

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324.3, 556.555.2

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4(58-68)

ПРИРОДНАЯ КАТАСТРОФА ЛЕДНИКОВО-ПОДПРУДНОГО ОЗЕРА
СПАРТАКОВСКОЕ НА ОСТРОВЕ БОЛЬШЕВИК (СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ)

Р.А. Чернов, А.Я. Муравьев

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия; rob31@mail.ru

Исследовано изменение уровня ледниково-подпрудного озера Спартаковское в 2016–2019 гг. Летом 2016 г. уровень озера достиг максимальной отметки, и в период с 16 по 25 августа произошел его катастрофический прорыв вследствие всплывания ледниковой плотины, образованной выводным ледником купола Семенова-Тян-Шанского. Оценка площади озера получена в результате дешифрирования спутниковых снимков. По данным обработки разновременных цифровых моделей рельефа определены объем озера и высота ледовой плотины. Максимальный уровень воды в озере Спартаковское составил 122.9 м, при этом его площадь и объем составляли (6.63 ± 0.42) км² и (404.3 ± 21.9) млн м³ соответственно. Минимальная высота ледораздела плотины до спуска озера была около 137 м, что обеспечило ее всплытие при средней плотности льда 0.875 г/см³. Расчеты, основанные на данных снегомерных съемок и величине летнего таяния, показали, что таяние сезонного снежного покрова, многолетних снежников и льда на поверхности ледников в водосборном бассейне озера дают величину стока от 37.1 до 48.2 млн м³ воды ежегодно в зависимости от средних летних температур и осадков. Озерная котловина полностью наполняется примерно за 10 лет. Предыдущий прорыв озера произошел летом 2006 г. и до 2016 г. уровень озера непрерывно повышался. В конце августа 2019 г. уровень озера достиг отметки 80 м, что согласуется с расчетами стока в озере. При сохранении темпов наполнения озера следующий его прорыв может произойти в 2024–2025 гг.

Ледниково-подпрудное озеро, выводной ледник, снежный покров, таяние, максимальный уровень, прорыв озера, Северная Земля

CATASTROPHIC OUTBURST-FLOOD OF THE SPARTAKOVSKOYE GLACIER-DAMMED LAKE
ON THE BOLSHEVIK ISLAND (SEVERNAYA ZEMLYA)

R.A. Chernov, A.Ya. Muraviev

Institute of Geography, RAS, 29, Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia; rob31@mail.ru

The changes in the level of the Spartakovskoye glacier-dammed lake during the period of 2016 to 2019 have been studied. In the summer of 2016, the lake level reached its maximum, and during the period from August 16 to August 25, a catastrophic outburst-flood occurred due to the floating of a glacier dam formed by the outlet glacier of the Semenov-Tyan-Shansky dome. Estimation of the lake area has been obtained as a result of interpretation of satellite images. The volume of the lake and the height of the glacier dam have been determined according to the data of processing of the multi-temporal digital relief models. The maximum water level in Spartakovskoye Lake was 122.9 m, while its area and volume were (6.63 ± 0.42) km² and (404.3 ± 21.9) million m³, respectively. The minimum height of the iceded of the dam before the lake drainage was about 137 m, which ensured its ascent with an average ice density of 0.875 g/cm³. The calculations based on the data of snow surveys and the amount of summer melting have revealed that the melting of seasonal snow cover, perennial snowfields and ice on the surface of glaciers in the catchment area of the lake gives a runoff value of 37.1 to 48.2 million m³ of water annually depending on average summer temperatures and precipitation. The lake basin is completely filled in about 10 years. The previous outburst-flood of the lake had occurred in the summer of 2006, and until 2016, the level of the lake was continuously rising. At the end of August 2019, the lake's level reached 80 m, which was consistent with the calculations of runoff into the lake. While maintaining the pace of the lake's filling, its next outburst-flood may occur in 2024–2025.

Glacier-dammed lake, outlet glacier, snow cover, melting, maximum level, flood-outburst of lake, Severnaya Zemlya

ВВЕДЕНИЕ

Ледниково-подпрудные озера многочисленны в Исландии и Гренландии [Grinsted et al., 2017; Carrivick, Fiona, 2019], часто встречаются на Шпицбергене, Новой Земле, Земле Франца-Иосифа, Канадском арктическом архипелаге. Режим и прорывы некоторых из них были описаны

ранее [Walder, Costa, 1996; O'Connor, Costa, 2004; Carrivick, Rushmer, 2006]. Наиболее масштабные события отмечены в Исландии при прорыве ледниковых озер (jokulhlaup), расположенных в области действия активного вулканизма [Clague, Mathews, 1973; Björnsson, 1992; Ng, Liu, 2009]. На

архипелаге Северная Земля имеется лишь два крупных ледниково-подпрудных озера – Фигурное и Спартаковское [Большакинов, Макеев, 1995].

Как правило, методы определения объемов паводков при прорывах ледниково-подпрудных озер разрабатывались для горных территорий на основе физико-математического моделирования [Глазырин, Соколов, 1976; Кидяева и др., 2018; Попов и др., 2019] или путем анализа метеорологической информации [Коновалов, 1990; Ng, Liu, 2009]. Количественная информация о характере отдельных событий составляла основу успешного моделирования. При отсутствии или невозможности получить достоверные полевые данные о режиме прорывных озер в последнее время используются результаты анализа данных дистанционного зондирования Земли с точным пространственным разрешением [Furuya, Wahr, 2005]. Данный метод представляется наиболее перспективным для выявления объектов на удаленных территориях. Получаемой дистанционными методами информации вполне достаточно, чтобы обнаружить межгодовые изменения уровня воды в озерах и оценить объем их котловин. Кроме того, для прогнозирования прорывов озер нужна информация о состоянии ледниковой плотины и особенностях ледниковой дренажной системы, через которую может происходить спуск озера [Мачерет, Глазовский, 2011].

Хотя прогнозирование прорывов ледниково-подпрудных озер, расчеты объема сброса и построение гидрографов паводков более актуальны для территорий, где ведется хозяйственная деятельность, изучение подобных событий в арктическом регионе важно в научном и практическом отношении. Катастрофические прорывы озер в Арктике более масштабны, чем в горных регионах умеренных широт. Объемы сброса и максимальные расходы воды в десятки раз больше, поэтому степень воздействия на окружающую среду оказывается значительной. Проникновение больших масс воды в толщу ледников имеет важное значение для их термодинамического состояния и динамики [Глазовский, Мачерет, 2014].

Озеро Спартаковское, подпруженное выводным ледником купола Семенова-Тян-Шанского, расположено сравнительно недалеко от Ледовой базы “Мыс Баранова”, что дает уникальную возможность изучения режима озера, состояния ледника и характеристики водосборного бассейна.

