

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.324,556.5

ПРОРЫВ ЛЕДНИКОВО-ПОДПРУДНОГО ОЗЕРА СПАРТАКОВСКОЕ И ИЗМЕНЕНИЯ ВЫВОДНОГО ЛЕДНИКА КУПОЛА СЕМЁНОВА–ТЯН-ШАНСКОГО В 2021 г. (СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ)

© 2023 г. А. Я. Муравьев^{1,*}, Р. А. Чернов¹

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: anton-yar@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.

После доработки 12.09.2022 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Во второй половине августа 2021 г. на острове Большевик (Северная Земля) произошел прорыв ледниково-подпрудного озера Спартаковское. Объём спущенной из озера во фьорд Спартак воды составил около 376 ± 21 млн м³. Озёрная котловина наполнялась водой в 2016–2021 гг. существенно быстрее, чем в 2006–2016 гг. за счёт усиления поверхностной абляции на ледниках водосборного бассейна в условиях аномально теплого лета в 2018–2021 гг. Система “ледяная плотина–озеро” пришла к новому состоянию – сток в долину реки Базовая происходить более не может.

Ключевые слова: ледниково-подпрудное озеро, выводной ледник, таяние, прорыв озера, максимальный уровень, Северная Земля

DOI: 10.31857/S2076673423010118, **EDN:** MAINVD

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в высокогорных районах умеренных широт и в Арктике отмечается возникновение новых ледниковых озёр, связанное с отступанием ледников (Harrison et al., 2018; Nie et al., 2018; Чернов, Ромашова, 2022). Современные исследования указывают на значительное влияние ледниковых озёр на внутреннее гидродинамическое состояние полярных ледников (Глазовский, Мачерет, 2014; Fan et al., 2022). Размеры озёр позволяют эффективно применять дистанционные методы для их обнаружения и исследования пространственных характеристик (Strozzi et al., 2012; Чернов, Муравьев, 2020). В Арктике распространены озера с нестабильным режимом стока (прорывные озёра), в результате их взаимодействия с ледниками.

Исследование прорывов ледниково-подпрудных озёр наиболее актуально для горных территорий, где ведётся хозяйственная деятельность. Эти опасные явления создают риски для населения и инфраструктуры, расположенных ниже по течению (Harrison et al., 2018). Хотя катастрофические прорывы озёр в Арктике масштабнее, чем в горных регионах, степень их опасности часто оказывается незначительной из-за отсутствия постоянного населения и инфраструктуры. Исследования этих объектов весьма важны для понимания климатических изменений.

Ледниково-подпрудные озёра многочисленны в Исландии и Гренландии, часто встречаются на Шпицбергене, Новой Земле, Земле Франца-Иосифа, Канадском Арктическом архипелаге. На архипелаге Северная Земля известны два крупных ледниково-подпрудных озера – Фигурное и Спартаковское (Большиянов, Макеев, 1995). С 2014 г. на о. Большевик возобновились гляциологические исследования ледниковых куполов Мушкетова и Семёнова–Тян-Шанского, гидрологические исследования стока крупных рек острова (Большиянов и др., 2016). Получены сведения о снегозапасах в этом районе и режиме озера Спартаковское (Василевич, Чернов, 2018; Чернов, Муравьев, 2020).

Озеро Спартаковское расположено в северо-западной части острова Большевик (рис. 1) – второго по площади острова архипелага Северная Земля. Это одно из крупнейших ледниково-подпрудных озёр восточного сектора Арктики. Ледяная плотина шириной около 3 км, подпруживающая озеро, образована перегораживающим фьорд Спартак выводным ледником купола Семёнова–Тян-Шанского. Западная часть выводного ледника находится на плаву.

Климат Северной Земли холодный, с продолжительной морозной зимой и коротким холодным летом. Средняя годовая температура воздуха находится в диапазоне от -14 до -13°C (Каталог..., 1980). Летний период на о. Большевик

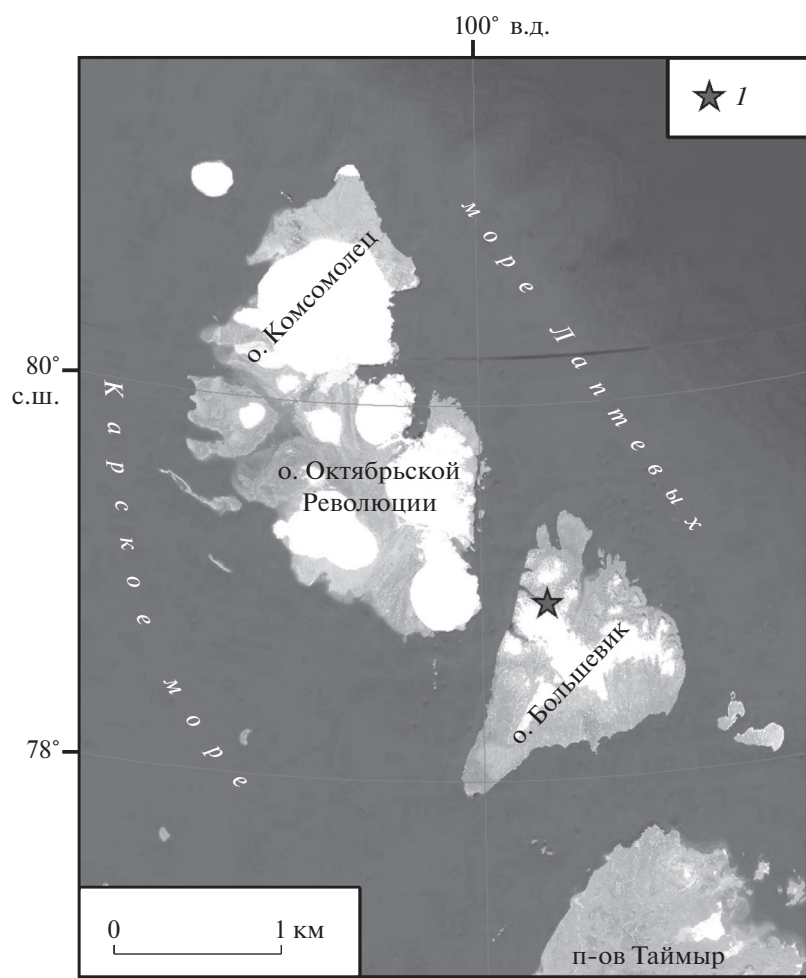


Рис. 1. Район исследований *I* — местоположение озера Спартаковское на о. Большевик.

Fig. 1. Study area *I* — location of Spartakovskoe Lake on Bolshevik Island.

не продолжителен. Положительные температуры воздуха наблюдаются со второй половины июня по конец августа, однако температура воздуха над ур. моря летом нередко опускается ниже 0°C (Брызгин, Юнак, 1988).

Годовое количество осадков в прибрежной зоне составляет 240–260 мм, из которых летом (с июня по август) выпадает около 80 мм (Большянов, Макеев, 1995). На ледниках в среднем выпадает около 400 мм осадков, из которых 100–120 мм приходится на лето. В течение большей части года атмосферные осадки выпадают в твёрдом виде (до 70% общего количества и более). На высотах более 100 м над ур. моря летом выпадают осадки смешанного типа, и их количество увеличивается с высотой (Брызгин, Юнак, 1988). Толщина снежного покрова в максимум снегонакопления на пологих участках тундры составляет 20–50 см. В частности, весной 2017 г. на платообразных участках северной части о. Большевик (бассейны рек Амба и Мушкетова) средняя измеренная тол-

щина снежного покрова составила 37 см (Василевич, Чернов, 2018).

Площадь водосборного бассейна озера Спартаковское составляет около 167 км^2 , из которых $76.6 \pm 1.4\text{ км}^2$ в 2016 г. было занято ледниками (Чернов, Муравьев, 2020). Сток в озеро происходит в летнее время, в основном, за счёт таяния сезонного снежного покрова и поверхностной абляции на ледниках и многолетних снежниках, сосредоточенных в южной части его водосборного бассейна. В северной части водосборного бассейна ледников и крупных многолетних снежников нет.

По данным Каталога ледников СССР (Каталог..., 1980) и карты № 48А в Атласе снежно-ледовых ресурсов мира (Атлас..., 1997) в областях питания ледников Северной Земли распространены ледяная и фирново-ледяная зоны льдообразования. На ледниках острова Большевик фирново-ледяная зона, по данным этих работ, отсутствует. Однако в ходе полевых наблюдений 2015 г. на се-

верном склоне ледника Семёнова–Тян-Шанского фирново-ледяная зона льдообразования была отмечена (Большаинов и др., 2016).

Озеро, подпруженное ледником, наполняется в летний период за счёт таяния и жидких осадков. Максимальный уровень воды определяется двумя факторами: 1 – низшая точка водораздела с бассейном р. Базовая на северо-востоке водосборного бассейна – 122.9 м; 2 – высота ледяной плотины на юго-западе (переменная величина). Перелив воды в водосборный бассейн р. Базовая, текущей в море Лаптевых, наблюдался в августе 2016 г. (на спутниковом снимке Sentinel-2 от 01.08.2016). Прорыв озера через ледяную плотину происходит во фьорд Спартак (Карское море). В прошлом прорывы озера Спартаковское были зафиксированы летом 2006 г. и во второй половине августа 2016 г. (Чернов, Муравьев, 2020).

