

ПРОРЫВ ЗАВАЛЬНОГО ОЗЕРА МААШЕЙ (СЕВЕРО-ЧУЙСКИЙ ХРЕБЕТ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЛТАЙ)

© 2024 г. В. А. Распутина*, Г. В. Пряхина, Д. А. Ганюшкин, Д. В. Банцев,
С. А. Грига, С. С. Свирипов

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

**e-mail: lerasputina88@gmail.com*

Поступила 25 сентября 2023 г.

После доработки 29 ноября 2023 г.

Принята к печати 2024

Обобщены и уточнены имеющиеся материалы о завальном озере Маашей в Центральном Алтае и его прорыве на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли и полевых исследований. Уточнена батиметрическая схема озера, и проведено математическое моделирование гидрографа прошедшего прорывного паводка на основе методики расчёта его характеристик, описанной в настоящей статье.

Ключевые слова: завальные озёра, прорывы завальных озёр, опасные гидрологические явления, Алтай, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S2076673424020026

ВВЕДЕНИЕ

Завальные озёра, образованные в результате перекрытия русла рек оползнями, обвалами, каменными глетчерами, широко распространены в горных районах (Фоменко и др., 2020). Плотины таких водных объектов неоднородны и слабо устойчивы: они сложены рыхлоломочными материалами, не имеют слоистости, сортировки, а также могут содержать в себе погребённый лёд. Риск их разрушения и последующего прорыва водоёма возрастает вследствие поступления большего объёма воды в озеро, обусловленного выпадением интенсивных осадков или таянием ледника, землетрясением и другими причинами (Стром, 2020). Особенно опасны завальные озёра в перигляциальной зоне, образованные в результате перекрытия каменными глетчерами русла горных рек, имеющих ледниковое питание. Наиболее прорывоопасны такие водоёмы в тёплый период, когда наблюдается максимальная абляция ледника, повышенный приток воды к озёрам, увеличение их размеров и, соответственно, возрастание давления на запрудную плотину, что может привести к её разрушению. Объёмы таких завальных озёр могут достигать нескольких миллионов кубических метров, и в случае их прорывов могут формироваться мощные паводки и селевые потоки, наносящие огромный ущерб территориям, расположенным ниже по течению.

Среди наиболее известных завальных озёр следует назвать Сарезское озеро (Республика Таджикистан), которое образовалось при перекрытии русла реки

Бартанг в 1911 г. (Назришоев и др., 2010), и оз. Аттабад (Пакистан), сформировавшееся при сходе оползня, перекрывшего р. Хунза в 2010 г. (Sökefeld, 2012). На территории России к наиболее известным таким озёрам относится Верхнее Дюльтычайское озеро (хр. Саладаг, Республика Дагестан), образованное в результате смещения оползневого тела, запрудившего долину р. Дюльтычай в 2019 г. (Атаев, 2020). Продолжающаяся деградация оледенения в изменяющихся климатических условиях приводит к интенсивной аккумуляции большого объёма талых вод в завальных водоёмах, что увеличивает вероятность формирования подобных опасных явлений. Пример прорыва завального озера, находящегося в зоне распространения горного оледенения и подпруженного каменным глетчером, показывает оз. Маашей, расположенное на территории Северо-Чуйского хребта (Центральный Алтай, Россия). Прорыв произошёл 15 июля 2012 г. и привёл к разрушению подпрудной перемычки, что сформировало прорывной паводок и сопряжённый с ним селевой поток, уничтоживший два моста (через реки Маашей и Чуя). На примере этого прорыва мы предполагаем установить факторы, которые приводят к прорывам завальных водоёмов, а также выдвинуть гипотезу о наиболее вероятном механизме их прорывов.

Цель работы — на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли, полевых исследований и методов математического моделирования выявить факторы, которые привели к формированию прорыва оз. Маашей.



