

УДК 502/504(99-923.1(3))

Редакционная коллегия:

академик НАН Беларуси, д-р геогр. наук, профессор *В.Ф. Логинов*,  
д-р физ.-мат. наук, профессор *С.А. Лысенко*,  
канд. геогр. наук, доцент *В.А. Рыжиков*,  
канд. биол. наук, доцент *Ю.Г. Гигиняк*

Рецензенты:

д-р геогр. наук, профессор *А.А. Волчек*,  
д-р геогр. наук, профессор *П.С. Лопух*

**Природная среда Антарктики:** междисциплинарные подходы к изучению : сб. материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований», Домжерицы, 21–23 сент. 2022 г. / редкол. : В.Ф. Логинов, С.А. Лысенко, В.А. Рыжиков, Ю.Г. Гигиняк. – Минск : БГТУ, 2022. – 284 с.

ISBN 978-985-897-041-3.

В сборник включены доклады IV-й Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований» (21–23 сентября 2022 года; на базе Государственного природоохранного учреждения «Березинский биосферный заповедник», пос. Домжерицы, Витебская область, Республика Беларусь).

The conference proceeding include papers of the IV International Scientific and Practical Conference “The Natural Environment of Antarctica: Cross-Disciplinary Study Approaches”, dedicated to the 15th Anniversary of the Republican Center for Polar Research (21–23 September 2022; on the basis of the State Nature Protection Institution “Berezinsky Biosphere Reserve”, Republic of Belarus, Vitebsk region, Domzheritsy).

**ISBN 978-985-897-041-3**

© Институт природопользования  
НАН Беларуси, 2022

© Оформление. УО «Белорусский  
государственный технологический  
университет», 2022

## ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЁР ОАЗИСА ШИРМАХЕРА (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЛЕВЫХ РАБОТ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.С. Боронина<sup>1,2,3</sup>, С.В. Попов<sup>4,2,3</sup>, М.П. Кашкевич<sup>2</sup>, Г.В. Пряхина<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия;

<sup>4</sup>АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербург, Россия;

al.b.s@yandex.ru

**Аннотация.** Изучение нестабильных ледниковых озёр антарктических оазисов – востребованная задача как для фундаментальной науки, так и для практических целей. Это связано с тем, что такие водоёмы являются показательными индикаторами изменения климата и динамики самих ледников, а также с тем, что их эволюция зачастую провоцирует катастрофические явления. Настоящая работа посвящена исследованию ледниковых озёр в окрестностях станции Новолазаревская и, прежде всего, озера Топографов. На его примере удалось показать, как объединение результатов полевых исследований и моделирования позволило оценить динамику развития озера и решить ряд прикладных задач.

**Ключевые слова:** ледниковые озёра; математическое моделирование; Новолазаревская; оазис Ширмахера; Восточная Антарктида.

## ON THE EVOLUTION OF GLACIAL LAKES IN THE SCHIRMACHER OASIS (EAST ANTARCTICA) BASED ON THE RESULTS OF FIELD RESEARCH AND MATHEMATICAL MODELLING

A.S. Boronina<sup>1,2,3</sup>, S.V. Popov<sup>4,2,3</sup>, M.P. Kashkevich<sup>2</sup>, G.V. Pryakhina<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

<sup>3</sup>Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia;

<sup>4</sup>Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia;

al.b.s@yandex.ru

**Abstract.** The study of active glacial lakes in the Antarctic oases is a popular problem for both fundamental science and practical purposes. Firstly, this is a consequence of the fact that such lakes are indicators of climate change and glacier dynamics. Secondly, the evolution of active lakes often provokes catastrophic phenomena. This research is devoted to the study of glacial lakes near Novolazarevskaya Station and, above all, Lake Topographov. Using its example, we were able to show how combining the results of field research and modelling allows us to describe the development of Lake Topographov and solve a number of applied problems.

