 1981. № 101. С. 75–84.
- Клоков В.Д., Веркулич С.Р. Особенности гидрологического режима водоемов оазиса Бангера // Информационный бюллетень Российской Антарктической экспедиции. 1994. № 118. С. 60–68.
- Короткевич Е.С. Полярные пустыни. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 420 с.
- Материалы по гидрологии. Сезон 36 САЭ, оазис Бангера / отв. исп. В.Б. Савин. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № В-5026. 1991.
- Наставления Гидрометеорологическим станциям и постам. М.: Госкомгидромет, 1973. Вып. 7. Ч. I. 261 с.
- Научно-технический отчет 52-й РАЭ (сезонный состав) / отв. исп. начальник 52-й РАЭ В.В. Киселев (сезонная часть). Т. 1. Антарктида. Ноябрь 2006 г.—май 2007 г. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3640. 2007. 237 с.
- Научно-технический отчет выполнения программ сезонных гидроэкологических работ на станции Прогресс в период сезонной 57 РАЭ / отв. исп. А.И. Зубов, А.А. Краснов. Антарктида, оазис Холмы Ларсеманн, 2011–2012. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3802. 2012. 27 с.
- Научно-технический отчет о выполнении программы “Комплексные исследования рельефа, снежников и краевой зоны ледникового покрова в районе станции Новолазаревская” в сезонный период 58-й РАЭ (2012–2013 гг.) / отв. исп. О.В. Степанова. Санкт-Петербург. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3822. 2013. 26 с.
- Научно-технический отчет о работе палеографического отряда на ст. Новолазаревская. 53-я Российская антарктическая экспедиция / отв. исп. С.Р. Веркулич. Антарктида, ст. Новолазаревская. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3650. 2008. 33 с.
- Научно-технический отчет по программе гидрологических исследований на станции Прогресс в сезонный период 62-й РАЭ / отв. исп. Ю.А. Дворников. Санкт-Петербург. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-4033. 2017. 50 с.
- Научно-технический отчет полевой базы оазис Бангера 37-й сезонной САЭ. Санкт-Петербург. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3208. 1992. 84 с.
- Отчет о выполнении научных программ, технических заданий и логистических операций сезонной 57 Российской антарктической экспедиции. Т. 2. Экспедиционные работы и натурные исследования по действующей федеральной программе в сезон 57-й РАЭ. Антарктида—Санкт-Петербург. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3804. 2012. 425 с.
- Отчет о выполнении программы “Комплексные исследования рельефа, снежников и краевой зоны ледникового покрова в районе станции Новолазаревская” в сезонный период 59-й РАЭ (2012–2013 гг.) / отв. исп. О.В. Степанова. Антарктида, ст. Новолазаревская. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3851. 2014. 46 с.
- Отчет о выполнении программы “Комплексные исследования рельефа, снежников и краевой зоны ледникового покрова в районе станции Новолазаревская” в сезонный период 57-й РАЭ (2011–2012 гг.) / отв. исп. М.А. Анисимов. Антарктида, ст. Новолазаревская. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3785. 2012. 33 с.
- Отчет о гидрологических наблюдениях, проведенных в оазисе Бангера (Берег Нокса, Восточная Антарктида) в сезон 36-й САЭ / отв. исп. В.Б. Савин. Санкт-Петербург. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3192. 1991. 18 с.
- Отчет о гляцио-географических работах в районе ст. Молодежная в сезон 1965–1970 гг. / исп. В.Д. Клоков. Южнополярная станция Молодежная. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-1790. 1970. 34 с.
- Отчет о проведенных гидрологических работах в оазисе Бангера в 33-й сезонной САЭ м.н.с. полевой базы “Оазис” Куржунова А.Н. / исп. А.А. Лоопман, В.Б. Савин. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № 187207. 1988.
- Отчет сезонной 61-й Российской антарктической экспедиции. Т. 2. О выполнении научных программ / Антарктика. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. Инв. № О-3932. 2016. 492 с.
- Полевой отчет о проведении ледоисследовательских изысканий в районе Российских антарктических станций Прогресс и Мирный в сезон 63-й РАЭ. Т. 1 /