В настоящее время на о. Большевик проводятся исследования баланса массы ледниковых куполов Мушкетова и Семенова-Тян-Шанского, наблюдения за снеготаянием и стоком рек Амба, Мушкетовка и Базовая в рамках программы исследований экспедиции Север под руководством ААНИИ [Макитас, Соколов, 2014]. На основе полевых измерений были получены сведения о распределении снегозапасов и строении снежного по-

крова в северной части о. Большевик [Василевич, Чернов, 2018]. На сегодняшний день сведения об оз. Спартаковское носят фрагментарный характер и не дают представления о его режиме. По результатам фотосъемки с вертолета в августе 2017 г. были отмечены спуск озера и множество айсбергов, лежащих в озерной котловине. Его режим стал понятен лишь после анализа разновременных данных дистанционного зондирования Земли.

В настоящей работе исследуется изменение состояния озера Спартаковское после прорыва 2016 г., которое, вероятно, является крупнейшим прорывным ледниково-подпрудным озером в России.

ОПИСАНИЕ РАЙОНА

Остров Большевик – второй по величине остров архипелага Северная Земля и располагается в его южной части. На западе он отделен проливом Шокальского от о. Октябрьской Революции. На юге пролив Вилькицкого разделяет остров с материком. В центральной и северной частях острова на возвышенных плато расположены ледниковые купола Ленинградский, Семенова-Тян-Шанского, Войцеховского, Кропоткина и Мушкетова. Гидрологическая сеть на острове представлена небольшими реками и озерами, имеющими питание в летний период за счет таяния ледников и снежного покрова. Наиболее полноводные и протяженные реки расположены в северной части острова. Реки Базовая, Разъезжая, Сложная берут начало от куполов Семенова-Тян-Шанского и Ленинградский и впадают в залив Ахматова. Наибольший интерес представляет озеро Спартаковское, образованное ледовой плотиной выводного ледника купола Семенова-Тян-Шанского (рис. 1). При максимальном уровне воды озеро имеет сток в

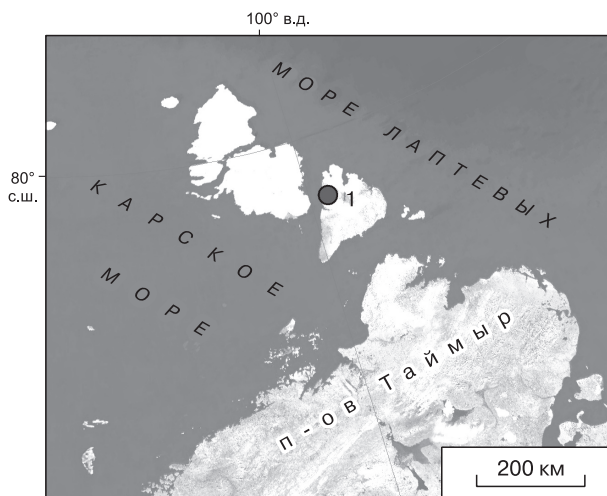


Рис. 1. Район исследований.

1 – положение озера Спартаковское на о. Большевик.



Рис. 2. Айсберги на дне залива оз. Спартаковское (фото Р.А. Чернова).

море Лаптевых. В случае прорыва вода сбрасывается в Карское море. На топографических картах второй половины XX в. р. Базовая вытекает из оз. Спартаковское.

Около 40 % площади водосборного бассейна оз. Спартаковское занимают ледники и многолетние снежники. Для свободной ото льда территории бассейна характерны пологие холмы, покрытые каменистыми россыпями. Их поверхность рассечена эрозионными врезами, которые в нижних частях склонов образуют каньоны. К бассейну оз. Спартаковское относятся северные склоны ледниковых куполов Семенова-Тян-Шанского и Войцеховского. Выводной ледник купола Семенова-Тян-Шанского перекрывает фьорд Спартак, образуя ледовую плотину шириной около 3 км.

Климат Северной Земли отличается продолжительной и морозной зимой и коротким холодным летом. Средние годовые температуры воздуха составляют около -14°C , период положительных температур длится 70–80 дней, приблизительно с середины июня до конца августа. Летом температура воздуха на уровне моря нередко опускается ниже 0°C [Брызгин, Юнак, 1988], по данным метеонаблюдений на полярной станции Ледовая база “Мыс Баранова”, средние температуры летних месяцев на уровне моря меняются в диапазоне $0-4^{\circ}\text{C}$ [Макитас, Соколов, 2014]. Количество осадков на о. Большевик сравнительно небольшое – от 200 мм на уровне моря до 300–400 мм в

области питания ледниковых куполов [Атлас..., 1997]. В летние месяцы на побережье выпадает от 75 до 100 мм жидких осадков, выше 100 м осадки выпадают смешанного типа, их количество увеличивается с высотой [Брызгин, Юнак, 1988]. Снежный покров сходит к середине июня, но на ледниковых куполах на высотах выше 500 м сохраняется до конца лета [Большаинов и др., 2016]. Снегомерные съемки, выполненные весной 2017 г. на северной территории острова, показали, что распределение снеготолщин на пологих участках имеет линейную высотную зависимость. Максимальная величина снеготолщин отмечена на склонах ледниковых куполов, а минимальные значения характерны для береговых территорий. У подножия ледников за счет метелевого сноса снежного покрова образуются многолетние снежники. Повышенное снегонакопление отмечено в эрозионных врезках, где снеготолщины в 7–8 раз превышают фоновые значения [Василевич, Чернов, 2018]. После схода снежного покрова таяние снежников в течение лета является основным источником питания рек и озер острова.

Озеро Спартаковское – одно из крупнейших среди ледниково-подпрудных озер на островах в восточном секторе Арктики. Наполнение озера осуществляется в летний период за счет снеготаяния и таяния льда на поверхности ледниковых куполов. В северо-восточной части озера расположен протяженный и узкий залив, который в верховье соединен перевалом с долиной р. Базовая, вследствие чего максимальный уровень озера определен высотой точки перелива в долину. В мае 2017 г. в ходе маршрутных исследований были обнаружены последствия спуска озера 2016 г. Вход в залив оказался заблокирован нагромождением многочисленных айсбергов, лежащих на дне каньона (рис. 2).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использованы следующие материалы: 1) спутниковые снимки Sentinel-2 уровня обработки L1C (01.08.2016, 27.08.2016, 09.09.2016, 26.08.2018, 01.09.2019) с пространственным разрешением 10 м; 2) цифровая модель рельефа (ЦМР) ArcticDEM v3.0 [Porter et al., 2018] – мозаика с пространственным разрешением 2 м и отдельные фрагменты (“strip”); 3) данные полевых наблюдений в мае 2017 г.; 4) данные метеонаблюдений на полярной станции “Мыс Баранова”; 5) топографические карты масштаба 1:200 000 издания 1955 г. (состояние местности на 1952 г.).

Все данные дистанционного зондирования Земли, использованные в работе, были зарегистрированы в проекции UTM (зона 47N) на эллипсоиде WGS-84. Обработка спутниковых снимков и ЦМР проводилась в программных пакетах QGIS и ESRI ArcGIS.

Дешифрирование границ озера на спутниковых снимках Sentinel-2 было выполнено вручную. Точность пространственной привязки снимков Sentinel-2, по данным ESA (European Space Agency), находится в пределах 11 м с уровнем доверия 95.5 % [SENTINEL 2..., 2019].

