

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КАК ОСНОВНОЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЛЕДНИКАХ И ПОДЛЕДНИКОВЫХ ВОДОЁМАХ АНТАРКТИДЫ

С.В. Попов^{1,2,3}, Г.В. Пряхина^{2,3}, А.С. Боронина^{4,2,3}, М.П. Кашкевич²

¹АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербург, Россия;

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

³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия;

⁴Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия;

spopov67@yandex.ru

Аннотация. Изучение гляциальных и субгляциальных гидрологических процессов невозможно выполнить прямыми методами. В этом случае на помощь приходит математическое моделирование с естественной опорой на данные полевых измерений. Самое важное его достоинство заключается в том, что модели позволяют осуществлять обоснованный прогноз развития природных процессов. Таким образом, математическое моделирование занимает достойное место среди методов познания природы.

Ключевые слова: математическое моделирование; подледниковые водоёмы; озеро Восток; Антарктида.

MATHEMATICAL MODELING AS THE BASIC METHOD FOR STUDYING PROCESSES IN GLACIERS AND SUBGLACIAL LAKES OF ANTARCTICA

S.V. Popov^{1,2,3}, G.V. Pryakhina^{2,3}, A.S. Boronina^{4,2,3}, M.P. Kashkevich²

¹Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia;

²Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia;

³Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia;

⁴State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia;

spopov67@yandex.ru

Abstract. The study of glacial and subglacial hydrological processes cannot be performed by direct methods. In this case, mathematical modeling based on the fieldwork data helps to better understanding of these. The most important advantage of the modelling is the possibility of the reasonable forecast of the development of natural processes. Thus, it occupies a worthy place among the methods of cognition of nature.

Keywords: mathematical modeling; subglacial lakes; Lake Vostok; Antarctica.

С момента своего открытия в первой четверти XVII в. и до сих пор, несмотря на усилия исследователей многих стран, Антарктида всё ещё остаётся *Terra Incognita*. Удалённость и суровые условия позволили начать её планомерное изучение только в рамках Первого Международного геофизического года (МГГ, 1957–1958 гг.). Кроме того, только лишь к этому времени на географические карты была полностью нанесена береговая линия Антарктиды [8]. Примерно к середине 60-х годов прошлого века, благодаря геофизическим исследованиям, которые выполнялись главным образом в составе санно-гусеничных походов, появились первые представления о подлёдной топографии континента и мощности ледника. Они были представлены в первом в мире Атласе Антарктики [1, 2]. Шли годы, но только к концу второй декады нашего века, благодаря интенсивному международному сотрудничеству и техническим достижениям, основные «белые пятна» на карте Антарктиды были закрыты. Данные о подлёдном рельефе и мощности ледника были объединены в рамках единого международного проекта Vedmar3, в котором участвует и Россия [8]. Результаты этого проекта ожидаются в самое ближайшее время.

Безотносительно степени изученности, данные о подлёдном рельефа и мощности ледникового покрова не могут в полной мере описать процессы, происходящие в леднике, а также на его ложе. Понимая это, ещё на заре планомерного изучения Антарктиды начали выполняться обширные гляциологические работы, направленные на комплексное изучение строения и динамики ледников. Они были связаны с именами выдающихся отечественных и зарубежных учёных, таких как У.Ф. Бадд, Дж. Глен,

И.А. Зотиков, М.С. Красс, Л. Ллибутри, Дж. Най, П.А. Шумский и многих других. Результаты полевых наблюдений и теоретические изыскания заложили основу современного математического моделирования в гляциологии и климатологии. Однако бурное развитие этого направления в науке и практическая реализация моделей стали возможными лишь через многие годы, а именно после появления эффективных и относительно дешёвых компьютерных систем. Однако вместе с тем в 60-х годах появились и первые значимые результаты моделирования. В частности, оценки, выполненные *И.А. Зотиковым* на основе первых, весьма немногочисленных данных, показали, что на большей части Антарктиды имеется донное таяние [4]. Следствием этого является возможность образования подледниковых водоёмов путём заполнения отрицательных форм рельефа талыми водами. Буквально через несколько лет появилось подтверждение этой гипотезы: в результате аэрорадиолокационных исследований в начале 70-х годов были открыты первые подледниковые озёра [15, 18]. Следует отметить, что современные исследования, несмотря на применение более сложных и точных моделей, основываясь на более качественных данных по мощности ледника и температуре ледовой толщи, полностью подтверждают выводы, сделанные *И.А. Зотиковым*.