Рис. 1. Схема выполнения полевых работ: 1 — пункты отбора проб воды на изотопный анализ; 2 — территория, охваченная тахеометрической съёмкой. На заднем плане спутниковый снимок World-view 2 на 5.09.2021 (подложка программы ArcMap 10.4.1 (ESRI Inc., USA))

Fig. 1. Scheme of field work: 1 — water sampling points for isotope analysis; 2 — territory covered by tacheometric survey. In the background is a satellite image of World-view 2 on September 5, 2021 (underlay of the ArcMap 10.4.1 programme (ESRI Inc., USA))

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Озеро Маашей располагалось в верховьях р. Маашей (левый приток р. Чуи) на территории Северо-Чуйского хребта, на высоте 1984 м над ур. моря. Оно образовалось при перекрытии стока р. Маашей

каменным глетчером с западной части долины (рис. 1) и обвалом рыхлообломочного материала с её восточной части. Поэтому подпруживающая озеро плотина имела сложную неоднородную структуру и состояла из конечной морены ледника Большой Маашей, конуса выноса с восточного борта долины и каменного глетчера с западного борта (Быков, 2013). Существует много исследований, посвящённых периоду образования озера: согласно М. В. Тронову (Тронов, 1949) в конце XIX в. озера не было; Н. Н. Михайлов (1994) пишет, что водоёму около 100 лет, а по результатам исследований процессов осадконакопления в работе (Бородавко, 1998) установлено, что возраст озера около 200 лет. Наиболее достоверны результаты дендрохронологических исследований образцов погибших деревьев, стоящих в воде, согласно которым озеро сформировалось в первой половине XVIII в. (Быков, 2013). Площадь водосбора озера в июле 2022 г. составляла 96.1 км². На водосборе оз. Маашей расположено 27 ледников суммарной площадью 27 км² (оледенённость составляет 28%) в диапазоне высот от 4100 до 2280 м над ур. моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дистанционные методы. Для оценки изменения площади оз. Маашей за последние 60 лет были дешифрированы одновременные снимки: космоснимок Corona и спутниковые снимки Landsat (таблица, <https://earthexplorer.usgs.gov/>), а также использовались данные, полученные в ходе экспедиционных работ в сентябре 2022 г. Площадь озера определялась в программе ArcMap 10.4.1 (ESRI Inc., USA) путём визуального ручного дешифрирования. Для дешифрирования использовали комбинацию каналов «естественные цвета» (для всех спутниковых снимков). Пространственное разрешение спутниковых снимков Landsat-7 улучшалось при их объединении с панхроматическими снимками. Систематическая ошибка определения площадей

Таблица. Характеристики спутниковых снимков

Дата	Спутник	Пространственное разрешение снимка, м	ID снимка
28.06.1962	Corona	1.8	DS009038052DF039
08.08.1980	Landsat 3	30	LM03_L1TP_155025_19800808_20200905_02_T2
17.08.1989	Landsat 5	30	LM05_L1TP_144025_19890817_20200829_02_T2
12.08.1993	Landsat 5	30	LT05_L2SP_144025_19930812_20200913_02_T1
22.07.2000	Landsat 7	15	EPP144R025_7F20000722
18.08.2004	Landsat 7	15	LE07_L1TP_144025_20040818_20170119_01_T1
13.08.2011	Landsat 7	15	LE07_L1TP_145025_20110813_20200909_02_T1

составляла ± 1 пиксель. Ошибка вычислялась по формуле

$$A_{er} = 100\%(nm) / A_{lake}, \quad (1)$$

где A_{er} — ошибка, %; n — число пикселей по периметру озера; m — пространственное разрешение снимка, выраженное в виде площади пикселя, m^2 ; A_{lake} — площадь озера, m^2 . По результатам расчётов ошибка для Landsat-7 составила 14%, а для Landsat-3 и 5 — 29% соответственно.

Полевые исследования. В рамках комплексной экспедиции Санкт-Петербургского государственного университета в сентябре 2022 г. для восстановления гидроморфометрических характеристик водоёма, предшествовавших прорыву (уровень воды, объём водной массы и глубины), была выполнена тахеометрическая съёмка котловины оз. Маашей с использованием тахеометра Trimble M3 DR5" (Trimble Navigation Ltd., USA). Тахеометрическая съёмка рельефа выполнялась до границы уровня высоких вод, который предшествовал прорыву (рис. 2).