Пока озёрная котловина наполняется водой, стока из озера нет. Следов перелива воды через ледяную плотину в 2016 г. обнаружено не было. Постоянных внутри- или подледниковых каналов стока в ледяной плотине, образованной выводным ледником купола Семёнова–Тян-Шанского, нет. Если бы такие каналы существовали, озеро не наполнялось бы выше определенного уровня и не прорывалось бы вовсе. Кроме того, так как ледники Северной Земли относятся к холодным и характеризуются малой мощностью фирновой толщи (из-за распространения ледяной и фирново-ледяной зон льдообразования), температура льда в них на глубине затухания сезонных колебаний должна быть близка к средней годовой температуре воздуха (Каталог..., 1980; Говоруха, 1989). В работе (Барбаш и др., 1981) по результатам полевых измерений 1974–1976 гг. отмечено, что в подошве активного слоя (на глубине 18 м) на куполе Вавилова температура составляет –11.8°C.

В результате анализа современных спутниковых снимков был обнаружен очередной прорыв озера Спартаковское, произошедший в августе 2021 г. Как и в августе 2016 г. озёрная котловина была полностью осушена. Однако это масштабное событие произошло существенно раньше, чем предполагалось (Чернов, Муравьев, 2020).

Цель исследования – определение количественных характеристик произошедшего события и его причины. Для этого были сформулированы ряд задач: определить высоту уреза воды в озере перед прорывом 2021 г.; определить объём воды, спущенной из озера во время прорыва в августе 2021 г.; исследовать изменения высоты ледяной плотины, подпруживающей озеро; определить причины быстрого наполнения водой озёрной котловины в период между прорывами 2016 и 2021 гг.; дополнить результаты исследования предыдущего прорыва озера, представленные в

работе (Чернов, Муравьев, 2020); определить области ледяной плотины, под которой происходил прорыв озера в 2016 г.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В исследовании использованы следующие данные: спутниковые снимки Sentinel-2 уровня обработки L1C (табл. 1) с пространственным разрешением 10 м и точностью пространственной привязки 11 м с уровнем доверия 95.5% (SENTINEL..., 2022); мозаика цифровой модели рельефа (далее – ЦМР) ArcticDEM v3.0 с пространственным разрешением 2 м (Porter et al., 2018); отдельные ЦМР (фрагменты “strip”) из коллекции ArcticDEM v3.0 (Porter et al., 2018); материалы работы (Чернов, Муравьев, 2020); данные лазерной альтиметрии ICESat-2 и ICESat, полученные с ресурса (<https://openaltimetry.org/>); данные реанализа метеопараметров ECMWF ERA5 с разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (<https://www.ecmwf.int>), полученные с ресурса (Monthly..., 2022); данные наблюдений на научно-исследовательском стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” (Электронный архив..., 2022).

Все спутниковые снимки, ЦМР и данные лазерной альтиметрии зарегистрированы в проекции UTM (зона 47) на эллипсоиде WGS 1984. Обработка этих данных производилась в программных продуктах ESRI ArcGIS и QGIS.

Дешифрирование границ ледников и многолетних снежников, а также береговой линии озера Спартаковское на разновременных спутниковых снимках выполнено вручную. Снимки для этих целей подбирались на вторую половину августа и начало сентября (конец периода абляции) для минимизации влияния остатков сезонного снежного покрова и снежников-перелетков на результаты дешифрирования. Погрешность определения площади ледников в результате дешифрирования спутниковых снимков Sentinel-2 оценена как произведение протяженности границ ледников на точность пространственной привязки данных снимков (11 м с уровнем доверия 95.5% по данным (SENTINEL..., 2022)).

ЦМР ArcticDEM v3.0 (Porter et al., 2018) применялась для определения объёма озёрной котловины, уровня поверхности выводного ледника купола Семёнова–Тян-Шанского, подпруживающего озеро, границ водосборного бассейна и площади его высотных зон. В работе задействована мозаика с пространственным разрешением 2 м и отдельные ЦМР, созданные в результате обработки стереопар спутниковых снимков WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3 2012–2017 гг. Точность пространственной привязки (в плане) таких снимков без наземных контрольных точек

Таблица 1. Используемые в работе спутниковые снимки и цифровые модели рельефа

Спутник	Дата съёмки	Идентификатор снимка (ID)
<i>Спутниковые снимки</i>		
Sentinel-2	01.08.2016	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_SGS__20160801T063620_20160801T101328_A005794_T48XVN_N02_04_01
	26.08.2018	L1C_T47XNH_A016591_20180826T071615
	02.09.2020	L1C_T48XVN_A018236_20200902T072618
	03.08.2021	L1C_T47XNH_A031935_20210803T072618
	06.08.2021	L1C_T48XVN_A023069_20210806T064625
	13.08.2021	L1C_T47XNH_A032078_20210813T072618
	24.08.2021	L1C_T47XNH_A023327_20210824T074610
	27.08.2021	L1C_T48XVN_A032278_20210827T070623
	31.08.2021	L1C_T47XNH_A032335_20210831T064625
	15.09.2021	L1C_T47XNH_A023641_20210915T064620
<i>Цифровые модели рельефа</i>		
Мозаика ArcticDEM v3.0	—	51_47_2_1_2m_v3.0
Отдельные ЦМР “strip” из коллекции ArcticDEM v3.0	07.04.2016	SETSM_WV02_20160407_1030010053D85300_103001005490F800_seg1_2m_v3.0
	15.04.2016	SETSM_WV03_20160415_104001001C85F900_104001001B5E6900_seg1_2m_v3.0
	11.04.2017	SETSM_WV01_20170411_102001005D123400_10200100615ACD00_seg1_2m_v3.0
	17.07.2017	SETSM_WV02_20170717_103001006E192100_103001006CAC1900_seg1_2m_v3.0
	08.08.2017	SETSM_WV01_20170808_1020010064119500_10200100653A5000_seg1_2m_v3.0

по данным оператора спутников находится в пределах 4, 3.5 и 3.5 м, соответственно.

Все отдельные ЦМР ArcticDEM v3.0 (фрагменты “strip”) перед применением были скорректированы по высоте. Коррекция данных ЦМР по высоте выполнена относительно мозаики ArcticDEM v3.0 с пространственным разрешением 2 м, созданной из скорректированных данных съёмки ICESat и корегистрованных результатов обработки спутниковых снимков WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3 2012–2017 гг. Для этого создана регулярная сетка точек с шагом 100 м, из которой исключены все точки, расположенные на нестабильных поверхностях. К нестабильным отнесены поверхности ледников и снежников (определены на снимках Sentinel-2, сделанных в конце периода абляции 2016 и 2018 гг.), водные поверхности и эрозионные врезы, в которых зимой в результате метелевого перераспределения скапливается большое количество снега (Чернов, Муравьев, 2020). Фактор накопления снега в эрозионных врезках необходимо учитывать, так как отдельные ЦМР ArcticDEM v3.0 созданы из спутниковых снимков, сделанных в разные сезоны, а

мозаика ArcticDEM v3.0 может содержать информацию о высотах поверхности накопленного в эрозионных врезках снега, а не информацию о высотах их дна (разница достигает нескольких метров).

Далее регулярной сетке точек, расположенных на стабильных поверхностях, присваивались высоты мозаики ArcticDEM v3.0 и всех отдельных ЦМР ArcticDEM v3.0, использованных в работе. После этого высотные данные отдельных ЦМР (фрагменты “strip”) систематически корректировались на величину медианного отклонения их высоты от высоты поверхности мозаики ArcticDEM v3.0. Например, поверхность фрагмента ЦМР от 11.04.2017 была систематически повышена на 1.62 м — величину медианного отклонения по 2322 точкам от поверхности мозаики. Поверхность фрагмента “strip” ЦМР от 08.08.2017 систематически повышена на 3.33 м — величину медианного отклонения по 870 точкам от поверхности мозаики” (Чернов, Муравьев, 2020).

В документации к ArcticDEM v3.0, приведенной на сайте её разработчиков (<https://www.pgc.umn.edu/>), отмечено, что точность этой ЦМР в плане и по высоте без назем-

ных контрольных точек находится в пределах 4 м. Анализ отклонений высоты поверхности скорректированных фрагментов ЦМР (“strip”) от высоты поверхности мозаики ArcticDEM v3.0, выполненный в работе (Чернов, Муравьев, 2020), позволил выявить доверительный интервал ± 3 м для описанного выше метода корегистрации ЦМР. В этот доверительный интервал попали отклонения значений высоты 92.6% из 2322 точек фрагмента ЦМР от 11.04.2017 и 97.2% из 870 точек фрагмента ЦМР 08.08.2017 от значений высоты мозаики ArcticDEM v3.0, расположенных на стабильных поверхностях. Данная величина (± 3 м) принята за вертикальную погрешность при определении объема воды в озере в зоне покрытия дна озёрной котловины ЦМР из коллекции ArcticDEM v3.0.