- гл. спец. С.В. Попов. НЭС “Академик Федоров”. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. 2018. 80 с.
- Полевой отчет о проведении ледоисследовательских изысканий в районе Российских антарктических станций Прогресс, Мирный, Новолазаревская и полевых баз Молодежная, оазис Бангера в сезон 64-й РАЭ. Т. 1 / отв. исп. С.Д. Григорьева. НЭС “Академик Федоров”. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. 2019. 62 с.
- Полевой отчет о работах отряда инженерных изысканий в сезон 65-й РАЭ / отв. исп. С.Д. Григорьева. НЭС “Академик Федоров”. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. 2020. 170 с.
- Полевой отчет о работах отряда инженерных изысканий в сезон 67-й РАЭ / отв. исп. С.Д. Григорьева. НЭС “Академик Федоров”. Госфонд ФГБУ “ААНИИ”. 2022. 77 с.
- План управления Особо Управляемым Районом Антарктики “Холмы Ларсеманн”, Восточная Антарктика. Заключительный отчет XXXVII Консультативного совещания по Договору об Антарктике, ОУРА № 6 – Холмы Ларсеманн, 2014. 41 с.
- Симонов И.М. Оазисы Восточной Антарктиды / под ред. Ю.А. Кручинина. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 176 с.
- Сократова И.Н. Гидрологические исследования в антарктических оазисах // Метеорология и гидрология. 2011. № 3. С. 91–103.
- Сократова И.Н. Антарктические оазисы: история и значение термина // Материалы гляциологических исследований. 2007. № 103. С. 25–29.
- Федорова И.В. Современное состояние и устойчивость к воздействию внутренних водоемов Антарктиды. Дисс. ... канд. геогр. наук. СПб., 2003. 236 с.
- Шаров А.Н., Толстиков А.В. Гидрологический и биологический режимы озер Восточной Антарктиды // Трансформация экосистем. 2020. Т. 3. № 3. С. 77–86.
- <https://doi.org/10.23859/estr-200318>
- Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on Dalk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity // J. of Glaciology. 2021. № 266 (67). P. 1121–1136. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.58>
- Dugan H.A. Geophysics, Water Balance, and History of Thick Perennial Ice Covers on Antarctic Lakes. Chicago, Illinois, 2014. 109 p.
- Fricker H.A., Scambos T. Connected subglacial lake activity on lower Mercer and Whillans ice streams, West Antarctica 2003–2008 // J. of Glaciology. 2009. № 55 (190). P. 303–315.
- Laybourn-Parry J., Wadham J.L. Antarctic Lakes. NY: Oxford Univ. Press, 2014. 215 p.
- Riffenburgh B. Encyclopedia of the Antarctic. Taylor & Francis, 2007. Vol. 1. 1146 p.
- Shevnina E., Kourzeneva E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fil-des peninsula and the Larsemann Hills // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2017. Vol. 69. № 1. 24 p. <https://doi.org/10.1080/16000870.2017.1317202>
- Siegfried M.R., Fricker H.A. Illuminating active subglacial lake processes with ICESat-2 laser altimetry // Geophysical Res. Lett. 2021. Vol. 48. № 14.
- Smith B.E., Fricker H.A., Joughin I.R., Tulaczyk S. An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003–2008) // J. of Glaciology. 2009. № 55 (192). P. 573–595.
- Swadling K.M., Dartnall H.J.G., Gibson J.A.E., Saulnier-Talbot E., Vincent W.F. Fossil Rotifers and the Early Colonization of an Antarctic Lake // Quat. Res. 2001. № 55 (3). P. 380–384. <https://doi.org/10.1006/qres.2001.2222>