**Keywords:** glacial lakes; mathematical modelling; Novolazarevskaya Station; Schirmacher Oasis; East Antarctica.

Оазис Ширмахера располагается в прибрежной части Восточной Антарктиды на Земле Королевы Мод и представляет собой участок площадью около 35 км<sup>2</sup>, свободный от покровного оледенения. На севере оазис отделён от моря Лазарева шельфовым ледником Нивлисен шириной около 80 км, а с юга ограничен склоном материкового ледникового щита [6]. В юго-восточной части оазиса располагается российская станция Новолазаревская, а в 8-ми км от неё находится международный аэродром станции Новолазаревская (Novo Runway), который является одним из самых крупных в Антарктиде [4, 5]. В настоящее время аэродром интенсивно эксплуатируется, что объясняет повышенную нагрузку на ледовые трассы, соединяющие его со станцией. Кроме того, ситуация осложняется тем, что некоторые трассы проложены по замёрзшей поверхности ледниковых озёр, многие из которых подвержены прорывам в период интенсивного летнего таяния. Указать точное количество «активных» озёр оазиса

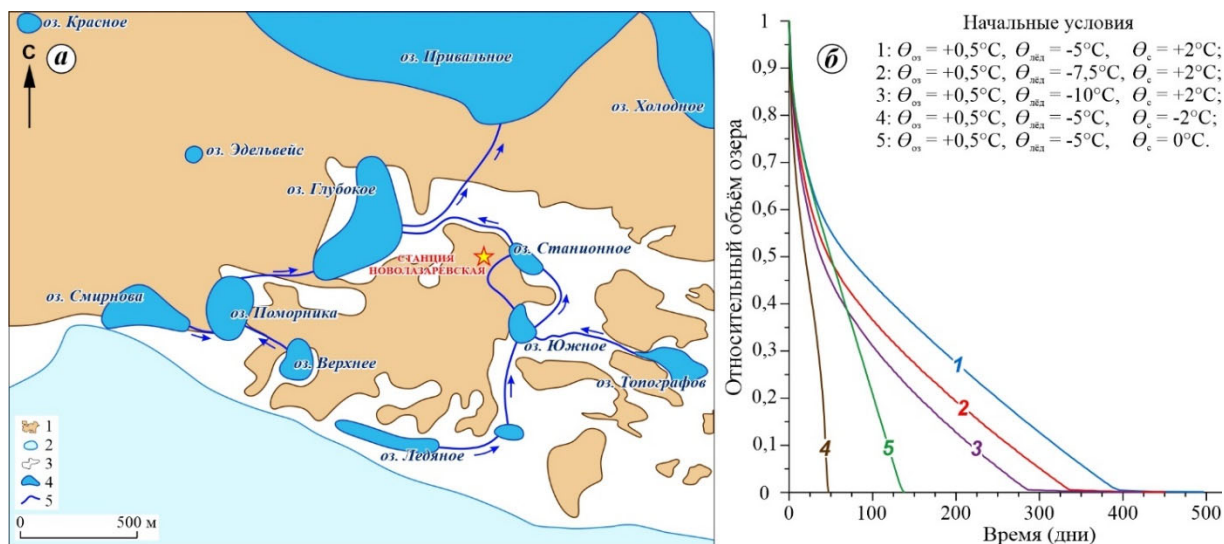
Ширмахера невозможно, поскольку на контакте с ледником и на его поверхности из года в год они могут то появляться, то исчезать [3]. С внезапными сбросами вод из озёр у станции Новолазаревская исследователи столкнулись уже в начале 1960-х годов, в период её строительства [1]. В результате последующих научных изысканий, выполняющихся на протяжении нескольких лет, было изучено и описано функционирование единой гидрологической системы, состоящей из озёр Верхнее, Смирнова, Поморника, Южное, Станционное и Глубокое (см. рисунок, секция а), которые и по настоящее время сбрасывают излишки водных масс практически ежегодно. О внутриледниковом и поверхностном стоке из озера Топографов, которое расположено выше и непосредственно на контакте с покровным ледником, стало известно позднее. Дополнительная мотивация к исследованию этого водоёма появилась в 2021 г. после того, как под озёрный лёд ушёл тягач, следовавший с аэродрома на станцию Новолазаревская.

Цель настоящей работы заключается в изучении особенностей развития ледниковых озёр (в т. ч. нестабильных) на примере озера Топографов. Моделирование эволюции именно этого водоёма связано с его нетипичным для оазисов географическим положением. Существенная удалённость района изысканий от побережья обеспечивает более суровые климатические условия, что оказывает влияние и на режим гидрологических объектов. Это означает, что процессы, протекающие в практически нескрывающихся ото льда озёрах оазиса Ширмахера, будут аналогичны тем, что происходят в подледниковых водоёмах. Кроме того, преобладающее ледниковое питание озера Топографов и его близость к леднику делает его показательным индикатором происходящих климатических изменений. Прикладные задачи, в свою очередь, были обусловлены необходимостью поиска безопасного участка для организации трассы, соединяющей станцию Новолазаревская и аэродром, а также локализацией затонувшего в озере тягача с составлением рекомендацией для его возможного подъёма. Таким образом, озеро Топографов стало показательным примером, где совпали интересы как фундаментальной науки, так и широко прикладных задач.