ArcticDEM v3.0 использовалась для определения максимально возможного уровня воды в озере, объема озерной котловины, уровня поверхности подпруживаемого выводящим ледником озера, границ водосборного бассейна и площади его высотных зон. В документации к данной ЦМР, приведенной на сайте разработчиков [https://www.pgc.umn.edu], отмечено, что горизонтальные и вертикальные характеристики ее точности не были проверены. Покрытие мозаики на район оз. Спартаковское сформировано из скорректированных с использованием данных съемки ICESat результатов обработки спутниковых снимков WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3 2012–2017 гг. (точный набор и покрытие фрагментов неизвестны) – точность их пространственной привязки без использования наземных контрольных точек находится в пределах 4, 3.5 и 3.5 м соответственно. Мозаика ArcticDEM v3.0 с пространственным разрешением 2 м является самой точной и детализированной из доступных материалов, содержащей информацию о рельефе и высотах стабильных поверхностей (поверхность суши, за исключением ледников, снежников и крупных эрозийных врезов).

Максимальный уровень воды в озере (122.9 м) был измерен на водоразделе водосборных бассейнов оз. Спартаковское и р. Базовая. Измерение произведено по растру мозаики ArcticDEM v3.0. На спутниковом снимке Sentinel-2 от 01.08.2016 г. видно, что из северо-восточной оконечности озера в долину р. Базовая вытекает ручей (точка перелива на рис. 3). Отсюда следует, что 01.08.2016 г. уровень воды в озере был максимально возможным. Очевидно, что он оставался максимальным, по крайней мере, до 16.08.2016 г., когда перелив воды из озера в долину р. Базовая наблюдался сотрудником гидрологического отряда ААНИИ И.С. Ёжиковым.

Объем озера был рассчитан как объем, заключенный между максимально возможным уровнем воды в озере (122.9 м) и ЦМР поверхности его дна. Для получения ЦМР дна озера было отобрано два фрагмента ЦМР (“strip”) от 11.04.2017 и 08.08.2017 г., входящих в базу данных ArcticDEM v3.0 и доступных для загрузки по отдельности, полностью покрывающих озерную котловину. Фрагмент от 11.04.2017 г. покрывает более 80 % территории озера на 01.08.2016 г. Фрагмент от 08.08.2017 г. покрывает западную оконечность озера ($0.78 \pm 0.04 \text{ км}^2$, или 11.8 % площади), не охваченную фрагментом от 11.04.2017 г. Данные

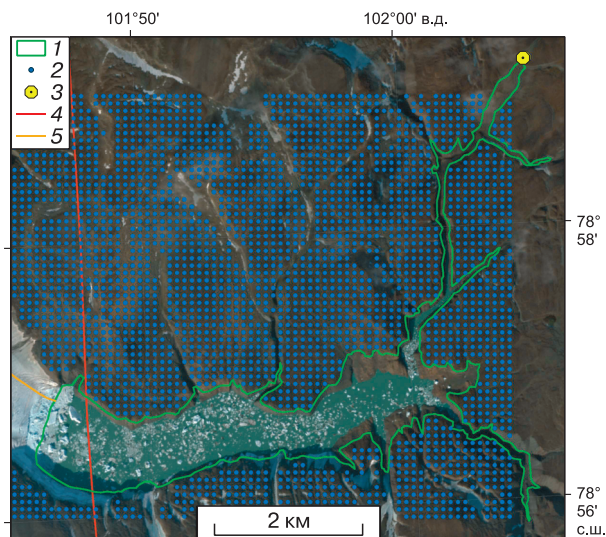


Рис. 3. Границы и точки сорегистрации ЦМР, использованные в работе.

1 – береговая линия озера 01.08.2016 г.; 2 – точки сорегистрации ЦМР; 3 – водораздел с бассейном р. Базовая; 4 – граница между фрагментами “strip” 11.04.2017 г. (восточный) и 08.08.2017 г. (западный) ЦМР ArcticDEM v3.0; 5 – профиль (данные по которому см. на рис. 6). В подложке – спутниковый снимок Sentinel-2 01.09.2019 г.

фрагменты ЦМР являются наиболее свежими из созданных после спуска озера в конце августа 2016 г. Наименьшие высоты, зафиксированные на небольших плоских участках в западной части фрагмента ЦМР от 11.04.2017 г., находились в диапазоне 20–21 м над уровнем моря.

Проверка и коррекция высотной привязки фрагментов “strip” ArcticDEM v3.0 выполнялись относительно мозаики указанной ЦМР. Для этого была создана регулярная сетка точек с шагом 100 м (см. рис. 3), из которой были исключены все точки, расположенные на нестабильных поверхностях – ледниках, снежниках, водных поверхностях и эрозийных врезках. Последние были исключены из-за скопления в них большого количества снега в результате метелевого перераспределения, что является существенным фактором, так как, во-первых, фрагменты “strip” ArcticDEM v3.0 созданы в разные сезоны, во-вторых, мозаика данной ЦМР, созданная с их использованием, может содержать не информацию о высотах дна эрозийных врезок, а информацию о высотах поверхности накопленного в них снега (различие до нескольких метров).

Далее точкам, расположенным на стабильных поверхностях, присваивались высоты мозаики и соответствующих фрагментов “strip” ArcticDEM v3.0. Поверхность фрагмента “strip” ЦМР от 11.04.2017 г. была систематически повышена на

1.62 м – величину медианного отклонения по 2322 точкам от поверхности мозаики. Поверхность фрагмента “strip” ЦМР от 08.08.2017 г. была систематически повышена на 3.33 м – величину медианного отклонения по 870 точкам от поверхности мозаики. Погрешность по высоте фрагментов “strip” ArcticDEM v3.0 относительно данных мозаики оценивается авторами в ± 3 м. Этот доверительный интервал включает отклонение значений 92.6 % из 2322 точек фрагмента “strip” 11.04.2017 г. и 97.2 % из 870 точек фрагмента “strip” 08.08.2017 г. от значений мозаики ArcticDEM v3.0, расположенных на стабильных поверхностях.

Так как спуск оз. Спартаковское произошел в конце августа 2016 г., т. е. практически в конце периода таяния на ледниках и снежниках района, фрагмент ЦМР от 11.04.2017 г. наиболее близко отражает поверхность дна озера после его спуска. Фрагмент ЦМР от 08.08.2017 г. относится к следующему после спуска озера теплomu сезону. Измерение разницы высот скорректированных фрагментов ЦМР от 11.04.2017 и 08.08.2017 г. показало разницу уровня воды 10.09 м. Эта величина была учтена при расчете объема озерной котловины.

Скорректированные фрагменты ЦМР от 11.04.2017 и 08.08.2017 г. были совмещены, в результате чего получена ЦМР дна озера после его спуска. Это позволило вычислить объем, заключенный между уровнем 122.9 м (водораздел бассейнов озера и реки Базовая) и ЦМР поверхности его дна, который составил (404.3 ± 21.9) млн м³.

Границы водосборного бассейна были дешифрированы на спутниковом снимке Sentinel-2 от 27.08.2016 г. вручную. В качестве вспомогательного материала использовалось растровое изображение экспозиции поверхности, созданное из мозаики ArcticDEM v3.0.