Typization of Lakes of the East Antarctica Oases

G. V. Pryakhina^{a, *}, M. R. Kuznetsova^{a, b}, E. S. Zelepukina^c, A. S. Boronina^{a, d, e}, S. V. Popov^{a, e, f}, S. D. Grigoreva^b, A. A. Chetverova^{a, b}, and M. P. Kashkevich^a

^aSaint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

^bArctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

^cBonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia

^dState Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

^eMelnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia

^fPolar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia

*e-mail: g.pryakhina@spbu.ru

The urgency of creating a new complex typization of lakes of the East Antarctica oases is dictated not only by the desire to summarize accumulated Antarctic lakes' data but also by the need to obtain the most informative characteristics of lake hydrological regime in the region for solving a wide applied problems' range. Features of lake water level changes were used as a criterion in developing the complex typization of lakes of the East Antarctica oases for the first time, in contrast to existing classifications. The study was based on the analysis of literary and archive materials (the Larsemann Hills, the Schirmacher oasis, the Banger Hills, the Molodezhnyi oasis, the Vestfold Hills, and the McMurdo Dry Valleys), as well as our own expeditionary data (field seasons of 2017–2022, the Larsemann Hills). A group of indirect criteria (presence and type of natural dam, position in the cascade, flowage type, etc.) is proposed in addition to a group of direct criteria (duration of the lake filling phase, water level rise, etc. requiring organization of field observations) to obtain a holistic

view of the water level regime of lakes. It is important that characteristics of the most indirect criteria can be obtained by visual reconnaissance surveys or by maps and remote sensing data. The identified 4 types (outbursting, tendentious, transit, and tidal) and 8 subtypes of lakes were illustrated by generalized graphs of water level changes, which objectively characterize the features of the lake hydrological regime. The openness of the typization suggests the opportunities for actualization with the accumulation of new scientific knowledge and data.

Keywords: Antarctic lakes, water level, outburst flood, hydrological regime, snow-ice dam