Полученные данные обрабатывались с использованием специального программного обеспечения (Попов, Боронина, 2019). Батиметрическая схема озера построена в картографической программе Surfer 23.3.202 (Golden Software Inc., USA) путём формирования грида, методом интерполяции Kriging, так как этот метод давал наименьшую невязку между точками. Объёмы воды рассчитывались по полученному распределению глубин.

В сентябре 2022 г. во время полевых работ в районе бывшего оз. Маашей были отобраны четыре пробы воды из р. Маашей с целью определения доли талых ледниковых вод в питании реки для исследуемой части бассейна. Пробы речной воды отбирали в месте прорыва оз. Маашей, так как на этом участке река не разделялась на рукава, и у края ледника Маашей.

Вклад компонентов в сток оценивался с помощью уравнения изотопного баланса, которое в общем виде имеет вид:

$$R^{18}O_1f_1 + R^{18}O_2f_2 = R^{18}O, \quad (2)$$

где $R^{18}O_1$ — изотопный состав первого компонента; f_1 — доля первого компонента; $R^{18}O_2$ — изотопный состав второго компонента; f_2 — доля второго компонента; $R^{18}O$ — результирующий изотопный состав (Чижова и др., 2016).

Для выделения доли ледниковой составляющей в стоке р. Маашей, помимо значения $\delta^{18}O$ талых ледниковых вод (-17.29‰), необходимо знать величину $\delta^{18}O$ неледниковых вод. Из-за недостатка данных об изотопном составе грунтовых вод в данном районе было использовано допущение, что изотопный состав подземных вод в период 24–25 сентября приблизительно равен среднему изотопному составу атмосферных осадков за сентябрь, среднее значение $\delta^{18}O$ которых определяли с помощью онлайн-калькулятора OIPC, связанного с порталом IsoMAP — Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction (<https://wateriso.utah.edu/waterisotopes/index.html>) и позволяющего с помощью ввода географических координат рассчитывать средние значения изотопного состава осадков по месяцам для различных территорий, так как в период проведения полевых исследований осадки не выпадали.

Математическое моделирование. На основе детальных полевых исследований была выдвинута гипотеза о том, что прорыв оз. Маашей произошёл при размыве фильтрационного канала — ведь формирование фильтрационного канала в теле подпруживающей водоём плотины часто служит триггерным механизмом прорыва моренных дамб (Chang, Zhang, 2010; Westoby et al., 2014; Chen et al., 2019; Neupane et al., 2019). Воздействие внешнего триггера в виде продолжительных интенсивных осадков в течение



Рис. 2. Уровни высоких вод озера: отсутствие растительности (а) и окраска валунов (б). Фото В. А. Распутиной, сентябрь 2022 г.
Fig. 2. High-water elevation of Lake Maashei: lack of vegetation (a) and color of boulders (b). Photos by Rasputina V. A., September 2022

трёх суток привело к подъёму уровня воды в озере и обводнению подпруживающей перемычки, её ослаблению, размыву и последующему прорыву озера. Мы предположили, что прорыв был инициирован интенсивным оттоком воды через фильтрационный канал с последующим обрушением грунта над каналом — при достижении диаметра критической величины равной 1/5 от напора воды (Протодьяконов, 1931), проседанием, переливом через гребень и полным разрушением дамбы.

Приращение диаметра фильтрационного канала рассчитывается по формуле (3) (Westoby et al., 2014; Okeke et al., 2016; Chen et al., 2019; Zhang et al., 2021):

$$\Delta l(t) = E(t) = K[\tau(t) - \tau_c], \quad (3)$$

где $\Delta l(t)$ — приращение канала, соответствующее скорости эрозии $E(t)$; K — коэффициент эрозии, определяется соотношением, приведённым в (Temple, Hanson, 1994); $\tau(t)$ — напряжение сдвига, инициируемое водным потоком; τ_c — критическое сдвиговое напряжение, которое рассчитывается по формулам, приведённым в (Temple, Hanson, 1994). Сдвиговое напряжение $\tau(t)$ зависит от скорости потока воды и определяется как:

