

Математическое моделирование развития активного внутриледникового озера Долк (Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида)

А.С. Боронина ^{1,2}, С.В. Попов ^{3,2}, А.А. Суханова ⁴, Д.В. Банцев ²

¹Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

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

³АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербург, Россия

⁴ООО «Первая Геотехническая Компания», Санкт-Петербург, Россия

Российские антарктические станции и полевые базы являются ключевыми объектами инфраструктуры, на которых проводятся круглогодичные или сезонные научные исследования. Характерные для них интенсивные логистические операции требуют особого внимания к вопросам изучения опасных гидрологических и гляциологических процессов. Внутриледниковые водоёмы, изменение состояния которых непредсказуемо и зачастую сопровождается катастрофическими последствиями в виде прорывных водных потоков и просадок поверхности ледника, являются одними из наиболее интересных и актуальных объектов для исследования. В оазисе Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) таковым является недавно обнаруженное внутриледниковое озеро Долк. Оно расположено в теле одноимённого выводного ледника рядом с российской полевой базой Прогресс-1. О существовании озера Долк стало известно 30-го января 2017 г., когда на его месте образовалась обширная депрессия. Её формированию предшествовал прорыв ледниковых озёр Болдер и Ледяное, вода из которых привела к переполнению внутриледникового водоёма и его последующему опустошению. Спустя три года озеро Долк полностью восстановилось в результате повторного прорыва озёр Болдер и Ледяное. К 1-ому февраля 2020 г. образовавшийся водоём покрылся тонким слоем льда, а начиная с 2021 г. вновь перестал прослеживаться с поверхности. Несмотря на то, что озеро Долк визуально находится в стабильном состоянии, исключать повторных прорывов и просадок поверхности ледника нельзя. Настоящее исследование посвящено изучению современного состояния внутриледникового озера Долк и моделированию возможных сценариев его дальнейшего развития. Основой являются данные полевых работ, выполненных после восстановления водоёма в январе 2021 г. и 2023 г., а также математическое моделирование. Комплекс полевых исследований включал в себя георадарное профилирование, геодезическую съёмку, керновое и шнековое бурение, термометрические измерения и отбор проб льда на изотопный анализ. В результате получены данные о строении этого участка ледника Долк, рельеф поверхности, современные границы водоёма, толщины снежно-фирнового слоя, льда и воды, вертикальное распределение температуры в каждой из сред. Эти использовались и при моделировании. В основе математической модели лежит решение одномерной многофазной задачи Стефана. Сценарные расчёты вероятного развития озера Долк на ближайшие пять лет отличались друг от друга особенностью аккумуляции и уплотнения снега на его ледовой поверхности. Первый сценарий предполагал неизменность толщины снежно-фирнового слоя и его плотности за расчётные года. Второй - равномерное увеличение толщины снежно-фирнового слоя при его определённой плотности. А третий сценарий предполагал равномерное увеличение мощности снежно-фирнового слоя, но его плотность в течение года изменялась от значений, соответствовавших свежевыпавшему снегу, до значения, измеренного по керну. Согласно выпаленным расчётам, при любом из трёх сценариев озеро Долк постепенно промерзает. Его повторные прорывы возможны либо при увеличении притока водных масс из соседних водоёмов, или при изменении динамики ледника. При условии сохранения существующей тенденции можно ожидать, что озеро Долк полностью промёрзнет примерно через 40 – 45 лет. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-27-00266.