REFERENCES

- Antarctic Lakes*. Laybourn-Parry J., Wadham J.L., Eds. N.Y.: Oxford Univ. Press, 2014. 215 p.
- Atlas okeanov. Antarktika* [Atlas of the Oceans. Antarctica]. Kuroedov V.I., Ed. St. Petersburg: Glav. Upravl. Navigats. Okeanograf. Minist. Oborony Ross. Fed., 2005. 280 p.
- Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on Dalk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity. *J. Glaciol.*, 2021, vol. 67, no. 266, pp. 1121–1136. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.58>
- Boronina A.S. Large-scale outbursts of lakes in the Antarctic oases: current knowledge. *Led i Sneg*, 2022, vol. 62, no. 1, pp. 141–160. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673422010122>
- Encyclopedia of the Antarctic*. Riffenburgh B., Ed. Routledge, 2007. 1146 p.
- Fedorova I.V. The current state and resistance to the effects of the internal reservoirs of Antarctica. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. St. Petersburg, 2003. 236 p.
- Fricker H.A., Scambos T. Connected subglacial lake activity on lower Mercer and Whillans ice streams, West Antarctica 2003–2008. *J. Glaciol.*, 2009, vol. 55, no. 190, pp. 303–315.
- Geophysics, Water Balance, and History of Thick Perennial Ice Covers on Antarctic Lakes*. Dugan H.A., Ed. Chicago, Illinois, 2014. 109 p.
- Gosfond FGBU “AANII”. Inv. № 187207: *Otchet o provedeniykh gidrologicheskikh rabotakh v oazise Bangera v 33 sezonnoi SAE m.n.s. polevoi bazy “Oazis” Kurzhunova A.N.* [Funds of FSBI “AARI”. No. 187207: Report of Junior Research Assistant of Field Base “Oasis” Kurzhunov A.N. on the Hydrological Work Carried Out in the Banger Oasis in the 33rd Seasonal SAE]. Loopman A.A., Savin V.B., Eds. 1988.
- Gosfond FGBU “AANII”. Inv. № O-1790: *Otchet o glyatsio-geograficheskikh rabotakh v raione st. Molodezhnaya v sezon 1965–1970 gg.* [Funds of FSBI “AARI”. No. O-1790: Report on Glacio-Geographical Works in the Area of the Molodezhnaya Station in the Season of 1965–1970]. Klovov V.D., Ed. Leningrad, 1970. 34 p.
- Gosfond FGBU “AANII”. Inv. № O-3192: *Otchet o gidrologicheskikh nablyudeniyakh, provedennykh v oazise Bangera (Bereg Noksa, Vostochnaya Antarktida) v sezon 36-i SAE* [Funds of FSBI “AARI”. No. O-3192: Report on the Hydrological Observations Carried out in the Banger Oasis (Knox Coast, East Antarctica) during the 36th SAE Season]. Savin V.B., Ed. St. Petersburg, 1991. 18 p.
- Gosfond FGBU “AANII”. Inv. № O-3208: *Nauchno-tehnicheskii otchet polevoi bazy oazisa Bangera 37 sezonnoi SAE* [Funds of FSBI “AARI”. No. O-3208: Scientific and Technical Report of the Banger Oasis Field Base of the 37th Seasonal SAE]. St. Petersburg, 1992. 84 p.
- Gosfond FGBU “AANII”. Inv. № O-3640: *Nauchno-tehnicheskii otchet 52-i RAE (sezonnnyy sostav). Tom 1. Antarktida. Noyabr’ 2006 g. – Mai 2007 g.* [Funds of FSBI “AARI”. No. O-3640: Scientific and Technical Report of the 52nd RAE (Seasonal). Vol. 1. Antarktida. November 2006–May 2007]. Kiselev V.V., Ed. St. Petersburg, 2007. 237 p.
- Gosfond FGBU “AANII”. Inv. № O-3650: *Nauchno-tehnicheskii otchet o rabote paleograficheskogo otryada na st. Novolazarevskaya. 53 Rossiiskaya antarkticheskaya ekspeditsiya* [Funds of FSBI “AARI”. No. O-3650: Scientific and Technical Report on the Works of the Paleogeographical Group in the Area of the Novolazarevskaya Station. The 53rd Russian Antarctic Expedition]. Verkulich S.R., Ed. St. Petersburg, 2008. 33 p.
- Gosfond FGBU “AANII”. Inv. № O-3785: *Otchet o vypolnenii programmy “Kompleksnye issledovaniya rel’efa, snezhnikov i kraevoy zony lednikovogo pokrova v raione stantsii Novolazarevskaya” v sezonnyi period 57 RAE (2011–2012 gg.)* [Funds of FSBI “AARI”. No. O-3785: Report on the Implementation of the Program “Comprehensive Studies of Relief, Snowfields and the Ice Cover Marginal Zone in the Novolazarevskaya Station Area” during the 57th RAE Season (2011–2012)]. Anisimov M.A., Ed. St. Petersburg, 2012. 33 p.
- Gosfond FGBU “AANII”. Inv. № O-3802: *Nauchno-tehnicheskii otchet vypolneniya programm sezonnogo gidroekologicheskikh rabot na stantsii Progress v period sezonnoi 57 RAE. Antarktida, oazis Kholmy Larsemann, 2011–2012* [Funds of FSBI “AARI”. No. O-3802: Scientific and Technical Report on the Implementation of the Program of Seasonal Hydrological and Ecological Works on the Progress Station in the Season of the 52nd RAE. Antarktida, the Larsemann Hills, 2011–2012]. Zubov A.I., Krasnov A.A., Eds. St. Petersburg, 2012. 27 p.
- Gosfond FGBU “AANII”. Inv. № O-3804: *Otchet o vypolnenii nauchnykh programm, tekhnicheskikh zadaniy i logisticheskikh operatsiy sezonnoi 57 Rossiiskoi antarkticheskoy ekspeditsii. T. 2. Ekspeditsionnye raboty i naturnye issledovaniya po deistviyushchei federal’noi programme v sezon 57-i RAE* [Funds of FSBI “AARI”. No. O-3804: Report on the Implementation of the Scientific Programs, Technical Tasks and Logistics Operations of the Seasonal 57th Russian Antarctic Expedition. Vol. 2. Expedition Works and Field Research under the Current Federal Program in the Season of the 57th RAE]. St. Petersburg, 2012. 425 p.