$$\tau(t) = \gamma_w R(t) S(t), \quad (4)$$

где γ_w — удельный вес воды; R — гидравлический радиус; $S(t)$ — энергетический уклон, выражение для которого имеет следующий вид $S(t) = \frac{v^2 n^2 [R(t)]^{-4/3}}{h_f(t)}$, здесь v — средняя скорость потока воды, рассчитываемая по формуле $v_f(t) = \sqrt{\frac{2g(z_w(t) - z_{rip})}{h_f(t)}}$, где g — ускорение свободного падения; $z_w(t)$ — отметка поверхности воды потока; z_{rip} — отметка центра канала; $h_f(t)$ — потери напора по длине и применяющаяся в расчётах скорости потока в канале (Westoby et al., 2014; Chen et al., 2019); n — коэффициент Стиклера, зависящий от крупности частиц грунта, характеризуется значениями в интервале от 0.01 до 0.05 и определяется соотношением $n = \left(\frac{0.15}{\sqrt{g}}\right) k^{1/6}$ (k — крупность частиц грунта).

Для определения критического сдвигового напряжения воспользуемся формулой, предложенной в (Chang, Zhang, 2010):

$$\tau_{кр} = 6.8(\xi)^{1.68} \kappa^{-1.73} \zeta^{-0.97}, \quad (5)$$

ξ — индекс пластичности грунта, % (характеристика, отражающая способность грунта удерживать воду, для супесей изменяется в пределах 1–7%, для суглинков 7–17%, для глин больше 17%), из которого сложена плотина, ζ — пористость грунта.

Расход воды через фильтрационный канал рассчитывается по соотношению:

$$Q_f(t) = \omega_f(t) v_f(t), \quad (6)$$

где $\omega_f(t)$ — площадь фильтрационного канала, определяемая как площадь круга, так как канал имеет круглую форму.

После обрушения грунта над фильтрационным каналом поток воды концентрируется в месте формирования прорана. Разрушение перемычки и развитие прорана происходят сверху вниз неравномерно из-за неравномерного распределения скоростей потока по глубине. Приращение линейных размеров прорана зависит от скорости эрозии и рассчитывается по формуле (3). Поскольку в турбулентном потоке наиболее значительный градиент скорости имеет место в придонном слое (Быков, Васильев, 1977), скорость эрозии рассчитываем для средней (7) и донной (8) скоростей потока.

$$v = \sqrt{2g[z_w(t) - z_B(t)]}, \quad (7)$$

где $z_w(t)$ — функция, описывающая зависимость отметки воды водоёма от его объёма $F(V(t))$, $z_B(t)$ — отметка дна прорана;

$$v_B = v \sqrt{1 - \frac{z}{R(t)} \left(0.57 + \frac{3.3}{C(t)}\right)}, \quad (8)$$

в котором z — глубина погружения точки; $C(t)$ — коэффициент Шези; $R(t)$ — гидравлический радиус потока (Быков, Васильев, 1977). Приращение линейных размеров прорана, которые вызваны донной эрозией $\Delta l_B(t)$, меньше, чем у его боковых частей $\Delta l(t)$, так как придонная скорость ниже среднего значения скорости, которое используется для расчёта $\Delta l(t)$. Поэтому форма прорана аппроксимируется трапецией.

Расчёт расхода воды через проран Q_B при переливе выполняется по уравнению водослива с широким порогом (9), так как течение воды через проран близко к течению воды через водослив с широким порогом. Подобный подход широко используется при расчётах расходов воды при прорыве грунтовых плотин (Osti, Egashira, 2009; Chang, Zhang, 2010; Zhong et al., 2018):

$$Q_B = \mu \omega(t) \sqrt{2g[z_w(t) - z_B(t)]}, \quad (9)$$

где $\omega(t)$ — площадь поперечного сечения прорана, определяется как $\omega(t) = \frac{D_T(t) + D_B(t)}{2} [z_w(t) - z_B(t)]$. В уравнении для расчёта площади поперечного сечения прорана: $D_T(t)$ — ширина верхней части прорана; $z_B(t)$ — ширина прорана по дну; μ — коэффициент расхода. Подробное математическое описание расчёта характеристик прорывного паводка при переливе воды приведено в (Распутина и др., 2021).