Для расчета величины стока в водосборном бассейне озера использованы данные о распределении снеготпасов в центральной части о. Большевик, полученные первым автором в ходе выполнения снегомерных работ весной 2017 г. Работы были выполнены по программе гидрологических исследований научно-исследовательского стационара Ледовая база “Мыс Баранова”. Измерения толщины снега на пологих поверхностях (плато, ледник) проводились традиционным способом – щупом на линейных профилях и тестовых площадках, в руслах рек был применен метод радиолокации снежного покрова [Василевич, Чернов, 2018]. По снегомерным измерениям установлено, что средняя толщина и плотность снежного покрова возрастают с увеличением высоты местности. По данным измерений толщины снежного покрова на высотах 100–200 м, его средняя толщина была равна 25 см при средней плотности снега 0.30 г/см³, что соответствует снеготпасу 75 мм

водного эквивалента (в.э.). На высотах 200–400 м средняя толщина снежного покрова равна 50 см при средней плотности снега 0.40 г/см³, что соответствует снеготпасу 200 мм в.э. По нашим измерениям 2017 г., на северном склоне купола Мушкетова средняя плотность снежного покрова варьировала от 0.38 до 0.45 г/см³.

Толщина сезонного снега в руслах рек и каньонах изменялась в широких пределах, в период максимального снеготпасования средние значения толщины снега на плоских плато, а также в руслах рек Мушкетова и Амба составляли 0.37, 1.80 и 1.86 м соответственно [Василевич, Чернов, 2018]. Наши оценки показали, что снежные наносы в руслах рек аккумулируют до 20 % снеготпасов на плато.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Максимальная площадь озера (6.63 ± 0.42 км²) отмечена летом 2016 г. (рис. 4, а). Объем озера при максимальном уровне воды в 2016 г. составил (404.3 ± 21.9) млн м³. Озеро удерживала ледовая плотина шириной около 3 км, высотой до 137 м в северной части. При сопоставлении уровня озера и высоты плотины условие гидростатического всплывания льда выполняется при средней плотности ледникового льда 0.875 г/см³, что вполне соответствует реальным величинам. В случае, если основание ледниковой плотины лежит ниже уровня моря на несколько метров, условие гидростатического всплывания будет также выполняться.

Катастрофический спуск оз. Спартаковское произошел в период с 16 по 26 августа 2016 г. На спутниковом снимке Landsat 8 от 25.08.2016 г. видна поверхность воды и то, что уровень воды в озере существенно ниже максимально возможного значения. На снимке Sentinel-2 от 27.08.2016 г. наблюдается практически осушенная озерная котловина, усеянная обломками льда (см. рис. 4, б). Около ледовой плотины на западе озерной котловины осталось небольшое количество воды. В северо-восточной части котловины скопление айсбергов было наиболее масштабным – узкий и глубокий залив был загромажден айсбергами высотой до 25 м (см. рис. 2). Ледовая плотина со стороны озера была разбита трещинами. В ее восточной части хорошо различим провал поверхности, где, вероятно, формировался канал подледного стока во время прорыва. Со стороны моря на ледниковой поверхности следов канала не видно, так как выход прорывного канала в морской залив был значительно ниже уровня моря. Таким образом, перед спуском озера произошло всплывание ледовой плотины, вода из озера под большим напором устремилась в залив, формируя канал стока под ледником. Состояние озера до и после слива показано на рис. 4, а, б.

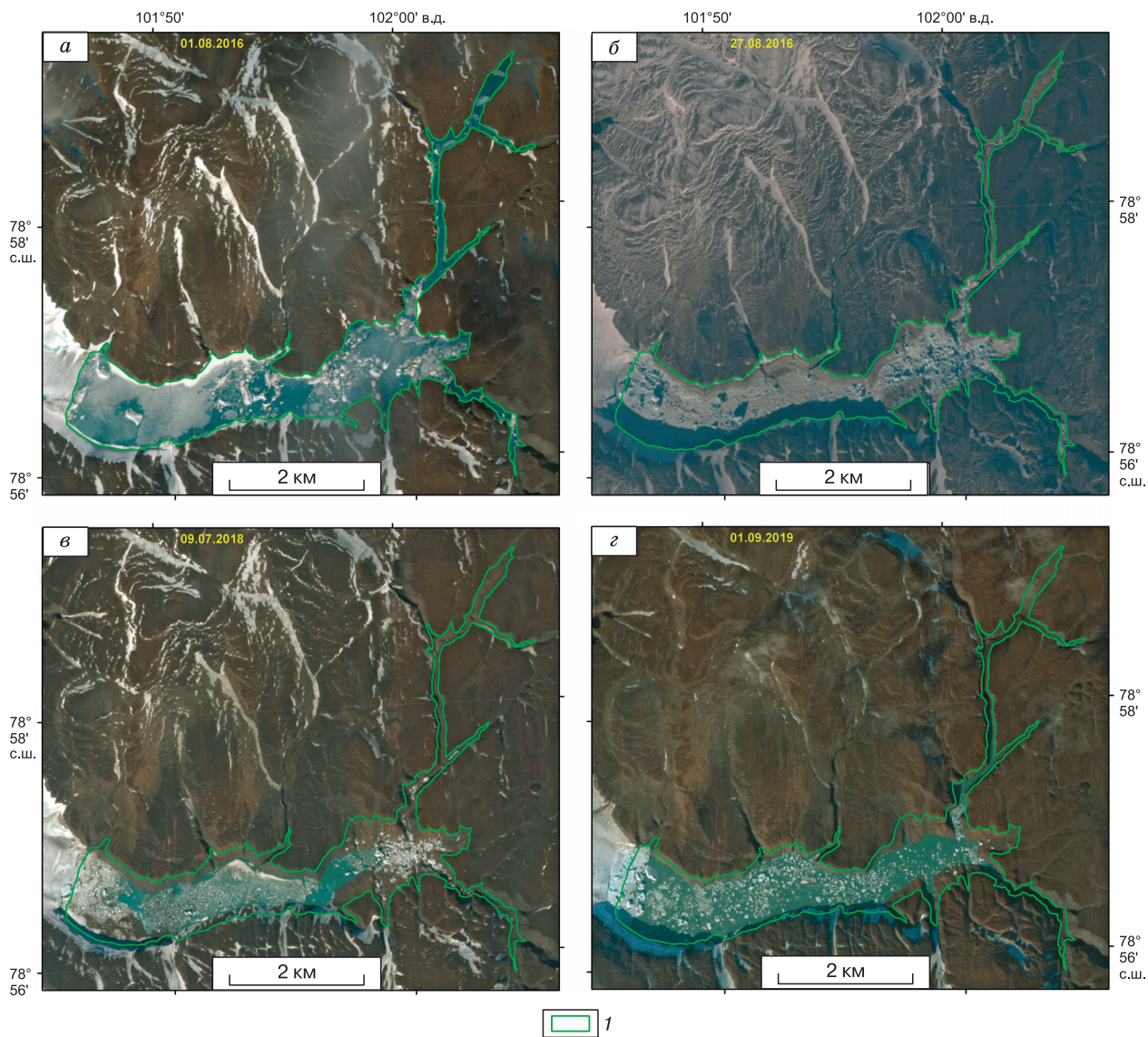


Рис. 4. Озеро Спартаковское.