Технологический прогресс, помимо развития компьютерной техники, привёл и к появлению высокоточных спутниковых систем, которые, помимо прочего, позволили совершенно по-другому посмотреть и на антарктический континент. Благодаря новым технологиям в конце прошлого века были сделаны удивительные открытия. Самым грандиозным стало открытие подледникового озера Восток [17]. В силу своего географического положения, впоследствии оно долгое время изучалось прежде всего отечественными специалистами [7, 9]. Несмотря на то, что первые подледниковые водоёмы были выявлены за два десятилетия до этого [15], повышенный интерес в научных кругах к гидрологическим процессам, протекающим на ложе ледника, начался, на наш взгляд, именно с открытия озера Восток. Можно с уверенностью говорить о том, что новое направление в науке, *субгляциальная гидрология*, начало развиваться именно с этого времени. Кульминацией стало проникновение в озеро Восток в феврале 2012 г. Это позволило впервые в истории произвести отбор проб воды из водоёма, который на протяжении миллионов лет был изолирован мощным ледником от окружающей среды [6].

Однако открытия на этом не закончились. Долгое время считалось, что подледниковые водоёмы представляют собой достаточно стабильные образования, но вскоре выяснилось, что это далеко не так. В 2006 г. в работе [20] были опубликованы результаты многолетних спутниковых исследований, которые показали, что подледниковые водоёмы способны прорываться, а их воды – перетекать из одного озера в другое. Согласно наиболее современным данным, на нашей планете насчитывается 773 подледниковых озёра, 675 из которых расположены под ледниковым покровом Антарктиды, при этом 140 из них являются активными, т. е. те, изменение объёма которых за наблюдаемый период инструментально регистрируется [14].

Поскольку изучение гляциальных и особенно субгляциальных гидрологических процессов не выполнить прямыми методами, на помощь приходит математическое моделирование (разумеется, с опорой на данные натурных измерений). Процессы растекания ледника, образование подледниковых водоёмов, их прорывы, формирование течений в крупных озёрах, в частности, в озере Восток, столь сложны, что описываются на основе фундаментальных законов и уравнений матфизики. В качестве примера можно привести несколько основных работ по этой тематике [5, 12, 13, 16, 19]. Предлагаемые в них модели тепломассопереноса позволяют не только получать такие важные параметры, как скорости течения ледника и распределения температуры в нём, а также характеризовать движение воды в водоёмах. Однако самое важное достоинство моделей заключается в том, что они позволяют осуществлять обоснованный прогноз дальнейшего развития этих объектов на будущее.

Эти и аналогичные модели, помимо научных задач, способны решать и задачи сугубо практические, в частности, связанные с насущными проблемами обеспечения безопасности транспортных операций. Таковыми, например, являются выявление районов, где происходит формирование зон трещин, что представляет особую важность для строительства посадочных площадок и трасс следования санно-гусеничных походов. Таким образом, математическое моделирование в гляциологии способно решать важные научные и народнохозяйственные задачи, экономя при этом значительные ресурсы.

В силу своей сложности модели нуждаются в верификации. Кроме того, для лучшего понимания моделируемого процесса весьма желательно иметь представление о том, как он, либо аналогичный ему, протекает в природе. Хорошим решением при этом является физическое моделирование, но оно, к сожалению, не может решить всех вопросов. К тому же его проведение чрезвычайно затратное.

Однако периодически происходят прорывы приледниковых и внутрiledниковых водоёмов, расположенных в краевой части антарктического ледника. Это позволяет воочию наблюдать процессы,

аналогичные тем, которые происходят под многокилометровым ледником, что, естественно, оказывает неоценимую помощь при создании математических моделей. К сожалению, подчас прорывы водоёмов наносят значительный ущерб инфраструктуре станций и полевых баз. Из недавних подобных событий следует отметить прорыв внутриледникового водоёма на леднике Долк в восточной части холмов Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида), а также прорыв приледниковых озёр Разливное и Глубокое в районе полевой базы Молодёжная (Земля Эндерби, Восточная Антарктида) [3, 11]. В первом случае образовался провал колоссальных размеров, который разрушил основную трассу, соединяющую станцию Прогресс с аэродромом и пунктом формирования санно-гусеничных походов на станцию Восток, а во втором – была разрушена часть инфраструктуры полевой базы Молодёжная. В работе [3] приводится обширный обзор прорывов озёр антарктических оазисов.