- Gosfond FGBU "AANII". Inv. № O-3822: *Nauchno-tehnicheskii otchet o vypolnenii programmy "Kompleksnye issledovaniya rel'efa, snezhnikov i kraevoi zony lednikovogo pokrova v raione stantsii Novolazarevskaya" v sezonnyi period 58-i RAE (2012–2013 gg.)* [Funds of FSBI "AARI". No. O-3822: Scientific and Technical Report on the Implementation of the Program "Comprehensive Studies of Relief, Snowfields and the Ice Cover Marginal Zone in the Novolazarevskaya Station Area" in the season of the 58th RAE (2012–2013)]. Stepanova O.V., Ed. St. Petersburg, 2013. 26 p.
- Gosfond FGBU "AANII". Inv. № O-3851: *Otchet o vypolnenii programmy "Kompleksnye issledovaniya rel'efa, snezhnikov i kraevoi zony lednikovogo pokrova v raione stantsii Novolazarevskaya" v sezonnyi period 59 RAE (2012–2013 gg.)* [Funds of FSBI "AARI". No. O-3851: Report on the Implementation of the Program "Comprehensive Studies of Relief, Snowfields and the Ice Cover Marginal Zone in the Novolazarevskaya Station Area" during the 59th RAE Season (2012–2013)]. Stepanova O.V., Ed. St. Petersburg, 2014. 46 p.
- Gosfond FGBU "AANII". Inv. № O-3932: *Otchet sezonnoi 61-i Rossiiskoi antarkticheskoi ekspeditsii. T. 2. O vypolnenii nauchnykh programm* [Funds of FSBI "AARI". No. O-3932: Report of the 61st Russian Antarctic Expedition. Vol. 2. Implementation of the Scientific Programs]. St. Petersburg, 2016. 492 p.
- Gosfond FGBU "AANII". Inv. № O-4033: *Nauchno-tehnicheskii otchet po programme gidrologicheskikh issledovaniy na stantsii Progress v sezonnyi period 62-i RAE* [Funds of FSBI "AARI". No. O-4033: Scientific and Technical Report on the Program of Hydrological Studies in the Area of the Progress Station in the Season of the 62nd RAE]. Dvornikov Yu.A., Ed. St. Petersburg, 2017. 50 p.
- Gosfond FGBU "AANII". *Polevoi otchet o provedenii ledo-issledovatel'skikh izyskaniy v raione rossiiskikh antarkticheskikh stantsii Progress i Mirnyi v sezon 63-i RAE. Tom 1* [Funds of FSBI "AARI". Field Report on the Ice Exploration in the Area of the Russian Antarctic Stations Progress and Mirny during the Season of the 63rd RAE. Vol. 1]. Popov S.V., Ed. St. Petersburg, 2018. 80 p.
- Gosfond FGBU "AANII". *Polevoi otchet o provedenii ledo-issledovatel'skikh izyskaniy v raione rossiiskikh antarkticheskikh stantsii Progress, Mirnyi, Novolazarevskaya i polevykh baz Molodezhnaya, oazis Bangera v sezon 64-i RAE. Tom 1* [Funds of FSBI "AARI". Field Report on the Ice Exploration in the Area of the Russian Antarctic Stations Progress, Mirny, Novolazarevskaya and Molodezhnaya, Bangera Oasis Field Bases during the Season of the 64th RAE. Vol. 1]. Grigoreva S.D., Ed. St. Petersburg, 2019. 62 p.
- Gosfond FGBU "AANII". *Polevoi otchet o rabotakh otryada inzhenernykh izyskaniy v sezon 65-i RAE* [Funds of FSBI "AARI". Field Report on the Work of the Engineering Survey Group during the 65th RAE Season]. Grigoreva S.D., Ed. St. Petersburg, 2020. 170 p.