а – 01.08.2016 г. (при максимальном уровне воды); *б* – 27.08.2016 г. (после спуска воды); *в* – 09.07.2018 г.; *г* – 01.09.2019 г.
 1 – береговая линия озера 01.08.2016 г.

Для расчета жидкого стока в чашу озера были определены границы водосборного бассейна (рис. 5). Площадь водосборного бассейна озера составляет $(167 \pm 1.1) \text{ км}^2$, из которых $(73.6 \pm 1.4) \text{ км}^2$ занято ледниками. На юге значительная часть площади водосборного бассейна занята северным склоном ледникового купола Семенова-Тян-Шанского. На востоке территории границы бассейна охватывают часть ледника Войцеховского. Крупные многолетние снежники отмечены у подножия ледников на южном берегу озера. В северной части бассейна ледники и крупные снежники отсутствуют (см. рис. 5).

В расчете жидкого стока учтены средние величины снеготпасов, которые рассчитаны по результатам снегомерных измерений в соседнем бассейне (бассейны рек Амба и Мушкетовка). Средние значения снеготпасов в бассейне озера рассматриваются в двух высотных диапазонах (ниже и выше 200 м) и составляют 75 и 200 мм соответственно. Для расчета принято, что вне ледников снежный покров стает полностью в течение лета. Летнее таяние снежников в эрозионных врезках добавляет 20 % к величине фоновых снеготпасов. Площадь внеледниковой части водосборного бассейна ниже уровня 200 м составля-

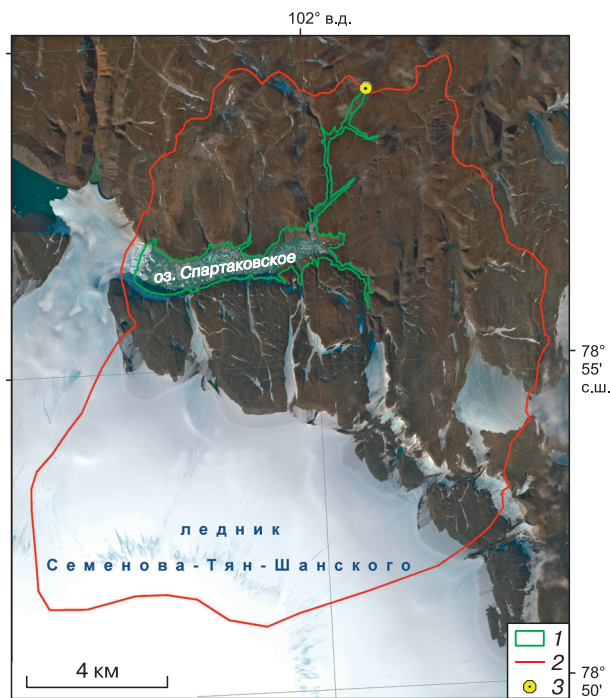


Рис. 5. Водосборный бассейн оз. Спартаковское.

1 – береговая линия озера при максимальном уровне воды 01.08.2016 г.; 2 – граница водосборного бассейна; 3 – водораздел с бассейном р. Базовая. В подложке – спутниковый снимок Sentinel-2 01.09.2019 г.

ет (27.23 ± 0.80) км², выше уровня 200 м равна (65.91 ± 2.10) км². Площадь снежников выше 200 м не учитывалась, так как их количество в верхней части склонов невелико.

Хотя ледники данного района лежат преимущественно выше 200 м, таяние на них продолжается в течение всего лета. При этом ниже 500 м снежный покров полностью стаивает, и сток с ледника продолжается за счет таяния льда. Величина летней абляции была рассчитана также для высотных диапазонов 123–200 и 200–400 м при средней их высоте 160 и 300 м соответственно. Площадь области абляции ледников принята равной 40 км², а высота границы питания ледника 400 м. Величина летней абляции на ледниках была рассчитана с помощью формулы Ходакова–Кренке $A = (T_{л} + 9.5)^3$ (где $T_{л}$ – средняя летняя температура воздуха на расчетной высоте) [Ходаков, 1965] при условии высотного градиента температуры, равного -0.7 °С на 100 м подъема. Здесь учитывался температурный скачок при переходе на ледниковую поверхность, составляющий 1 °С.

Средняя летняя температура воздуха для варианта “теплого” лета составляет -0.4 и -3.1 °С, для варианта “холодного” лета равна -1.4 и -4.1 °С. Площади поверхности ледников (вклю-

Расчетная величина стока в водосборном бассейне оз. Спартаковское при разных вариантах средней летней температуры воздуха и количества жидких осадков

Средняя летняя температура, °С	Расчетный сток (млн м ³) при количестве жидких осадков	
	75 мм	100 мм
-1.0 (“холодное” лето)	37.1	40.4
0.0 (“теплое” лето)	44.9	48.2
Среднее	41.0	44.3

чая прилегающие крупные снежники) для высот ниже и выше 200 м составляют (0.12 ± 0.04) и (73.52 ± 1.41) км² соответственно. Расчетная величина абляции на высоте 160 м составила 750 мм, на высоте 300 м – 260 мм (“теплое” лето). Сток талой воды из области абляции ледников принят равным величине летней абляции. Выше 400 м сток с ледников не учитывался, так как значительная часть талой воды остается в области ледяного питания в виде наложенного льда. Результаты расчета ежегодного жидкого стока приведены в таблице.

На рис. 6 показаны составляющие жидкого стока бассейна оз. Спартаковское. Основная часть талой воды (около 43 %) поступает с ледниковых поверхностей, приблизительно 29 % привносит таяние снега в горах, около 5 % – таяние малоснежных участков вдоль береговой линии озера, примерно 22 % дают жидкие осадки и 1 % поступает в озеро от таяния небольших снежников в эрозионных врезках.

Согласно расчетам, величина годового стока варьирует от 37.1 до 48.2 млн м³ в зависимости от погодных летних условий – средней летней темпе-

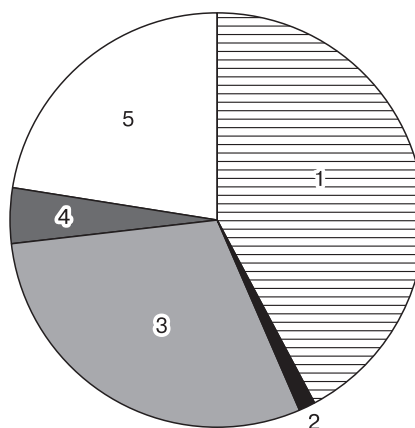


Рис. 6. Средняя доля стока в водосборном бассейне оз. Спартаковское в период летнего таяния:

1 – ледник и многолетние снежники (42.6 %); 2 – снежники в эрозионных врезках (1.0 %); 3 – снежный покров вне ледника выше 200 м (29.4 %); 4 – ниже 200 м (4.6 %); 5 – жидкие осадки (22.4 %).