Расчёт многолетнего изменения величины абляции. Для оценки многолетнего изменения абляции на языке

ледника Большой Маашей, который мы используем как косвенный показатель изменения притока талых вод к озеру Маашей, необходимо вычислить среднюю летнюю температуру t_i на соответствующей высоте z_i с помощью вертикального температурного градиента G_t , высоты расположения метеостанции z_m , средней летней температуры на ГМС t_m .

Для расчётов использовались данные по метеостанции Кара-Тюрек (Булыгина и др., 2014), расположенной приблизительно в 82 км к западу от ледника на высоте 2600 м. Вычисление вертикального температурного градиента проводилось по паре метеостанций Аккем — Кара-Тюрек, расстояние между которыми составляет примерно 14 км. В качестве высоты расчёта использовалась высота нижней точки ледника с учётом её смещения по высоте с годами согласно (Ganyushkin et al., 2023).

При переходе на ледник следует учитывать температурный скачок Δt . Согласно (Котляков, 1977) для ледников в интервале площадей от 4 до 10 км² температурный скачок составляет -1.5°C . В итоге получаем:

$$t_i = t_m - G_t(z_i - z_m) - \Delta t. \quad (10)$$

После вычисления t_i определяется абляция. Для этого была использована формула расчёта абляции по уточнённой формуле А. Н. Кренке и В. Г. Ходакова (Барбаш и др., 1982), дополненная региональным экспозиционным коэффициентом K (Галахов, Мухаметов, 1999):

$$Ab = K1,33(t_i + 9.66)^{2.85}. \quad (11)$$

Для ледников северной экспозиции этот коэффициент равен 0.82.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидрологический режим оз. Маашей. Детальный анализ спутниковых снимков Landsat-3, 5, 7 позволил выявить внутригодовую и межгодовую изменчивость величины площади зеркала озера, что косвенно

свидетельствовало об изменении притока воды к водоёму, а следовательно, и о его уровненом режиме. В качестве примера внутригодовой изменчивости приведём восстановленный внутригодовой цикл изменения площади озера за 2011 год по нескольким временным срезам, который показал, что зимой озеро спускалось полностью, а начиная с июня снова происходило заполнение озёрной котловины: в начале июня (3.06.2011) площадь озера составляла 63 тыс. м², в августе (13.08.2011) достигала максимального значения 255 тыс. м², в сентябре (14.09.2011) озеро начало сокращаться, площадь составила 238 тыс. м², достигнув в конце сентября (30.09.2011) 191 тыс. м². В октябре озеро оказалось полностью спущенным. Такой режим уровня воды был подтверждён литературными данными (Быков, 2013; Borodavko, Litvinov, 2013). Существование озера только в тёплый период года свидетельствовало о том, что главным источником питания водоёма были талые ледниковые воды, а полный спуск озера в осенне-зимний период указывал на наличие в теле подпруживающей плотины фильтрационных каналов, по которым происходил сток. Пропускная способность фильтрационных каналов была оценена для периода сокращения площади и объёма озера в осенний период с использованием батиграфической и объёмной кривых озера, полученных по результатам выполненной тахеометрической съёмки, и величины осреднённого измеренного при проведении полевых работ расхода воды р. Маашей, который составил 1.3 м³/с. Расход оттока озёрных вод по фильтрационным каналам изменялся от 1.4 до 1.6 м³/с. Отметим, что величина вклада ледниковых вод в питание р. Маашей на момент проведения полевых работ составляла по уравнению изотопного баланса 80%, что также подтверждает преимущественно ледниковое питание озера.