Для дополнительной проверки качества корегистрации отдельных ЦМР (фрагменты “strip”) ArcticDEM v3.0, покрывающих участок выводного ледника с купола Семёнова—Тян-Шанского, подобраны две ЦМР, созданные на основе съёмок 07.04.2016 и 15.04.2016 (см. табл. 1). Учитывая малый временной интервал между этими съёмками (8 дней) и небольшой наклон поверхности выводного ледника во фьорде, можно предположить, что разница высоты между поверхностями этих ЦМР должна быть очень мала. После коррекции высоты этих ЦМР по регулярной сетке точек, расположенных на стабильных поверхностях, сформировано покрытие разницы высот между поверхностями 7 и 15 апреля 2016 г. Статистический анализ этого покрытия показал, что на участке выводного ледника площадью около 3.5 км² средняя разница высоты поверхности этих ЦМР составила – 0.07 м, а её среднеквадратичное отклонение по всем ячейкам ЦМР (примерно 873 тыс.) – 0.42 м.

Разновременные данные лазерной альтиметрии ICESat-2 и ICESat, полученные с ресурса (<https://openaltimetry.org/>), применялись для определения высоты уреза воды в озере и высоты поверхности отдельных участков ледника. В случае ICESat-2 использовался набор данных “ATL06: ATLAS/ICESat-2 L3A Land Ice Height” (Smith et al., 2021). Теоретически более подходящий для теплого сезона, когда озеро не покрыто льдом, набор “ATL13: ATLAS/ICESat-2 L3A Inland Water Surface Height” на район исследований отсутствует. Для определения высоты уреза воды в озере Спартаковское на определенную дату бралось минимальное значение высоты среди точек пересекающего озеро трека ICESat-2 или ICESat, находящегося в пределах поверхности озера. Это позволило минимизировать влияние на результаты измерений многочисленных льдин, плавающих в озере в тёплый период.

В отдельных случаях для компенсации недостаточной частоты съёмки ICESat-2 в 2021 г. при определении высоты уреза воды в озере применялась скорректированная по высоте отдельная ЦМР ArcticDEM v3.0 от 11.04.2017, созданная по данным спутниковых съёмок, произведенных вскоре после прорыва озера 2016 г., и отражающая рельеф большей части (за исключением западной оконечности) дна озёрной котловины. Для минимизации влияния сезонного снежного покрова на результаты измерений, значения высот фиксировались в центре относительно широких (140–150 м и более) и пологих частей озёрной котловины на северо-востоке. Следует отметить, что погрешность определения высоты уреза воды озера по ArcticDEM v3.0 ограничивается не только погрешностями самой ЦМР, но и существенно меньшим, по сравнению с ней, пространственным разрешением спутниковых снимков Sentinel-2 (10 м), непосредственно влияющим на точность определения пространственного положения береговой линии.

Объём воды в озере на конкретную дату определяли как объём пространства, заключенный между высотой уреза воды и расположенной ниже поверхностью ЦМР, построенной в работе (Чернов, Муравьев, 2020), с поправкой на разницу уровня воды 10.09 м между фрагментом ЦМР 08.08.2017, покрывающей участок на западе озёрной котловины, и ЦМР 11.04.2017. Построенная в рамках этой работы ЦМР озёрной котловины и данные ICESat-2 позволили рассчитать объём воды в озере на даты съёмки ICESat-2 с существенным ограничением – ЦМР на западе ограничено положением ледяной плотины 01.08.2016. Однако граница подпруживающего озеро выводного ледника между прорывами 2016 и 2021 гг. постепенно отступала. ЦМР поверхности, освободившейся от ледника в эти годы, отсутствует.

С 01.08.2016 по 06.08.2021 граница подпруживающей озеро ледяной плотины в центральной части отступила на 350–380 м (рис. 2), а площадь поверхности, освобожденной от ледника и многолетних снежников (вдоль юго-западного побережья) и занятой озером, составила 0.49 ± 0.08 км². Это около 7.4% площади озера 01.08.2016 и 8.1% его площади 03.08.2021. Подчеркнем, что данный участок расположен в западной, наиболее глубокой, части озёрной котловины, поэтому его доля в объёме воды в озере должна существенно превышать долю в площади.

Основная часть котловины озера Спартаковское расположена в троговой долине, характеризующейся крутыми (местами более 45°) бортами и широким пологим дном. Это видно на спутниковых снимках Sentinel-2 от 27.08.2016 и 31.08.2021, а также отдельных фрагментах ЦМР ArcticDEM v3.0 от 11.04.2017 и 17.07.2017, отражающих состо-

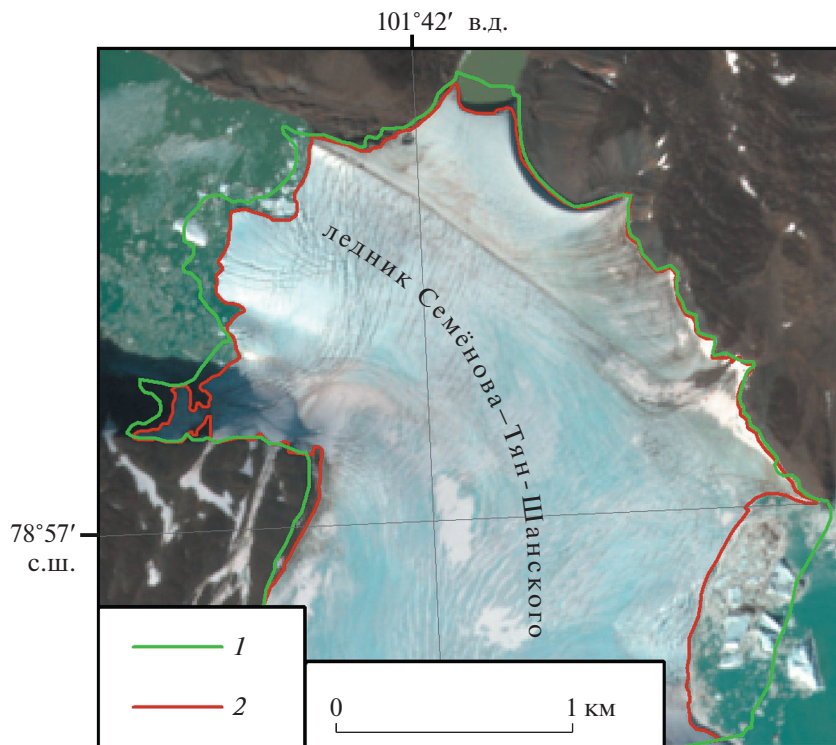


Рис. 2. Границы выводного ледника купола Семёнова—Тян-Шанского в августе 2016 г. (1) и августе 2021 г. (2). В подложке — спутниковый снимок Sentinel-2 от 03.08.2021.

Fig. 2. The boundaries of the Semenov-Tyan-Shansky Glacier in August 2016 (1) and August 2021 (2). On the background — satellite image Sentinel-2 03.08.2021.

яние осушенной озёрной котловины. Визуальный анализ снимка Sentinel-2 от 31.08.2021 (рис. 3, б) позволил сделать вывод о том, что дно озёрной котловины на участке, освободившемся от ледника между 01.08.2016 и 06.08.2021, расположено примерно на том же гипсометрическом уровне, что и на участке, примыкающем с востока к границе ледяной плотины 01.08.2016. Об этом свидетельствует обширная плоская поверхность, свободная от крупных обломков льда, расположенная на обоих участках и пересекающая границу ледяной плотины 01.08.2016 в северной части озёрной котловины. Это позволяет сделать допущение, что рельеф и глубина озёрной котловины на участке, освободившемся от ледника между 01.08.2016 и 06.08.2021, примерно соответствуют рельефу и глубине озёрной котловины на участке к востоку от границы ледяной плотины 01.08.2016, охватываемом современными ЦМР. Из этого следует, что средние значения абсолютной высоты поверхности этих участков должны быть близки друг к другу.

В западной части озёрной котловины в границах береговой линии 01.08.2016 был выделен участок шириной около 500 м и площадью 0.64 км². Этот участок полностью покрыт отдельным фрагментом ЦМР ArcticDEM v3.0, отражающим состояние поверхности 17.07.2017. Далее по скор-

ректированной по высоте ЦМР от 17.07.2017 в границах этого участка (около 159 тыс. ячеек) была рассчитана высотная статистика: средняя высота поверхности — 34.2 м, минимальная — 20.9 м, максимальная — 122.9 м, среднеквадратичное отклонение — 17.8 м. Объём воды на участке, освободившемся от ледника между 01.08.2016 и 06.08.2021, вычислялся как объём, заключенный между высотой уреза воды по данным съёмки ICESat-2 и средней высотой поверхности (34.2 м). Погрешность определения объёма воды для этого участка была принята равной произведению его площади на половину среднеквадратичного отклонения (8.9 м) значений высоты ячеек ЦМР от среднего значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Очередной прорыв ледниково-подпрудного озера Спартаковское произошел во второй половине августа 2021 г. Дата начала прорыва озера неизвестна, однако временные рамки этого события удалось сузить, используя находящиеся в открытом доступе данные спутниковой съёмки.

Определение высоты уреза воды в озере перед прорывом 2021 г. и его изменений в 2016–2021 гг. Пространственное положение береговой линии озера до прорыва на всем её протяжении оценено



Рис. 3. Озеро Спартаковское на о. Большевик (Северная Земля): *а* – 03.08.2021 (до спуска воды), *б* – 31.08.2021 (после спуска воды). 1 – береговая линия озера 03.08.2021, 2 – низшая точка водораздела с бассейном р. Базовая, 3 – ледораздел, 4 – трек ICESat-2 с данными съёмки 16.09.2021.