ратуры воздуха и количества жидких осадков. В расчете не учитывалось испарение снежного покрова, которое может заметно уменьшить величину стока. Так, на пологих возвышенностях, где уклоны небольшие, а толщина снега менее 25 см, снежный покров почти полностью испаряется в первой половине лета. В водосборном бассейне оз. Спартаковское около 12 % площади территории имеет подобный рельеф, испарение с этой территории может составлять около 1.5 млн м³. Таким образом, испарение с пологих и малоснежных участков может уменьшить сток на 3.3–4.0 %.

При некоторых допущениях относительно расчета снеготазов, величины абляции и испарения мы получаем, что ежегодный сток в оз. Спартаковское составляет около 38.5–42.8 млн м³. Расчетное увеличение снеготазов в бассейне на 20 % дает возрастание стока лишь на 7 %, так как основная масса воды поступает с ледника за счет абляции. Следовательно, при такой величине годового стока наполнение озера до максимального уровня занимает около 10 лет.

Питание озера за счет обломков льда, оставшихся после спуска озера, не учитывалось. Оценка объема льда айсбергов, отколовшихся от ледовой плотины после спуска озера по мере его наполнения в 2018–2019 гг., дает величину 10–15 млн м³ льда.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прорывы ледниково-подпрудных озер многочисленны в Гренландии и Канадском арктическом архипелаге, встречаются на Шпицбергене и Новой Земле. На Северной Земле было отмечено изменение уровня оз. Фигурное на острове Октябрьской Революции [Большаков, Макеев, 1995], но, по видимому, спуск озера происходил по ледовому руслу и не носил катастрофического характера. По размеру оз. Спартаковское является одним из крупнейших в российской Арктике, а по объему это самое большое ледниково-подпрудное озеро на территории России. При достижении максимального уровня перелив озера происходит в долину р. Базовая, которая относится к бассейну моря Лаптевых. Прорыв озера происходит во фьорд Спартак, относящийся к бассейну Карского моря. Для прогноза прорыва озера интерес представляет состояние выводного ледника, а именно, высота ледовой плотины в северной (наиболее низкой) части, так как прорыв озера осуществляется посредством всплывания ледовой плотины под действием гидростатических сил.

Около северного берега фьорда на поверхности выводного ледника обнаруживается сеть кулисных трещин, так как в этой части ледника его поступательное движение резко меняет направление с северного на западное. Зона дробления льда

способствует всплыванию отдельных блоков льда. Ключевым моментом прорыва озера является всплывание ледовой плотины и сброс воды под ледником во фьорд. Быстрое развитие подледного канала обеспечивает сток даже после того, когда уровень озера падает. Высокий уровень озера (122.9 м) способствует значительному напору воды. Всплывание плотины создает условия для поступления больших объемов воды, и развитие подледного канала в момент прорыва происходит чрезвычайно быстро. Согласно модельным оценкам [Глазырин, Соколов, 1976; Clague, Mathews, 1973], максимальные расходы могли достигать 5500 м³/с. Мы не знаем первоначальные размеры подледникового канала, когда плотина всплыла, и сколько часов длился прорыв. Предположительно, прорыв озера при всплывании плотины происходит достаточно быстро и может длиться лишь несколько суток. Если считать, что начало прорыва относится к интервалу с 17 по 25 августа, то средний расход воды мог быть от 520 до 4675 м³/с. Максимальный расход воды в момент прорыва превышает многие известные оценки прорывных паводков крупных озер в Арктике. Например, расход воды во время прорыва оз. Ватндалур (Исландия) достигал 3000 м³/с [Clague, Mathews, 1973]. На Новой Земле известен прорыв оз. Ольгинское, образованного ледником Шокальского, расход воды при котором достигал 1600 м³/с [Чижов и др., 1968]. Имеются многочисленные сведения о паводках оз. Мерцбахера (Тянь-Шань), которое сопоставимо по размерам с оз. Спартаковское. Величина максимального расхода воды при прорыве достигала 500 м³/с [Коновалов, 1990].

Прорыв озера Спартаковское – катастрофическое явление, при котором происходит перемещение значительных масс воды и выделение большого количества энергии. Многие аспекты подобных явлений остаются малоизученными. Интересен процесс развития подледникового канала при условии контакта воды с холодным льдом и при значительных расходах воды. Уникальность озера заключается также в том, что оно имеет предельный уровень наполнения, поэтому состояние прорыва озера регулируется высотой ледовой плотины. При высоте плотины менее 140 м прорыв озера становится неизбежным и даже предсказуемым, так как разрушение плотины происходит блоками, всплытие которых становится заметным на поверхности ледника на спутниковых снимках. В 2016 г. до спуска озера на поверхности ледовой плотины образовались протяженные поперечные трещины, которые связаны со всплыванием блоков льда.

При анализе ЦМР 2017 г. было обнаружено, что высота поверхности ледовой плотины в северной части значительно понизилась по сравнению с

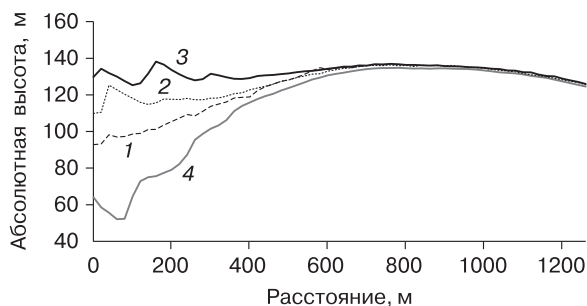


Рис. 7. Высота ледовой плотины выводного ледника:

1 – 14.08.2011 г.; 2 – 09.08.2013 г.; 3 – 15.04.2016 г.; 4 – 08.08.2017 г.

2016 г. (рис. 7). Профили высоты ледовой плотины по состоянию на 14.08.2011, 09.08.2013 и 15.04.2016 г. построены по соответствующим фрагментам “strip” ЦМР ArcticDEM v3.0, которые были скорректированы аналогично фрагментам “strip” от 11.04.2017 и 08.08.2017 г. Наибольшие деформации ледовой плотины отмечены в ее северо-восточной части, где предположительно формировался канал прорыва озера. В сравнении с предыдущими годами поверхность льда стала ниже на 60 м. При этом в центральной части ледника высота плотины изменилась мало (в пределах 5 м). В дальнейшем при наполнении озера взломанные блоки льда оказались айсбергами. В 2019 г. граница ледовой плотины отступила на 300–400 м от границ 2016 г., суммарный объем отколовшейся части составил около 35 млн м³. На 01.09.2019 г. уровень озера повысился примерно до 80 м, площадь возросла до (4.48 ± 0.24) км², а его объем составил (184.5 ± 15.5) млн м³. Этот объем воды вполне согласуется с нашими оценками годового стока с учетом таяния айсбергов в котловине озера. Возможно, прорыв озера, обрушение блоков льда и понижение высоты ледовой плотины в северо-восточной части приведут к тому, что высота поверхности выводного ледника также уменьшится. В этом случае следующий прорыв произойдет раньше, чем уровень озера достигнет максимальной отметки.