В многолетнем разрезе площадь озера увеличивалась к концу периода абляции каждого года (рис. 3), что обусловлено большим притоком воды в результате повышенного таяния ледника в условиях нестационарной климатической ситуации (несмотря на то, что водоем спускался в осенне-зимний период,

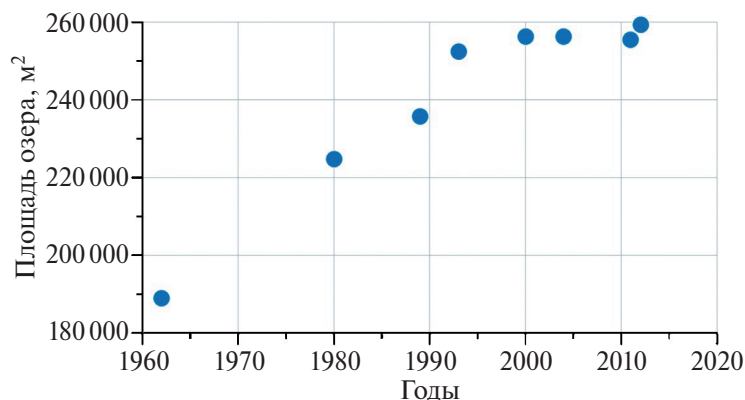


Рис. 3. Изменение площади озера Маашей во времени
Fig. 3. Change in the area of Lake Maashei over time

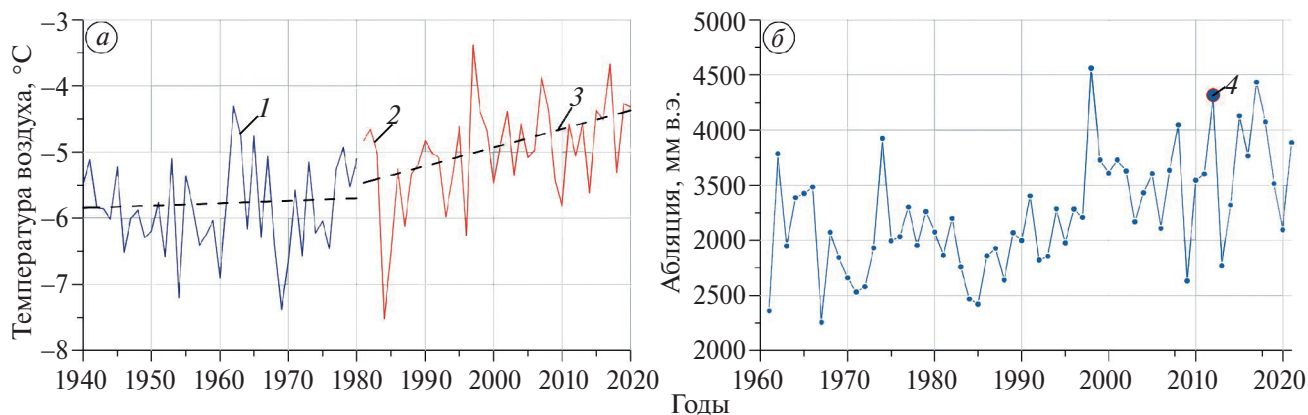


Рис. 4. Ход среднегодовой температуры воздуха по данным метеостанции Кара-Тюрек (а); изменение величины средней абляции на леднике Большой Маашей за летний сезон (б): 1 — ход среднегодовой температуры воздуха до 1980 г.; 2 — ход температуры воздуха после 1980 г.; 3 — тренды температуры воздуха; 4 — величина абляции на леднике Большой Маашей в 2012 г.

Fig. 4. Course of average annual air temperature at the Kara-Turek weather station (a); change in the average ablation value on the Bolshoi Maashei glacier during the summer season (b): 1 — course of average annual air temperature before 1980; 2 — course of average annual air temperature after 1980; 3 — air temperature trends; 4 — the ablation value on the Bolshoi Maashei glacier in 2012

на следующий год в течение теплого периода заново происходило заполнение озёрной котловины тальми ледниковыми водами, причём объём озера с течением времени становился больше). Последнее подтверждается выявленными статистически значимыми положительными трендами среднегодовой (рис. 4, а) и среднемесячной температуры воздуха в период абляции (июнь — август) после 1980 г. (Распутина и др., 2022) по данным метеостанции Кара-Тюрек, которая ближе всего расположена к исследуемой территории.