Fig. 3. Spartakovskoye Lake on Bolshevik Island (Severnaya Zemlya): *a* – 03.08.2021 (before the drainage of water), *б* – 31.08.2021 (after the drainage of water). 1 – the shoreline of the lake 03.08.2021, 2 – the lowest point of the watershed with the Bazovaya River basin, 3 – iceshed, 4 – ICESat-2 track with survey data 16.09.2021.

по спутниковому снимку Sentinel-2 от 03.08.2021 (см. рис. 3, *а*). Для дешифрирования границы озера и подпруживающего его выводного ледника купола Семёнова–Тян-Шанского применен снимок Sentinel-2 от 06.08.2021, на котором у этой границы отсутствуют плавающие льдины, препятствующие дешифрированию. Площадь озера 03.08.2021 составляла 6.03 ± 0.34 км². Высота уреза воды, определенная по скорректированному по высоте фрагменту “strip” ArcticDEM v3.0 от 11.04.2017 у северо-восточной оконечности озера, составила около 105.5 м над ур. моря.

Анализ спутникового снимка Sentinel-2 от 13.08.2021 показал, что озеро после 03.08.2021

продолжало наполняться. На спутниковом снимке Sentinel-2 от 24.08.2021 видно, что береговая линия озера немного (до 20–30 м в относительно пологих местах) отступила, по сравнению со своим положением 13.08.2021. Это означает, что 24.08.2021 из озера уже происходил спуск воды. Промежуточный результат этого процесса виден на снимке Sentinel-2 от 27.08.2021.

К 31.08.2021, судя по спутниковому снимку Sentinel-2 на эту дату (см. табл. 1), прорыв озера завершился (см. рис. 3, *б*). На снимке Sentinel-2 от 31.08.2021 видна осушенная озёрная котловина, западная часть которой завалена обломками льда, оставшимися после завершения прорыва озера.

Таблица 2. Высота уреза воды озера Спартаковское по данным съёмок ICESat-2 и ICESat, и измерений по ЦМР

Источник данных	Дата	Идентификатор трека ICESat-2 или ICESat	Высота уреза воды или поверхности ледяного покрова, м над ур. моря	Объём воды в озере, млн м ³	Максимальная глубина озера*, м
ICESat	14.03.2006	228	112.2	—	103.7
	14.11.2006	228	16.8**	—	8.3
ЦМР	01.08.2016	—	122.9	404.3 ± 21.9***	114.4
ICESat-2	31.10.2018	499	60.3	—	51.8
	30.04.2019	499	59.8	119.7 ± 14.6	51.3
	28.01.2020	499	79.9	205.6 ± 16.9	71.4
	28.03.2021	57	99.8	306.7 ± 19.5	91.3
	26.04.2021	499			
ЦМР	03.08.2021	—	105.5	338.9 ± 20.2	97.0
ICESat-2	16.09.2021	1300	8.5*		

*Исходя из допущения о значении абсолютной высоты дна в наиболее глубокой части озера 8.5 м над ур. моря; ** Высота уреза воды, ледяного покрова или дна озёрной котловины; *** Данные работы (Чернов, Муравьев, 2020).

При этом на поверхности выводного ледника, подпруживающего озеро, нет видимых провалов и эрозионных врезов. Это означает, что прорыв озера, как и в августе 2016 г., произошел под ледником. Центральная часть ледяной плотины к 31.08.2021 отступила в плане на 70–80 м относительно своего положения 03.08.2021.

Выполнен анализ данных съёмки ICESat-2 от 16.09.2021 (табл. 2), произведенной в западной (наиболее глубокой) части осушенной озёрной котловины. Минимальная зафиксированная по этому треку высота поверхности озёрной котловины составила 8.5 м над ур. моря. Это ниже, чем минимальная высота (20–21 м), зафиксированная в западной части озёрной котловины на скорректированном фрагменте ЦМР ArcticDEM v3.0 от 11.04.2017 в рамках работы (Чернов, Муравьев, 2020). Очевидно, что после прорыва озера, произошедшего в конце августа 2016 г., до установления устойчивых отрицательных температур воздуха в озёрную котловину с территории водосборного бассейна происходил сток воды.

В результате анализа данных съёмки ICESat обнаружено дополнительное подтверждение сделанного в работе (Чернов, Муравьев, 2020) вывода о том, что предшествующий 2016 г. прорыв озера Спартаковское произошел в конце теплого сезона 2006 г. Высота уреза воды озера 14.03.2006 ещё до начала таяния сезонного снежного покрова и ледяного покрова озера была выше 112 м (см. табл. 2). 14.11.2006, уже после завершения теплого сезона, урез воды располагался на высоте, не превышающей 16.8 м. Значит наполнение озёрной котловины водой после прорыва озера в 2006 г. заняло десять лет — с 2007 по 2016 г. включительно.

Определение объёма воды, спущенной из озера во время прорыва в 2021 г., и скорости наполнения озёрной котловины в 2016–2021 гг. Расчётный объём воды в озере Спартаковское исходя из высоты уреза воды 105.5 м на 03.08.2021 составил 338.9 ± 20.2 млн м³. Он накопился за неполные пять тёплых сезонов. При этом за часть тёплого сезона 2021 г., предшествующую этой дате, сток в озеро составил около 32 млн м³ (см. табл. 2).

Согласно выполненным расчетам, сток в озеро за 2020 г. превысил 101 млн м³. Это максимальное из рассчитанных значений в период между прорывами озера в 2016 и 2021 гг. Оно более чем вдвое превышает расчётную величину стока в озеро в период 2006–2016 гг., составлявшую по данным работы (Чернов, Муравьев, 2020) 37.1–48.2 млн м³ в год (в зависимости от летней температуры воздуха и количества осадков). Сток в озеро за 2019 г. составил около 86 млн м³, что примерно на 13% меньше стока за 2020 г., но существенно больше стока в 2006–2016 гг. За 2017–2018 гг. в озёрной котловине накопилось около 120 млн м³ воды.

Исследование причин быстрого наполнения водой озёрной котловины в период 2016–2021 гг. Аномально большие объёмы стока в озеро с 2019/20 г. вызваны климатическими причинами: прежде всего, аномально высокими летними температурами воздуха (рис. 4, а), что должно существенно усилить поверхностную абляцию на ледниках и многолетних снежниках водосборного бассейна; в небольшой степени повышенным количеством осадков (рис. 4, б). Лето в эти годы было аномально тёплым. По данным реанализа метеопараметров ECMWF ERA5 (Monthly..., 2022), лето 2020 г. в районе исследований было самым тёплым за период 1950–2021 гг. Средняя температура воздуха за июнь–август 2020 г. составила 1.7°C, что на