Следует отметить, что подобные спуски оз. Спартаковское происходили ранее неоднократно, на что указывают следы террас на бортах озерной котловины, обнаруженные в заливе озера в 2017 г. (рис. 8). Многочисленные горизонтальные линии на склонах маркировали положения уровня воды в разные годы.

Анализ доступных спутниковых снимков позволяет предположить, что предыдущий спуск оз. Спартаковское произошел в 2006 г. Снимков озера, не закрытого облачностью, для 2006 г. в свободном доступе найти не удалось. Однако на



Рис. 8. Следы террас на борту озерной котловины оз. Спартаковское.

Фото Р.А. Чернова, 01.05.2017 г.

снимке ASTER от 16.07.2005 г. видно, что береговая линия озера близка к ее положению 01.08.2016 г. Измеренный по скорректированному фрагменту “strip” ЦМР ArcticDEM v3.0 уровень воды составил (105 ± 3) м над уровнем моря. Это позволяет сделать вывод о том, что стока в озеро до конца теплого сезона 2005 г. не могло хватить для достижения уровня воды, при котором начинается перелив воды в бассейн р. Базовая.

На спутниковом снимке ASTER от 09.05.2007 г. видно, что большая часть озерной котловины осушена, заметны выходы коренных пород и нагромождения льда. Точный уровень остаточного озера в западной части озерной котловины на 09.05.2007 г. определить затруднительно из-за недостаточного разрешения снимка ASTER, сезонного снежного покрова и плохих для дешифрирования условий освещения – полученные значения высоты уреза находились в диапазоне 20–30 м. Это означает, что спуск воды из оз. Спартаковское произошел в предыдущий теплый сезон, т. е. летом 2006 г.

Летнее таяние в бассейне озера обеспечивает наполнение озера до максимального уровня в течение примерно 10 лет. В современных климатических условиях наполнение озерной котловины до максимального уровня возможно к концу лета 2024 г., поэтому очередной прорыв озера может произойти в 2024–2025 гг. Прогнозирование его прорыва становится реальной задачей при дистанционном мониторинге уровня воды и высоты ледовой плотины. Не исключена возможность частичного разрушения ледовой плотины в связи с изменением положения и гидротермического состояния выводного ледника.

ВЫВОДЫ

Прорыв ледниково-подпрудного озера Спартаковское произошел вследствие всплывания ледовой плотины, образованной выводным ледником купола Семенова-Тян-Шанского. На основе дешифрирования спутниковых снимков и обработки ЦМР был установлен максимальный уровень оз. Спартаковское, равный (122.9 ± 1.0) м. При достаточной высоте ледовой плотины максимальный уровень определяется высотой точки перелива в долину р. Базовая. Площадь озера при максимальном уровне составляла (6.63 ± 0.42) км², а его объем равен (404.3 ± 21.9) млн м³. В августе 2016 г. прилегающая к озеру часть ледовой плотины была взломана под действием гидростатических сил. В период 16–25 августа 2016 г. произошел прорыв озера, к 27 августа спуск воды из озера завершился. Объем перемещенной воды из озера в море, а также предполагаемые величины расхода воды в момент прорыва сопоставимы с крупнейшими прорывами озер в Арктике.

Расчет стока в водосборном бассейне озера показывает, что ежегодно озеро получает с бассейна за счет жидких осадков, таяния снега и льда от 37.1 до 48.2 млн м³ воды в зависимости от летних климатических условий. Согласно расчетам, озеро наполняется в течение 10 лет, что подтверждается данными обработки спутниковых снимков. Предыдущий прорыв озера произошел в 2006 г., когда был отмечен минимальный уровень воды в озере. При сохранении климатических условий следующий прорыв оз. Спартаковское, вероятно, состоится в 2024–2025 гг. Состояние ледовой плотины также важно для прогноза прорыва. Так, летом 2017 г. отмечено значительное понижение поверхности плотины в северо-восточной части и отступление ее границы на 300–400 м.

В будущем исследование оз. Спартаковское может дать важную информацию о механизме прорывов арктических ледниково-подпрудных озер и их взаимодействии с толщей холодных ледников. Масштаб прорыва ледниково-подпрудного озера Спартаковское уникален, и, несмотря на труднодоступность региона, вероятность регистрации и исследования очередного прорыва озера оказывается высокой.

Авторы благодарят НИС Ледовая база “Мыс Баранова” и участников экспедиции “Север-2017” (ААНИИ) за помощь в организации полевых исследований снежного покрова на о. Большевик.

Оценка площадей и изменения объема озера по данным дистанционного зондирования Земли проводилось в рамках госзадания № 0148-2019-0004 “Оледенение и сопутствующие природные процессы при изменениях климата”. Оценка водозапаса сезонного снежного покрова рассматриваемой тер-

ритории осуществлялась при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60067 Арктика).

Литература

- Атлас** снежно-ледовых ресурсов мира / Под ред. В.М. Котлякова. М., Изд. РАН, 1997, 392 с.
- Большаинов Д.Ю.** Архипелаг Северная Земля. Оледенение, история развития природной среды / Д.Ю. Большаинов, В.М. Макеев. СПб., Гидрометеоздат, 1995, 214 с.
- Большаинов Д.Ю., Соколов В.Т., Ежиков И.С. и др.** Условия питания и изменчивость ледников архипелага Северная Земля по результатам наблюдений 2014–2015 гг. // *Лед и снег*, 2016, т. 56, № 3, с. 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., ГИМИЗ, 1988, с. 70–81.
- Василевич И.И., Чернов Р.А.** К оценке снегозапасов в русловых врезках методом георадиолокации на территории Арктического региона // *Пробл. Арктики и Антарктики*, 2018, № 64 (1), с. 5–15. – <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-5-15>
- Глазовский А.Ф.** Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований / А.Ф. Глазовский, Ю.Я. Мачерет. М., ГЕОС, 2014, 528 с.
- Глазырин Г.Е., Соколов Л.Н.** Возможность прогноза характеристик паводков, вызываемых прорывами ледниковых озер // *Материалы гляциол. исслед.*, 1976, № 26, с. 78–85.
- Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н. и др.** Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер // *Геориск*, 2018, т. XII, № 2, с. 38–46.
- Коновалов В.Г.** Методы расчета и прогноза элементов прорывоопасного озера Мерцбахера // *Материалы гляциол. исслед.*, 1990, № 69, с. 141–147.
- Макштас А.П., Соколов В.Т.** Научно-исследовательский стационар Ледовая база “Мыс Баранова” – летний полевой сезон 2014 г. // *Рос. полярные исслед.*, 2014, № 3 (17), с. 10–12.
- Мачерет Ю.Я., Глазовский А.Ф.** Формирование и развитие дренажных систем в ледниках // *Лед и снег*, 2011, № 3 (115), с. 23–40.
- Попов С.В., Пряхина Г.В., Боронина А.С.** Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоемов // *Криосфера Земли*, 2019, т. XXIII, № 3, с. 25–32.
- Ходаков В.Г.** О зависимости суммарной абляции поверхности ледников от температуры воздуха // *Метеорология и гидрология*, 1965, № 7, с. 48–50.
- Чижов О.П.** Оледенение Новой Земли. Результаты исследований по программе МГГ / О.П. Чижов, В.С. Корякин, Н.В. Давидович и др. М., Наука, 1968, 338 с.
- Björnsson H.** Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation // *Ann. Glaciol.*, 1992, No. 16, p. 95–106.
- Carrivick J.L., Fiona S.T.** A review of glacier outburst floods in Iceland and Greenland with a megafloods perspective // *Earth-Sci. Rev.*, 2019, No. 196, p. 102876.
- Carrivick J.L., Rushmer E.L.** Understanding high-magnitude outburst floods // *Geol. Today*, 2006, No. 22 (2), p. 60–65.
- Clague J.J., Mathews W.H.** The magnitude of jökulhlaups // *J. Glaciol.*, 1973, No. 12 (66), p. 501–504.
- Furuya M., Wahr J.M.** Water level changes at an ice-dammed lake in West Greenland inferred from InSAR data // *Geophys. Res. Lett.*, 2005, No. 32 (14), L14501.