- Gosfond FGBU "AANII". *Polevoi otchet o rabotakh otryada inzhenernykh izyskaniy v sezon 67-i RAE* [Funds of FSBI "AARI". Field Report on the Work of the Engineering Survey Group during the 67th RAE Season]. Grigoreva S.D., Ed. St. Petersburg, 2022. 77 p.
- Gosfond FGBU "AANII". Inv. № V-5026: *Materialy po gidrologii. Sezon 36 SAE, oazis Bangera*. [Funds of FSBI "AARI". No. V-5026: Materials on Hydrology. The Season of the 36th SAE, the Banger Hills]. Savin V.B., Ed. St. Petersburg, 1991.
- Kaup E.B. Reservoirs of the Schirmacher oasis. General characteristic, temperature and radiation regimes. *Inform. Byull. Sovet. Antarkt. Eksped.*, 1981, no. 101, pp. 75–84. (In Russ.).
- Klov V.D., Verkulich S.R. Features of hydrological regime of reservoirs in the Banger Hills. *Inform. Byull. Sovet. Antarkt. Eksped.*, 1994, no. 118, pp. 60–68. (In Russ.).
- Korotkevich E.S. *Polyarnye pustyni* [Polar Deserts]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1972. 420 p.
- Management plan of the Antarctic Specially Managed Area "Larsemann Hills", East Antarctica. Final report of the XXXVII Antarctic Treaty Consultative Meeting, ASMA no. 6*. Larsemann Hills, 2014. 41 p.
- Nastavleniya Gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vyp. 7, ch. I* [Instructions for Hydrometeorological Stations and Posts. Vol. 7, part I]. Moscow: Goskomgidromet Publ., 1973. 261 p.
- Simonov I.M. *Oazisy Vostochnoi Antarktidy* [Oases of East Antarctica]. Kruchinin Yu.A., Ed. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1971. 176 p.
- Sokratova I.N. Antarctic oases: history and meaning of the term. *Mater. Gliats. Issled.*, 2007, no. 103, pp. 25–29. (In Russ.).
- Sokratova I.N. Hydrological investigations in the Antarctic oases. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, no. 36, pp. 207–215. <https://doi.org/10.3103/S1068373911030083>
- Sharov A.N., Tolstikov A.V. Hydrological and biological regimes of lakes of East Antarctica. *Ecosystem Transformation*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 3–11. <https://doi.org/10.23859/estr-200318>
- Shevnina E., Kourzenova E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fil-des peninsula and the Larsemann Hills. *Tellus A: Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, 2017, vol. 69, no. 1, article 1317202. <https://doi.org/10.1080/16000870.2017.1317202>
- Siegfried M.R., Fricker H.A. Illuminating active subglacial lake processes with ICESat-2 laser altimetry. *Geophys. Res. Lett.*, 2021, vol. 48, no. 14. <https://doi.org/10.1029/2020GL091089>
- Smith B.E., Fricker H.A., Joughin I.R., Tulaczyk S. An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003–2008). *J. Glaciol.*, 2009, vol. 55, no. 192, pp. 573–595.
- Swadling K.M., Dartnall H.J.G., Gibson J.A.E., Saulnier-Talbot E., Vincent W.F. Fossil Rotifers and the Early Colonization of an Antarctic Lake. *Quat. Res.*, 2001, vol. 55, no. 3, pp. 380–384. <https://doi.org/10.1006/qres.2001.2222>