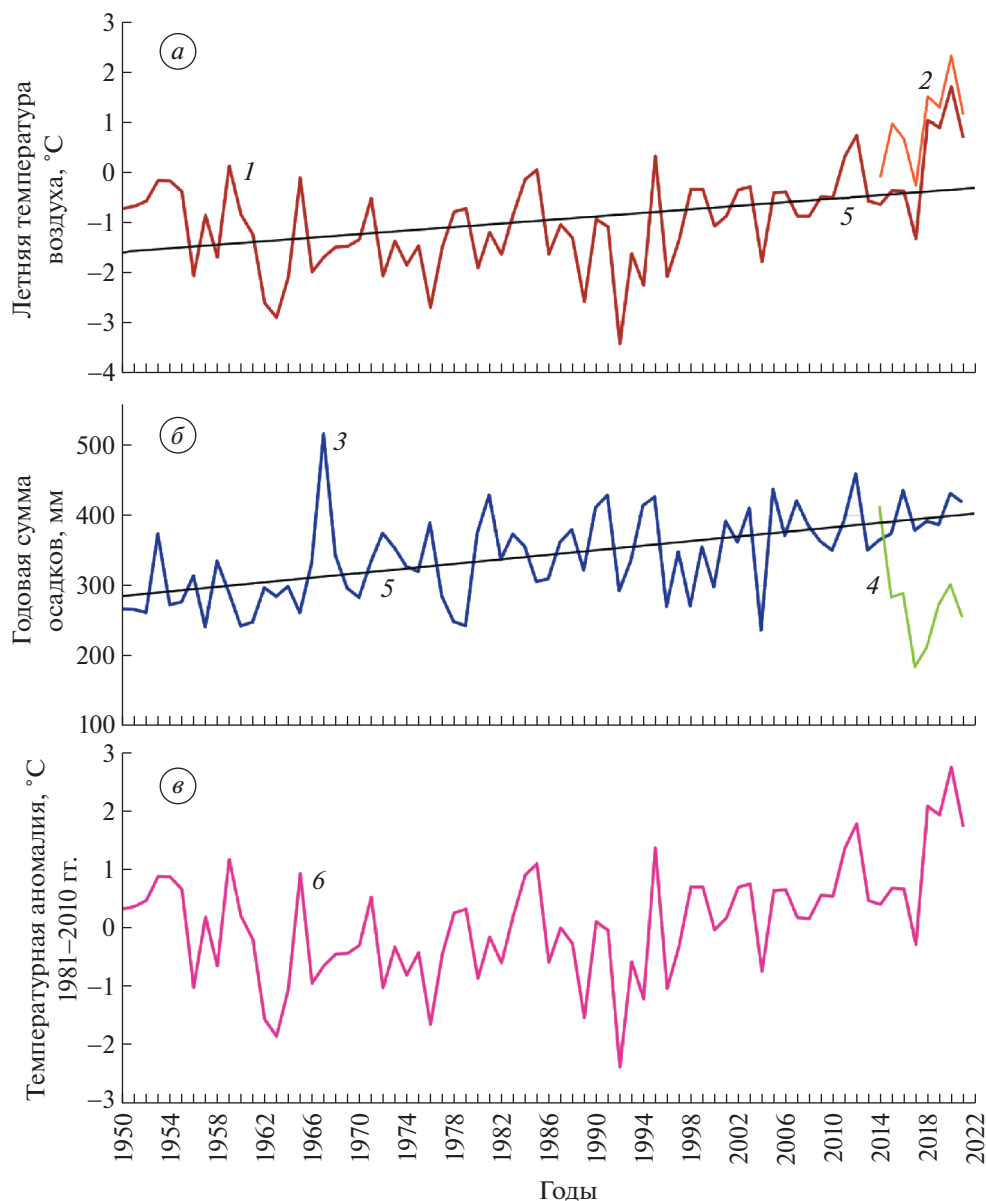


Рис. 4. Изменения: *a* – средних летних температур воздуха (июнь–август) по данным реанализа ECMWF ERA5 (Monthly..., 2022) (1) и данным наблюдений на стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” (Электронный архив...) (2); *б* – годовые суммы осадков по данным реанализа ECMWF ERA5 (Monthly..., 2022) (3) и данным наблюдений на стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” (Электронный архив...) (4); линии трендов (5); *в* – аномалии летних температур воздуха (6) (базовый период 1981–2010 гг.) в районе исследований в 1950–2021 гг. по данным реанализа ECMWF ERA5 (Monthly..., 2022).

Fig. 4. Changes: *a* – of average summer air temperatures (June–August) according to ECMWF ERA5 reanalysis (Monthly..., 2022) (1) and observational data at the station “Ice base “Baranov Cape” (AARI electronic archive...) (2); *б* – annual rainfall according to ECMWF ERA5 reanalysis (Monthly..., 2022) (3) and observational data at the station “Ice base “Baranov Cape” (AARI electronic archive...) (4); trend lines (5); *в* – summer air temperature anomalies (6) (base period 1981–2010) in the study area in 1951–2021 according to ECMWF ERA5 reanalysis (Monthly..., 2022).

2.8°C выше среднего значения за базовый период 1981–2010 гг. (см. рис. 4, *в*). Похожая картина изменений летних температур воздуха в последние годы видна из данных прямых наблюдений на научно-исследовательском стационаре ААНИИ “Ледовая база “Мыс Баранова” (Электронный

архив..., 2022), расположенном на острове Большевик, менее чем в 35 км к северу от озера Спартакoвское (см. рис. 4, *a*).

Суммы годовых осадков (см. рис. 4, *б*) по данным реанализа ECMWF ERA5 (Monthly..., 2022) плохо коррелируют с данными прямых измере-

ний 2014–2021 гг., выполненными на стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” (Электронный архив..., 2022), и их нельзя учитывать для расчета стока в озеро. Но их можно применять для выявления тенденций изменения общего количества осадков в районе исследований.

Годовые суммы осадков по данным реанализа ECMWF ERA5 (см. рис. 4, б) превышали средние значения базового периода 1981–2010 гг. на 7.8% в 2019 г. и на 20.4% в 2020 г. Отмечено, что суммы годовых осадков в периоды между прорывами озера Спартаковское в 2006, 2016 и 2021 гг. почти во все годы (кроме 2010 и 2013 гг.) превышали средние значения базового периода. Разница в среднем количестве осадков в периоды наполнения озера 2007–2016 гг. (389 мм/год) и 2017–2021 гг. (401 мм/год) незначительна. Учитывая сокращение периода (2017–2021 гг.) наполнения озёрной котловины водой вдвое по сравнению с предыдущим (2007–2016 гг.), можно сделать вывод о радикальном изменении структуры стока в озеро. По данным работы (Чернов, Муравьев, 2020) средний вклад поверхностной абляции на ледниках и снежниках водосборного бассейна в сток в озеро составлял 43.6%. 2018–2021 гг. (см. рис. 4, а) — годы с аномально теплым летом, доля поверхностной абляции на ледниках и снежниках должна была существенно вырасти. Иных источников воды, способных обеспечить подобное увеличение объёма стока (с 37–48 до 86–101 млн м³), в районе исследований нет.

С учётом данных по летним температурам воздуха и годовым суммам осадков можно предположить, что сток в озеро Спартаковское в 2018 г. сопоставим со стоком в 2019 г. Из 120 млн м³ воды, поступивших в озеро за 2017–2018 гг., не менее 86 млн м³ (сток за 2019 г.) приходится на теплый сезон 2018 г. Средняя летняя температура воздуха в 2018 г., по данным прямых измерений на стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” (Электронный архив..., 2022) была на 0.2°C выше, чем в 2019 г., и на 1.8°C выше, чем в 2017 г.

Для дополнительной проверки полученных данных определена величина летней абляции на ледниках и многолетних снежниках водосборного бассейна в 2020 г. Она была рассчитана с помощью формулы Ходакова–Кренке $A = (T_l + 9.5)^3$, где T_l — средняя летняя температура воздуха на расчётной высоте (Кренке, Ходаков, 1966), при условии высотного градиента температуры равного -0.7°C на 100 м подъёма. При этом учитывался температурный скачок при переходе на ледниковую поверхность, составляющий 1°C .

Средняя температура воздуха в июне 2020 г. по данным реанализа ERA5 и по данным наблюдений на стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” соответственно составила -0.5 и 0.4°C . Сентябрь 2020 г. существенно теплее — 2.0 и 2.8°C со-

ответственно. Средние летние температуры воздуха 2020 г. рассчитывались за период с июля по сентябрь включительно и составили 3.1°C для стационара “Ледовая база “Мыс Баранова” и 2.5°C по данным реанализа ERA5.

Практически вся площадь ледников и многолетних снежников ($73.5 \pm 1.4 \text{ км}^2$) в водосборном бассейне озера Спартаковское расположена на высотах выше 200 м. Расчётная величина абляции по формуле Ходакова–Кренке в высотном диапазоне 200–600 м составила 770 мм в.э. исходя из средней температуры воздуха в июле–сентябре на стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова” и 630 мм в.э. исходя из данных реанализа ERA5. С учётом того, что сезонный снежный покров в этом районе полностью стаивает, вклад снегозапасов учитывали согласно оценкам в работе (Чернов, Муравьев, 2020). Величина жидких осадков в водосборном бассейне в расчетах принята равной 100 мм в.э. Таяние выше 600 м не учитывалось. Сток талой воды из области абляции ледников принят равным величине летней абляции.

Общий сток в бассейне озера Спартаковское в 2020 году, включая жидкие осадки, составил 75.7 млн м³ при применении данных реанализа ERA5 и 85.5 млн м³ — по данным наблюдений на стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова”. Максимальные оценки стока при увеличении жидких осадков и снегозапасов на 25% (что вполне вероятно при небольших средних величинах) с учетом высоких летних температур дают величину стока в летний период равную 97.8 млн м³ при применении данных наблюдений на стационаре “Ледовая база “Мыс Баранова”. Эта величина близка к величине стока, измеренной по результатам обработки данных ДЗЗ (101 млн м³). Хотя она значительно превышает оценки для периода наполнения озера до прорыва 2016 года (Чернов и Муравьев, 2020), усиление летнего стока в бассейне озера в 2.5–3 раза за счёт повышения летних температур воздуха вполне реально. При этом структура стока изменяется — почти две трети талой воды поступает с ледниковой поверхности, хотя ранее сток с ледников составлял менее половины общего стока.

Аномалия погодных условий лета 2020 г. в Арктике отмечается в современной литературе. В работе (Liang et al., 2020) приведены данные о том, что июльская площадь морских льдов Арктики в 2020 г. была минимальна за период 1979–2020 гг. Авторы связывают это с антициклонической атмосферной циркуляцией — с июля по сентябрь (особенно в июле и августе) 2020 г. в Арктике доминировала аномалия высокого атмосферного давления.

Изменение высоты ледяной плотины, подпругивающей озеро. В ходе анализа полученных результатов возник вопрос — почему прорыв озера

Спартакoвское в августе 2021 г. произошёл задо-го до достижения урезом воды высоты точки пe-релива воды в долину реки Базовая? Для ответа на него необходимо исследовать состояние ледяной плотины, подпруживающей озеро. Отмечено, что для понимания реакции на спуск озера всего вы-водного ледника купола Семёнова–Тян-Шан-ского слишком мало данных.

Ледораздел ледяной плотины, подпруживаю-щей озеро, расположен в её центральной части (см. рис. 3, а; рис. 5, а). Поверхность плотины от ледораздела понижается в направлениях к фьорду Спартак и к озеру Спартакoвское. Данный ледо-раздел содержит минимальные высоты на участке немного севернее осевой зоны троговой долины, который характеризуется практически плоской поверхностью (см. рис. 5, б). Высота поверхности данного участка должна определять максимал-ную высоту уреза воды озера Спартакoвское, ко-торую может удержать ледяная плотина. Основ-ная часть этого участка 07.04.2016 располагалась в интервале высот 136–137 м. К июлю 2017 г. его по-верхность понизилась (см. рис. 5, в) в среднем на 2.06 м (среднеквадратичное отклонение 0.66 м по 15.5 тыс. ячеек ЦМР) — основная её часть 17.07.2017 находилась в интервале высот 134–135 м. Большая часть величины понижения поверхно-сти в этот период — следствие прорыва озера Спартакoвское под ледником во второй половине августа 2016 г.