Grinsted A., Hvidberg C.S., Campos N. et al. Periodic outburst floods from an ice-dammed lake in East Greenland // *Scientific Rep.*, 2017, No. 7(9966), p. 1–6, DOI: 10.1038/s41598-017-07960-9.

Ng F., Liu S. Temporal evolution of a jökulhlaup system // *J. Glaciol.*, 2009, No. 55 (192), p. 651–665.

O'Connor J.E., Costa J.E. The world's largest floods, past and present – their causes and magnitudes // *U.S. Geol. Survey Circular*, 2004, No. 1254, p. 1–13.

Porter C., Morin P., Howat I. et al. “ArcticDEM”, Harvard Dataverse, V1, 2018. – <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> (архив данных от 29.08.2018–30.08.2018).

SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR, 2019, iss. 44, 46 p. – https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report

Walder J.S., Costa J.E. Outburst floods from glacier-dammed lakes: the effect of mode of lake drainage on flood magnitude // *Earth Surf. Process. Landf.*, 1996, No. 21 (8), p. 701–723.

URL: <https://www.pgc.umn.edu> (дата обращения: 30.10.2018).

References

Kotlyakov V.M. (Ed.). *Atlas snezhno-ledovykh resursov mira* [World Atlas of Snow and Ice Resources]. Moscow, Izd. RAN, 1997, 392 p. (in Russian).

Bolshiyakov D.U., Makeev V.M. *Arhipelag Severnaya Zemlya* [Severnaya Zemlya archipelago. Glaciation, history of the development of the natural environment]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1995, 214 p. (in Russian).

Bolshiyakov D.U., Sokolov V.T., Yozhikov I.S. et al. The feeding conditions and variability of the glaciers of the Severnaya Zemlya archipelago according to the observations of 2014–2015. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2016, vol. 56, No. 3, p. 358–368 (in Russian).

Bryazgin N.N., Unac R.I. Air temperature and precipitation on the northern earth during periods of ablation and accumulation. *Geograficheskie i glaciologicheskie issledovaniya v polyarnykh stranakh* [Geographical and Glaciological Studies in Polar Countries]. Leningrad, GIMIZ, 1988, p. 70–81 (in Russian).

Vasilevich I.I., Chernov R.A. Estimation of snow reserves in watercourses in the Arctic region. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Arctic and Antarctic Research], 2018, No. 64 (1), p. 5–15 (in Russian).

Glazovsky A.F., Macheret U.Ya. *Voda v lednikakh* [Water in the Glaciers. Methods and Results of Geophysical and Distance Research]. Moscow, GEOS, 2014, 528 p. (in Russian).

Glazirin G.E., Sokolov L.N. The possibility of forecasting flood characteristics caused by breakthroughs of glacial lakes. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy* [Data of Glaciological Studies], 1976, No. 26, p. 78–85 (in Russian).

Kidyayeva V.M., Petrakov D.A., Krilenko I.N. et al. The experience of modeling the breakthrough of Bashkara lakes. *Georisk* [Georisk], 2018, vol. XII, No. 2, p. 38–46 (in Russian).

Kononov V.G. Methods for calculating and predicting the elements of a breakthrough lake Merzbacher. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy* [Data of Glaciological Studies], 1990, No. 69, p. 141–147 (in Russian).

Macshas A.P., Sokolov V.T. Research station – summer field season 2014. *Rossiyskie Polyarnye Issledovaniya* [Russian Polar Research], 2014, No. 3 (17), p. 10–12 (in Russian).

Macheret U.Ya., Glazovsky A.F. Formation and development of drainage systems in glaciers. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2011, No. 3 (115), p. 23–40 (in Russian).

Popov S.V., Pryahina G.V., Boronina A.S. Estimation of water discharge during development of glacial and subglacial outburst floods. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, No. 3, p. 20–26.

Hodakov V.G. The dependence of summer ablation of the surface of glaciers on air temperature. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 1965, No. 7, p. 48–50 (in Russian).

Chizhov O.P., Koryakin V.S., Davidovich N.V. et al. *Oledeneniye Novoi Zemli* [The Glaciation of the New Earth. Research Results under the IGY Program]. Moscow, Nauka, 1968, 338 p. (in Russian).

Björnsson H. Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation. *Ann. Glaciol.*, 1992, No. 16, p. 95–106.

Carrivick J.L., Fiona S.T. A review of glacier outburst floods in Iceland and Greenland with a megafloods perspective. *Earth-Sci. Rev.*, 2019, No. 196, p. 102876.

Carrivick J.L., Rushmer E.L. Understanding high-magnitude outburst floods. *Geol. Today*, 2006, No. 22 (2), p. 60–65.

Clague J.J., Mathews W.H. The magnitude of jökulhlaups. *J. Glaciol.*, 1973, No. 12 (66), p. 501–504.

Furuya M., Wahr J.M. Water level changes at an ice-dammed lake in West Greenland inferred from InSAR data. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, No. 32 (14), L14501.

Grinsted A., Hvidberg C.S., Campos N. et al. Periodic outburst floods from an ice-dammed lake in East Greenland. *Scientific Rep.*, 2017, No. 7 (9966), p. 1–6, DOI: 10.1038/s41598-017-07960-9.

Ng F., Liu S. Temporal evolution of a jökulhlaup system. *J. Glaciol.*, 2009, No. 55 (192), p. 651–665.

O'Connor J.E., Costa J.E. The world's largest floods, past and present – their causes and magnitudes. *U.S. Geol. Survey Circular*, 2004, No. 1254, p. 1–13.

Porter C., Morin P., Howat I. et al. “ArcticDEM”, Harvard Dataverse, V1, 2018. – <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> (Archive of data from 29.08.2018–30.08.2018).

SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR, 2019, iss. 44, 46 p. – https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report

Walder J.S., Costa J.E. Outburst floods from glacier-dammed lakes: the effect of mode of lake drainage on flood magnitude. *Earth Surf. Process. Landf.*, 1996, No. 21 (8), p. 701–723.

URL: <https://www.pgc.umn.edu> (last visited: 30.10.2018).

*Поступила в редакцию 30 декабря 2019 г.,
после доработки – 11 марта 2020 г.,
принята к публикации 4 апреля 2020 г.*