Для достижения поставленной цели воспользуемся данными полевых работ, а также выполним математическое моделирование. В состав полевых исследований в первую очередь входило проведение георадарного профилирования с использованием *OKO-2* и антенн с частотой зондирующих импульсов 150 МГц и 400 МГц, а также георадара *GSSI* с частотой зондирующих импульсов 900 МГц. Последний применялся именно под задачи локализации тягача и определения особенностей его расположения на дне озера. Плановая привязка обеспечена спутниковым приёмником *GARMIN GPSmap 6bst*. При работе в масштабе 1 : 500 и крупнее для разбивки маршрутов использовалась мерная лента. Для заверки и дополнения результатов георадарного профилирования на озере осуществлялось механическое бурение. Дополнительно в четырёх организованных скважинах измерялась температура в толще озёрного льда, ледника и воды. Максимальная глубина скважин составила 6 м. Измерение температуры проводилось от поверхности до дна (по несколько проходок) при помощи двухжильного температурного датчика с точностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Для получения высот дневной поверхности была выполнена тахеометрическая съёмка с использованием тахеометра *Trimble M3 DR 5"*. Этот вид работы был необходим, поскольку масштаба имеющихся топографических карт [2, 7] и разрешения цифровых моделей рельефа на этот район было недостаточно для выполнения специализированных расчётов. Кроме того, поверхность ледника, озёр и снежников постоянно изменяется, особенно в таких динамично развивающихся районах, как антарктические оазисы, что требует самостоятельного получения актуальных данных. Планово-высотная привязка осуществлялась к пунктам государственной геодезической сети. Указанный комплекс был реализован в рамках сезонных работ 67-й Российской антарктической экспедиции в ноябре–декабре 2021 г.

По результатам полевых работ было установлено, что озеро Топографов является приледниковым водоёмом, который не вскрывается ото льда в течение всего года. Лишь в периоды аномально тёплых летних сезонов некоторые части, примыкающие к скалам, освобождаются от него. Согласно данным георадарной съёмки, водоём полностью располагается в скальном основании. Его максимальная длина составила 280 м при ширине около 100 м. Площадь акватории оценена в 20,2 тыс. м<sup>2</sup>, а объём водной массы в 168 тыс. м<sup>3</sup>. Максимальная глубина озера составляет 13,7 м. Мелководная часть преимущественно промёрзла до дна. Средняя толщина льда над водой составляет 6,6 м при наибольшей величине 12,1 м. С юго-восточной стороны выявлено сползание материкового ледника и его натекание на поверхность озера Топографов. В его западной части был обнаружен внутриледниковый канал, который, вероятно, был выработан в результате сброса водных масс, накапливающихся в период интенсивного таяния. На данном этапе авторы затрудняются ответить, связан ли этот канал непосредственно с озером Топографов, либо же по нему происходит отток воды из снежницы, образующейся летом

на озёрном льду. На основании анализа распределения глубин и толщин льда было установлено, что трасса следования санно-гусеничного похода проходит в самом небезопасном месте – путь пересекает области наименьших толщин льда и довольно значительных глубин воды. В этой связи на участке после подъёма со стороны станции было рекомендовано сместить трассу на 150 м к северо-востоку и проложить её по береговой части, представленной скальными выходами, перекрытыми мощным (от 4 до 12 м) льдом. На участке затопления тягча была выполнена ещё более детальная георадарная съёмка с расстоянием между маршрутами 2 м. Согласно полученным данным, утонувший тягач располагается на грунте, на глубине около 5 м от текущей дневной поверхности. Значительный свал глубин усложняет его гипотетический подъём. Кроме того, его верхняя часть, вероятно, вмёрзла в лёд. Ввиду существенных различий коэффициента теплопроводности металла и льда, с течением времени тягач будет всё больше и больше обрастать льдом, что существенно усложнит процесс его подъёма уже через год.