На рис. 5, в отражено изменение высоты по-верхности нижней части выводного ледника ку-пола Семёнова–Тян-Шанского после прорыва озера Спартакoвское во второй половине августа 2016 г. Область наибольшего понижения поверх-ности ледника, примыкающая к озеру на востоке, находилась на плаву перед прорывом озера и бы-ла разрушена во время его спуска. Минимальные изменения высоты поверхности наблюдаются в краевой северо-восточной части ледника и в об-ласти ледораздела. Вдоль осевой линии ледяной плотины выделяется протянувшаяся в направле-нии с юго-востока на северо-запад (до фьорда) область относительно большого понижения по-верхности ледника, пересекающая ледораздел. Вероятно, эта область маркирует местоположе-ние подледного канала, сформировавшегося во время прорыва озера Спартакoвское во второй половине августа 2016 г.

ЦМР, отражающих состояние поверхности выводного ледника купола Семёнова–Тян-Шан-ского в 2018–2021 гг., в открытом доступе нет. Од-нако некоторое представление об изменении вы-соты его поверхности во второй половине 2010-х годов можно получить, анализируя массив исход-ных данных работы (Hugonnet et al., 2021a). Для анализа применялся массив данных об измене-нии высоты поверхности ледника в 2015–2019 гг.

(Hugonnet et al., 2021b). Изменение высоты по-верхности ледника на выделенном, наиболее низ-ком, участке ледораздела (см. рис. 5, б) изменяет-ся от -0.25 ± 0.43 до -0.90 ± 0.43 м/год, то есть за 2015–2019 гг. его поверхность понизилась на ве-личину от 1.25 ± 2.15 до 4.50 ± 2.15 м. Среднее по площади изменение высоты поверхности соста-вило -0.32 ± 0.43 м/год или 1.60 ± 2.15 м за 2015–2019 гг. Следует отметить, что в работе (Hugonnet et al., 2021a) данные об изменении высоты по-верхности ледников приведены в усредненном за определенные временные интервалы виде. По-этому из массива данных этой работы нельзя вы-членить информацию об изменении высоты по-верхности ледников за весь период или отдельные годы, и влиянии локализованного во времени прорыва озера в августе 2016 г. по отдельности. Сезоны абляции 2015–2016 гг. прошли до проры-ва озера во второй половине августа 2016 г. Пони-жение поверхности выводного ледника в 2017–2019 гг. должно быть меньше приведенных выше величин. Информации об изменении его поверх-ности в 2020–2021 гг. нет. По приведенным выше климатическим данным, поверхностная абляция в эти годы должна существенно превосходить средние значения 2015–2019 гг.

Дополнительную информацию о высоте по-верхности ледника можно получить, анализируя данные съёмки ICESat-2, представляющие собой точечные данные о высоте поверхности, снятые по треку с интервалом 20 м. Поверхность практи-чески плоского участка ледораздела (см. рис. 5, б) пересекает трек съёмки (идентификатор трека 858) ICESat-2 18.02.2021. В пределы границ этого участка попали 11 точек съёмки ICESat-2. Изме-нение высоты поверхности ледника, по сравне-нию с данными скорректированной по высоте ЦМР ArcticDEM v3.0 от 17.07.2017, составило (ме-диана по всем точкам) -6.5 м. При этом измере-ние отклонения высоты ЦМР от 17.07.2017 от дан-ных съёмки ICESat-2 18.02.2021 на стабильных поверхностях (вне ледников, снежников, эрози-онных врезов) составило -0.15 м (медиа-на по 350 точкам). Так как в середине июля 2017 г. се-зонный снежный покров на таких участках уже должен был отсутствовать, а съёмка ICESat-2 в середине февраля 2021 г. фиксировала высоту по-верхности сезонного снежного покрова. Из этого следует, что к концу сезона абляции 2020 г. по-верхность самой низкой части ледораздела (см. рис. 5, а–б) понизилась до высоты около 128 м.

Лето 2021 г. было тёплым (см. рис. 4, а). Судя по летним температурам воздуха, таяние в этот год должно было быть сопоставимо с таянием в 2018 и 2019 гг. Установлено, что с июля 2017 г. по середину февраля 2021 г. поверхность ледоразде-ла понизилась на 6.5 м (до высоты около 128 м). К середине августа 2021 г., вследствие таяния, поверхность ледяной плотины понизилась ещё

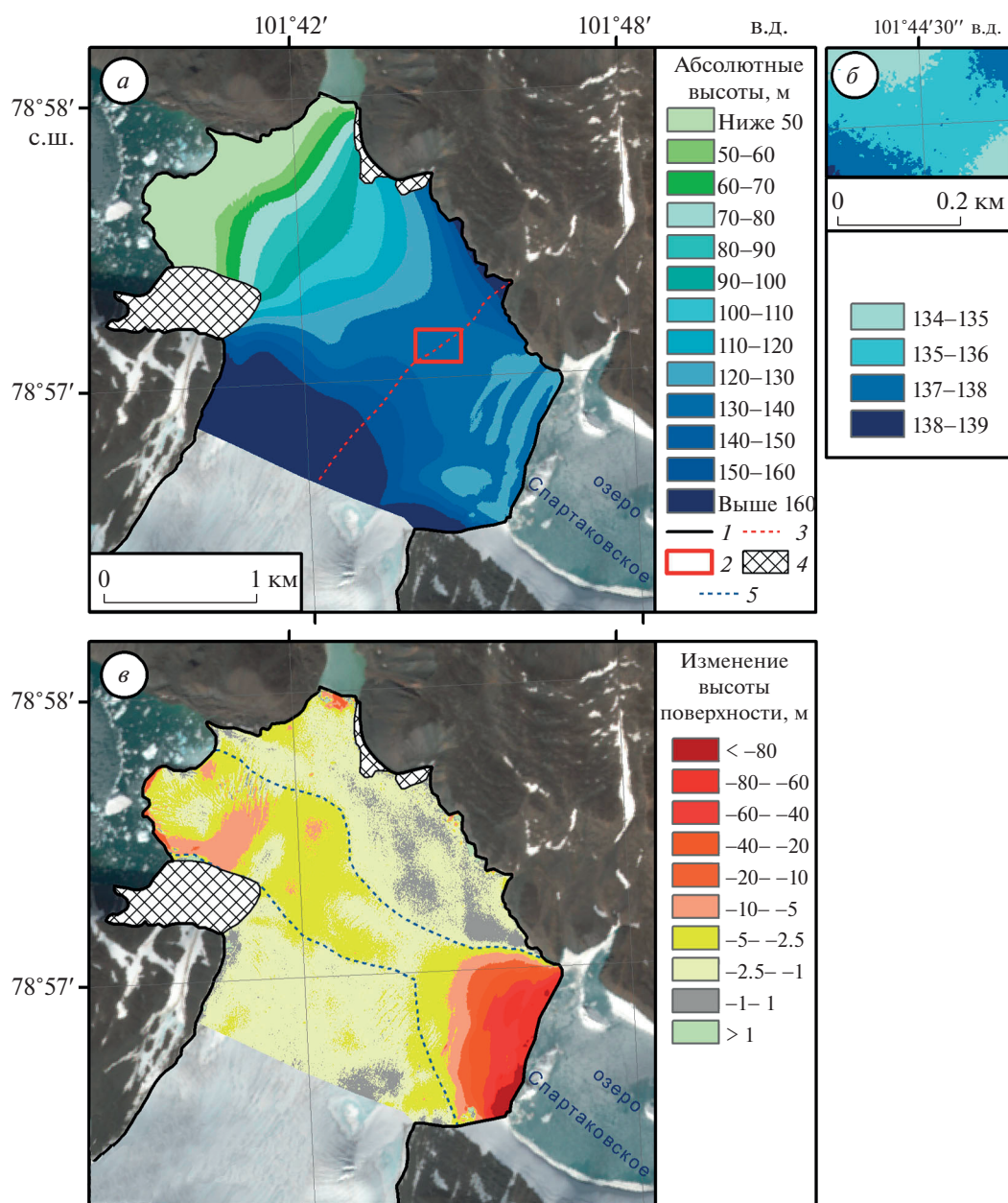


Рис. 5. Выводной ледник купола Семёнова–Тян-Шанского. В подложке спутниковый снимок Sentinel-2 от 01.08.2016. *a* – топографическая карта поверхности ледника 07.04.2016; *б* – топографическая карта участка ледораздела; *в* – изменение высоты поверхности ледника с 07.04.2016 по 17.07.2017. 1 – граница ледника 01.08.2016; 2 – наиболее низкий прилегающий к ледоразделу участок поверхности ледяной плотины; 3 – ледораздел; 4 – участки с облачностью на ЦМР 07.04.2016 и 17.07.2017; 5 – границы области, в которой предположительно располагался подледный канал стока в августе 2016 г.

Fig. 5. The outlet glacier of the Semyonov-Tyan-Shansky ice cap. On the background – satellite image Sentinel-2 01.08.2016. *a* – topographic map of the glacier surface 07.04.2016; *б* – topographic map of the ice divide site; *в* – change in the glacier surface elevation from 07.04.2016 to 17.07.2017. 1 – glacier boundary 01.08.2016; 2 – the lowest area of the surface of an ice dam adjacent to the ice divide; 3 – ice divide; 4 – areas with cloudiness on the DEM 07.04.2016 and 17.07.2017; 5 – the boundaries of the area in which the subglacial runoff channel was supposedly located in August 2016.