В настоящее время научный коллектив Института наук о Земле СПбГУ успешно работает над созданием математических моделей процессов тепломассопереноса в леднике, а также формирования и развития подледниковых водоёмов. Они являются частями большой эволюционной модели озера Восток, которая будет включать в себя также и формирование течений. Помимо этого, коллектив активно работает над решением задач Российской антарктической экспедиции по обеспечению безопасности транспортных операций [10].

Фундаментальные научные исследования являются локомотивом прогресса, расширяя и углубляя наши представления об окружающем нас мире и законах его развития. И математическое моделирование занимает достойное место среди методов познания природы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-27-00266.

Список использованной литературы

1. Атлас Антарктики. Т. 1. – М.–Л.: Изд. ГУГК МГ СССР, 1966. – 225 с.
2. Атлас Антарктики. Т. II. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 598 с.
3. Боронина А.С. Крупные прорывы озёр антарктических оазисов: обобщение современных знаний // Лёд и Снег. – 2022. – Т. 62. – № 1. – С. 141–160. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010122>
4. Зотиков И.А. Донное таяние в центральной зоне ледяного щита Антарктиды и его влияние на современный баланс льда // Материалы гляциол. исслед. – 1964. – № 10. – С. 150–156.
5. Казко Г.В., Саватюгин Л.М., Сократова И.Н. Моделирование циркуляции воды в антарктическом подледниковом озере Восток // Лед и Снег. – 2012. – № 4. – С. 86–91.
6. Лукин В.В. Путь к изучению вод озера Восток открыт // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2012. – Т. 91. – № 1. – С. 5–19.
7. Масолов В.Н., Попов С.В., Лукин В.В., Попков А.М. Рельеф дна и водное тело подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 433. – № 5. – С. 693–698.
8. Попов С.В. Шесть десятилетий радиолокационных и сейсмических исследований в Антарктиде // Лёд и Снег. – 2021. – Т. 61. – №4. – С. 587–619. doi: 10.31857/S2076673421040110.
9. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лёд и Снег. – 2012. – Т. 52. – №4. – С. 31–38. doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-31-38.
10. Попов С.В., Пряхина Г.В. Прикладные и фундаментальные научные аспекты субгляциальных гидрологических исследований в современных условиях // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению : сб. докл. Междунар. науч. конф. – 2020. – С. 1112–1117.
11. 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. – V. 67. – No 266. – P. 1121–1136. doi: 10.1017/jog.2021.58.
12. Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods // Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. – 2009. – V. 465. – No 2106. – P. 1809–1828.
13. Fürst J.J., Rybak O., Goelzer H., De Smedt B., de Groen P., Huybrechts P. Improved convergence and stability properties in a three-dimensional higher-order ice sheet model // Geosci. Model Dev. – 2011. – V. 4. – No. 4. – P. 1133–1149.
14. Livingstone S.J., Li Y., Rutishauser A., Sanderson R.J. [et al.]. Subglacial lakes and their changing role in a warming climate // Nat. Rev. Earth Environ. – 2022. – V. 3. – P. 106–124.

15. Oswald G. K. A., Robin G. Lakes beneath the Antarctic ice sheet // *Nature*. – 1973. – T. 245. – No 5423. – P. 251–254.
16. Pattyn F. Investigating the stability of subglacial lakes with a full Stokes ice-sheet model // *J. Glaciol.* – 2008. – V. 54. – No 185. – P. 353–361.
17. Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // *J. Glaciol.* – 1993. – V. 39. – No 133. – P. 625–634.
18. Siegert M.J. A 60-year international history of Antarctic subglacial lake exploration // *Geol. Society London. Spec. Publ.* – 2018. – V. 461. – No 1. – P. 7–21.
19. Thoma M., Grosfeld K., Mayer C. Modelling mixing and circulation in subglacial Lake Vostok, Antarctica // *Ocean Dynamics*. – 2007. – V. 57. – No 6. – P. 531–540.
20. Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // *Nature*. – 2006. – V. 440. – No 7087. – P. 1033–1036. doi:10.1038/nature04660.