**Схематическое отображение системы озёр в районе станции Новолазаревская (а) и результаты сценарных расчётов (б). На секции а: 1 – коренные породы; 2 – ледник; 3 – снежники; 4 – озёра; 5 – временные водотоки**

Собранные полевые материалы послужили для дальнейшего моделирования различных сценариев развития озера Топографов. Используемая математическая модель является двумерной и основана на численном решении уравнения теплопроводности. Модель предполагает наличие трёх областей: вода (озеро), лёд (озёрный и материковый) и скальные породы (гнейсы). В качестве начальных условий при различных сценариях расчёта температура воды в озере ( $\theta_{оз}$ ) всегда была принята близкой к температуре фазового перехода ( $+0,5^{\circ}\text{C}$ ). Для льда ( $\theta_{лед}$ ) приняты три разных варианта:  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-7,5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ , а для скальных пород ( $\theta_{с}$ ):  $+2^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-2^{\circ}\text{C}$ . В качестве граничных условий на правой, левой и нижней границах задана величина теплового потока Земли, а на дневной поверхности – среднегодовая температура воздуха по данным станции Новолазаревская ( $-10^{\circ}\text{C}$ ). В результате выполненного моделирования показано, что при всех заданных сценариях наблюдается постепенная деградация озера Топографов (рисунок, секция б). При этом скорость его промерзания зависит от распределения температуры в леднике и температуры подстилающего грунта. Чем более холодный ледник окружает водоём, тем быстрее происходит процесс деградации. В частности, при температуре ледника  $-5^{\circ}\text{C}$  и положительной температуре грунта озеро полностью промёрзнет за 490 дней. В случае если температура ледника опустится в среднем до  $-7,5^{\circ}\text{C}$ , процесс будет продолжаться 455 дней, а при понижении до  $-10^{\circ}\text{C}$  сократится до 420 дней. В случае отрицательной температуры подстилающего грунта скорость промерзания резко увеличивается. Например, при средней температуре ледника  $-5^{\circ}\text{C}$  и грунта  $-2^{\circ}\text{C}$  процесс полной деградации озера происходит за 45 дней. При всех прежних условиях, но температуре ложа  $0^{\circ}\text{C}$ , время промерзания составляет около 135 дней. Однако отметим, что полученные результаты – это только первые оценочные прикидки. Тем не менее общая тенденция развития водоёма определена – постепенная деградация, возможно с несколько иной скоростью, в зависимости от уточнения начальных и граничных условий. Для выяснения этого авторы планируют выполнить более тщательные расчёты, основанные на трёхмерном моделировании.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 20-05-00343.*

### Список использованной литературы

1. Аверьянов, В. Наводнение на станции Новолазаревской [Текст] / В. Аверьянов // Информ. бюл. САЭ. – 1965. – № 52. – С. 53–74.
2. Антарктика. Антарктика [Карты] : Атлас океанов / Отв. ред. В. И. Куроедов. – Санкт-Петербург : Гл. упр. навигации и океанографии м-ва обороны РФ Гос. науч. центр РФ Аркт. и Антаркт. науч.-исслед. ин-т, 2005. – 1 атл. (280 с., 19 с.) : цв., текст, табл., диагр., граф., профили, разрезы, ил., указ.
3. Боронина, А.С. Крупные прорывы озёр антарктических оазисов: обобщение современных знаний [Текст] / А. С. Боронина // Лёд и Снег. – 2022. – Т. 62. – № 1. – С. 141–160.
4. Поляков, С.П. Снежно-ледовые взлетно-посадочные полосы Российской антарктической экспедиции особенности подготовки и перспективы развития [Текст] / С. П. Поляков, В. Л. Мартьянов, В. В. Лукин // Российские полярные исследования. – 2015. – Т. 20. – № 2. – С. 31–35.
5. Попов, С.В. Комплексные инженерные изыскания в оазисе Ширмахера (Земля Королевы Мод, Восточная Антарктида) в сезон 67-й РАЭ [Текст] / С.В. Попов, М.П. Кашкевич, А.С. Боронина // Российские полярные исследования. – 2022. – № 1. – С. 12–16.
6. Симонов, И.М. Оазисы Восточной Антарктиды [Текст] / И.М. Симонов ; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-т. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1971. – 176 с.
7. Советская антарктическая научная станция Новолазаревская [Карты] : [топографическая карта] / сост. и подгот. к изд. ГУГК – 1 : 2000. – ГУГК, 1984.