на 1 м. Это означает, что к началу прорыва озера Спартаковское в 2021 г., высота поверхности самой низкой части ледораздела не превышала 127 м. Высота дна озёрной котловины перед ледяной плотиной составляла около 8.5 м. Если предполо-

жить, что высота ложа под ледоразделом такая же, то толщина льда у ледораздела перед прорывом не превышала 118.5 м. В таком случае условие всплывания ледяной плотины при плотности ледникового льда 0.88 г/см^3 выполняется при до-

стижении урезом воды высоты 113 м. Так как поверхность ледяной плотины понижается в сторону озера, отдельные блоки льда на фронте всплывают ещё до момента достижения максимального уровня воды, предшествующего прорыву.

Вероятно, дно озёрной котловины под ледяной плотиной понижается в направлении фьорда. При этом глубина озера увеличивается и, соответственно, условие всплывания ледникового льда продолжает выполняться. Если предположить, что толщина льда плотины в области ледораздела может быть около 135 м, то дно фьорда находится на отметке около –6 м. При этом допущении профиль дна фьорда плавно понижается от озёрной котловины к фронту плотины на западе, который, по-видимому, находится на плаву. Высота поверхности ледника у западной оконечности 17.07.2017 составляла около 14 м, что означает толщину льда около 117 м.

При высоте уреза воды в озере 113 м расчётный объём воды в нем составляет 376 ± 21 млн м³. Из этого следует, что с 03.08.2021 до прорыва озера во второй половине августа 2021 г. в него поступило около 37 млн м³ воды. Эта величина выглядит реалистичной. Исходя из летних температур воздуха (см. рис. 4, а) и сумм осадков (см. рис. 4, б) можно предположить, что объём стока в озеро за тёплый сезон 2021 г. сопоставим (или немного ниже) со стоком в тёплые сезоны 2018 и 2019 гг.

Для получения дополнительной информации о состоянии ледникового купола Семёнова–Тян-Шанского проанализировано высотное положение его границы питания (маркируется границей наложенного льда) на спутниковых снимках, сделанных в конце августа–начале сентября. Высота определялась по мозаике ЦМР ArcticDEM v3.0. 02.09.2020 (год с аномально тёплым летом) граница питания на северном склоне ледникового купола располагалась на высотах 690–710 м. 26.08.2018 высота границы питания на данном участке составляла 640–660 м. При этом максимальная высота этой части купола составляет около 735 м. По данным наблюдений 1962–1966 гг. (Говоруха, 1989) средняя многолетняя высота границы питания ледника Семёнова–Тян-Шанского составляла около 600 м, то есть наблюдается существенное повышение высоты границы питания ледника.

Прорыв озера Спартаковское в августе 2021 г. показал, что наполнение озёрной котловины водой происходило значительно быстрее, чем до 2016 г. Это связано с радикальным увеличением стока в озеро в 2018–2021 гг., что является следствием значительного увеличения таяния на ледниках и снежниках водосборного бассейна, обусловленного ростом летних температур воздуха. При этом роста количества атмосферных осадков

в эти годы не наблюдалось. Объём стока в озеро в 2018–2021 гг. возрос более чем в два раза, и структура стока в озеро кардинально изменилась – выросла доля ледникового стока. Климатические изменения последних лет определили изменение режима ледниково-подпрудного озера Спартаковское. События прорыва озера в 2016 и 2021 гг. привели систему “ледяная плотина – озеро” к новому состоянию. Прежде урез воды озера Спартаковское достигал высоты 123 м, и озеро питало р. Базовая, на что указывают топографические карты второй половины XX века и спутниковые снимки. В настоящее время сток в долину реки Базовая происходить более не может. В будущем при сохранении современных тенденций изменений климата, понижение ледяной плотины приведет к более частым прорывам озера. По-видимому, вследствие отсутствия стока из озера в долину р. Базовая, её гидрологический режим также изменится. С 2021 г. ледниково-подпрудное озеро Спартаковское относится к бассейну Карского моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во второй половине августа 2021 г. произошел прорыв озера Спартаковское – одного из крупнейших ледниково-подпрудных озёр российского сектора Арктики. Прорыв происходил под выводным ледником купола Семёнова–Тян-Шанского, подпруживающим озеро. Объём спущенной из озера во фьорд Спартак воды составил около 376 ± 21 млн м³.

Со времени прошлого прорыва озера в августе 2016 г. прошло всего 5 лет. Озёрная котловина наполнялась водой быстрее, чем в период 2006–2016 гг. Объём стока возрос в результате усиления поверхностной абляции на ледниках водосборного бассейна в условиях аномально тёплых летних сезонов в 2018–2021 гг.

Расчётный уровень воды в озере, предшествующий его прорыву, оказался значительно ниже, чем в 2016 г., что связано с понижением поверхности ледника и, соответственно, уменьшением толщины льда плотины. Озеро постепенно разрушает ледяную плотину – с 01.08.2016 по 06.08.2021 её граница в центральной части отступила на 350–380 м. Высота ледораздела, определяющего удерживающую способность ледяной плотины, уменьшилась с весны 2016 до августа 2021 г. на 9.5 м: 2 м с 07.04.2016 по 17.07.2017 и ещё 7.5 м до прорыва 2021 г. Высота уреза воды озера перед прорывом 2021 г. составляла около 113 м. Уровень воды уже не сможет подниматься до водораздела с бассейном реки Базовая (123 м), и сток из озера в реку Базовая теперь невозможен.

Картографическим методом найдено местоположение области наибольшего понижения по-

верхности ледяной плотины, обусловленной выработкой подледного канала стока (см. рис. 5, в), через который происходил прорыв воды из озера во второй половине августа 2016 г. Предположено, что во время прорыва озера во второй половине августа 2021 г. его местоположение было примерно тем же, что и в 2016 г.

Понижение ледяной плотины и увеличение объёмов стока в озеро привело к сокращению времени наполнения водой озёрной котловины. Сток в долину реки Базовая происходить более не может, так как максимальный урез воды стал ниже на 10 м. Ледниково-подпрудное озеро Спартаковское теперь относится только к бассейну Карского моря. Понижение ледяной плотины и увеличение объёмов стока, происходящие в современных климатических условиях, приведут к более частым прорывам озера в будущем, уменьшению объёма озера и, соответственно, объёмов сбрасываемой во время прорывов воды.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии РАН AAAA-A19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004).

Acknowledgments. The paper includes the results obtained within the framework of the research project AAAA-A19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004) of the Research Plan of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Т. 1. М.: Российская академия наук, 1997. 392 с.
- Барбаш В.Р., Говоруха Л.С., Зотиков И.А. О температурном состоянии толщи купола Вавилова // Тр. ААНИИ. 1981. Т. 367. С. 54–57.
- Большаинов Д.Ю., Макеев В.М. Архипелаг Северная Земля. Оледенение, история развития природной среды. СПб.: Гидрометеиздат, 1995. 214 с.
- Большаинов Д.Ю., Соколов В.Т., Ежиков И.С., Булатов Р.К., Рачкова А.Н., Федоров Г.Б., Парамзин А.С. Условия питания и изменчивость ледников архипелага Северная Земля по результатам наблюдений 2014–2015 гг. // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 358–368.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-358-368>
- Брызгин Н.Н., Юнак Р.И. Температура воздуха и осадки на Северной Земле в периоды абляции и аккумуляции // Географические и гляциологические исследования в полярных странах. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 70–81.
- Василевич И.И., Чернов Р.А. К оценке снегозапасов в русловых врезках методом георадиолокации на территории Арктического региона // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 1. С. 5–15.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-5-15>
- Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.
- Говоруха Л.С. Современное наземное оледенение Советской Арктики. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 256 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 80 с.
- Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // МГИ. 1966. Вып. 12. С. 153–164.
- Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Природная катастрофа ледниково-подпрудного озера Спартаковское на о. Большевик (Северная Земля) // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 4. С. 58–68.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-4\(58-68\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-4(58-68))
- Чернов Р.А., Ромашова К.В. Современное состояние приледниковых озёр архипелага Шпицберген // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. № 1. С. 36–45.
<https://doi.org/10.15372/KZ20220104>
- Электронный архив ААНИИ срочных метеорологических и аэрологических наблюдений научно-исследовательского стационара “Ледовая база “Мыс Баранова” за 2013–2021 гг. // Электронный ресурс: <http://old.aari.ru/main.php?lg=0&id=405>. (Дата обращения 10.06.2022).
- Fan Y., Ke C., Shen X., Xiao Y., Livingstone S.J., Sole A.J. Subglacial lake activity beneath the ablation zone of the Greenland Ice Sheet // The Cryosphere Discuss. 2022. [preprint].
<https://doi.org/10.5194/tc-2022-122>
- Harrison S., Karge J.S., Hugge C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Villmек V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods // The Cryosphere. 2018. V. 12. Is. 4. P. 1195–1209.
<https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Kääb A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century // Nature. 2021a. V. 592. P. 726–731.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Kääb A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century – Dataset. 2021b.
<https://doi.org/10.6096/13>
- Openaltimetry // Электронный ресурс. URL: <https://openaltimetry.org/citation.html> (Дата обращения: 12.09.2022).
- ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) // Электронный ресурс. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (Дата обращения: 12.09.2022).
- pgc.umn.edu // Электронный ресурс. URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem> (Дата обращения: 12.09.2022).
- Liang Y., Bi H., Huang H., Lei R., Liang X., Cheng B., Wang Y. Contribution of warm and moist atmospheric flow to a record minimum July sea ice extent of the Arctic in 2020 // The Cryosphere. 2022. V. 16. Is. 3. P. 1107–1123.
<https://doi.org/10.5194/tc-16-1107-2022>

- Monthly Reanalysis Timeseries from Climate Reanalyzer. Climate Change Institute, University of Maine, USA // Электронный ресурс. https://climate.reanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/. (Дата обращения: 10.06.2022).
- Nie Y., Qiao L., Jida W., Zhang Y., Sheng Y., Liu S. An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis // *Geomorphology*. 2018. V. 308. P. 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.002>
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. // "ArcticDEM". Harvard Dataverse. 2018. V. 1. <https://doi.org/10.7910/DVN>
- SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. 2022. Is. 71: 53 p. // Электронный ресурс. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report. (Дата обращения: 10.06.2022).
- Smith B., Adusumilli S., Csathy B.M., Felikson D., Fricke H.A., Gardner A., Holschuh N., Lee J., Nilsson J., Paolo F.S., Siegfried M.R., Sutterley T., and the ICESat-2 Science Team. 2021.
- ATLAS/ICESat-2 L3A Land Ice Height, Version 5. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL06.005>
- Strozzi T., Wiesmann A., Kääb A., Joshi S., Mool P. Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data // *NHESS*. 2012. V. 12. Is. 8. P. 2487–2498. <https://doi.org/10.5194/nhe-12-2487-2012>

Citation: Muraviev A.Ya., Chernov R.A. Outburst of the Spartakovskoye glacier-dammed lake and changes of the outlet glacier of the Semyonov-Tyan-Shansky Ice Cap, Severnaya Zemlya, in 2021. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (1): 17–32 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423010118

Outburst of the Spartakovskoye Glacier-Dammed Lake and Changes of the Outlet Glacier of the Semyonov–Tyan-Shansky Ice Cap, Severnaya Zemlya in 2021

A. Ya. Muraviev^{a,#} and R. A. Chernov^a

^a Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#] e-mail: anton-yar@rambler.ru

In the second half of August 2021, outburst flood from the Spartakovskoe Lake, one of the largest glacier-dammed lakes in the Russian sector of the Arctic, occurred on the Bolshevik Island (the Severnaya Zemlya archipelago). The lake hollow was drained. The volume of water discharged from the lake into the Spartak fjord was about 376 ± 21 mln. m³. Only 5 years have passed since the last outburst of the lake in August 2016. The lake hollow was filled with water faster than in the period 2006–2016. The volume of runoff into the lake increased significantly due to more intensive surface ablation on the glaciers of the drainage basin during the anomalously warm summers in 2018–2021. For the up-floating of the ice dam restraining the lake overflowing, the height of the water edge in the lake before the outburst should have been about 113 m. Compared to the state of 2016, the maximum possible water level in the lake has dropped by about 10 m. That was a result of lowering of the glacier surface and, accordingly, a decrease in the thickness of the dam ice. The cartographic method was used to find a location of the area of the greatest depression of the dam surface, the occurrence was conditioned by the development of the under-ice runoff channel in 2016. It can be assumed that during the lake outburst in the second half of August 2021, its location was approximately the same as in 2016. The water level in the lake will no longer be able to rise to the watershed with the Bazovaya River basin (123 m). The flow from the lake to the Bazovaya River is now impossible. The glacial-dammed Lake Spartakovskoe is now a part of only the Kara Sea basin. Under the present-day climatic conditions, the surface of the ice dam decreases and, accordingly, the volume of runoff into the lake increases. In the future, this will probably result in more frequent outburst of the lake, a decrease in its volume, and accordingly, a reduction of the water volume discharging into the lake.

Keywords: glacier-dammed lake, outlet glacier, melting, flood-outburst of lake, maximum level, Severnaya Zemlya

REFERENCES

- World Atlas of Snow and Ice Resources. V. 1. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p.
- Barbash V.R., Govorukha L.S., Zotikov I.A. O temperaturnom sostoyanii tolshi kupola Vavilova. About the temperature state of the Vavilov ice cap stratum // *Proc. of AARI*. 1981, 367: 54–57 [In Russian].

- Bolshiyarov D.U., Makeev V.M. *Arkipelag Severnaya Zemlya. Oledenenie, istoriya razvitiya prirodnoi sredi*. Severnaya Zemlya archipelago. Glaciation, history of the natural environment development. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1995: 214 p. [In Russian].
- Bolshiyarov D.Y., Sokolov V.T., Yozhikov I.S., Bulatov R.K., Rachkova A.N., Fedorov G.B., Paramzin A.S. Conditions of the alimentation and the variability of glaciers of the Severnaya Zemlya Archipelago from observations of 2014–2015. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 358–368 [In Russian].
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-358-368>
- Bryazgin N.N., Unac R.I. Air temperature and precipitation on the northern earth during periods of ablation and accumulation. *Geograficheskie i glaytsiologicheskie issledovaniya v polyarnykh stranakh*. Geographical and Glaciological Studies in Polar Countries. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988: 70–81 [In Russian].
- Vasilevich I.I., Chernov R.A. Estimation of snow reserves in the watercourse by the georadiolocation method in the Arctic region // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 5–15 [In Russian].
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-5-15>.
- Glazovsky A.F., Macheret Yu. Ya. Voda v lednikakh. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distantsionnykh issledovaniy. Water in glaciers. Methods and results of geophysical and remote sensing studies. M.: GEOS, 2014: 528 p. [In Russian].
- Govorukha L.S. *Sovremennoe nazemnoe oledenenie sovetsoi Arktiki*. Modern ground glaciation of the Soviet Arctic. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1989: 256 p. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 16. Is. 1. Pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 80 p. [In Russian].
- Krenke A.N., Khodakov V.G. *O svyazi poverkhnostnogo tayaniya lednikov s temperaturoi vozdukh*. Connection of the surface melting glaciers and air temperature // *Materialy Glytsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1966, 12: 153–164 [In Russian].
- Chernov R.A., Muraviev A. Ya. Catastrophic outburst-flood of the Spartakovskoye glacier-dammed lake on the Bolshhevik Island (Severnaya Zemlya). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2020, 24 (4): 58–68.
[https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2020-4\(50-59\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2020-4(50-59)).
- Chernov R.A., Romashova K.V. Current state of glacial lakes on Svalbard. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2022, 26 (1): 36–45 [In Russian].
<https://doi.org/10.15372/KZ20220104>
- AARI electronic archive of urgent meteorological and aerological observations of the scientific research station “Ice base “Baranov foreland” for 2013–2021. Retrieved from:
<http://old.aari.ru/main.php?lg=0&id=405>. (Last access: 10.06.2022). [In Russian].
- Fan Y., Ke C., Shen X., Xiao Y., Livingstone S.J., Sole A.J. Subglacial lake activity beneath the ablation zone of the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere Discuss*. 2022. [preprint].
<https://doi.org/10.5194/tc-2022-122>.
- Harrison S., Karge J.S., Hugge C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilímek V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*. 2018, 12 (4): 1195–1209.
<https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>.
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Kääb A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*. 2021, 592: 726–731.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>.
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Kääb A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century – Dataset. 2021b.
<https://doi.org/10.6096/13>.
- Openaltimetry. Retrieved from: <https://openaltimetry.org/citation.htm> (Last access: 12 September 2022).
- ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). Retrieved from: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (Last access: 12 September 2022).
- pgc.umn.edu. Retrieved from: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem> (Last access: 12 September 2022).
- Liang Y., Bi H., Huang H., Lei R., Liang X., Cheng B., Wang Y. Contribution of warm and moist atmospheric flow to a record minimum July sea ice extent of the Arctic in 2020. *The Cryosphere*. 2022, 16 (3): 1107–1123.
<https://doi.org/10.5194/tc-16-1107-2022>.
- Monthly Reanalysis Timeseries from Climate Reanalyzer. Climate Change Institute, University of Maine, USA. Retrieved from: https://climatereanalyzer.org/reanalysis-monthly_tseries/. (Last access: 10.06.2022).
- Nie Y., Qiao L., Jida W., Zhang Y., Sheng Y., Liu S. An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis. *Geomorphology*. 2018, 308: 91–106.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.002>.
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. “ArcticDEM”. Harvard Dataverse. 2018. V1.
<https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>
- SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. 2022. Is. 71: 53 p. Retrieved from: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report. (Last access: 10.06.2022).
- Smith B., Adusumilli S., Csathó B.M., Felikson D., Fricker H.A., Gardner A., Holschuh N., Lee J., Nilsson J., Paolo F.S., Siegfried M.R., Sutterley T., and the ICESat-2 Science Team. 2021. ATLAS/ICESat-2 L3A Land Ice Height, Version 5. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
<https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL06.005>.
- Strozzi T., Wiesmann A., Kääb A., Joshi S., Mool P. Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data // *NHESS*. 2012, 12 (8): 2487–2498.
<https://doi.org/10.5194/nhess-12-2487-2012>.