Наиболее интенсивно размеры озера возрастали с конца 1980-х до начала 2000-х годов и в начале 2010-х годов. Именно в этот период (в конце 1980-х годов) увеличились темпы отступления ледника Большой Маашей: с 3.2 ± 1 м/год (с 1962 по 1989 г.) до 7.1 ± 2.0 м/год (с 1989 по 2010 г.); начиная с 2010 г. темпы отступления возросли вдвое до 14.0 ± 2.0 м/год (Ganyushkin et al., 2023). Ускорение отступления ледника — это следствие в первую очередь ускорения его таяния в сезоны абляции. Последнее подтверждается нашими расчётами (рис. 4, б), согласно которым с середины 1980-х годов имел место отчётливый тренд к росту величины таяния. 2012 год, когда произошёл прорыв озера, входит в тройку лет с самым большим таянием за весь период с начала 1960-х годов по настоящее время. Согласно нашим расчётам, величина таяния за летний сезон в 2012 г. составила 4317 мм в водном эквиваленте.

График на рис. 4, б отражает ускорение таяния ледника, что, в свою очередь, привело к более интенсивному росту площади озера и, соответственно, увеличению его водной массы.

Морфометрические характеристики озёрной котловины. На основе выполненной тахеометрической съёмки была восстановлена батиметрическая схема оз. Маашей до прорыва и получены его

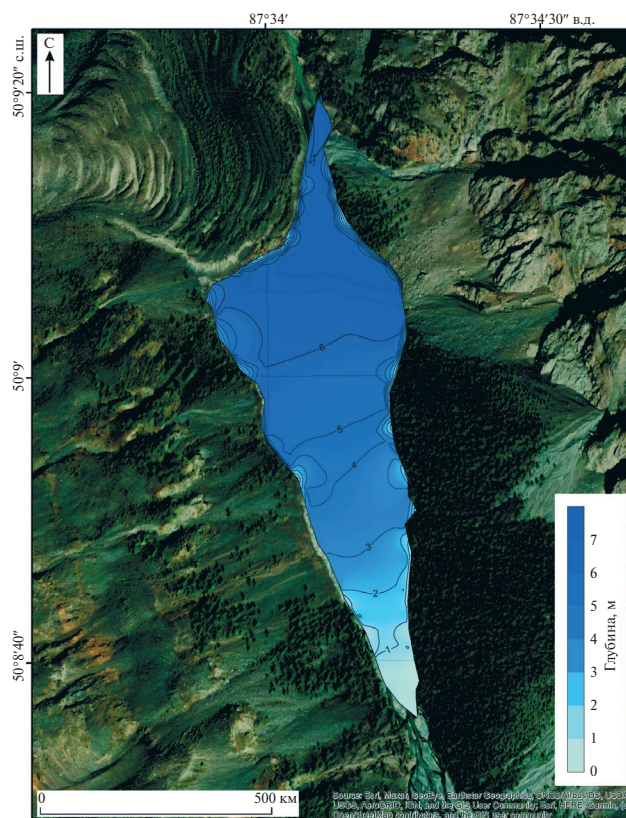


Рис. 5. Батиметрическая схема озера Маашей до его прорыва, выполненная по результатам тахеометрической съёмки котловины озера, которая проводилась 23–25 сентября 2022 г. Изобаты проведены через 1 м

Fig. 5. Bathymetric map of Lake Maashei before its outburst made based on the results of a tacheometric survey of the lake basin, which was carried out on 23–25 September 2022. Water depth contours have an interval of 1 m

морфометрические характеристики (рис. 5). Отметим, что горизонт высоких вод был отчётливо виден на бортах котловины: по отсутствию растительности (рис. 2, а) и окраске камней (рис. 2, б) в местах, которые ранее были под водой.

Длина и ширина озера составляли 1480 и 423 м соответственно, максимальная глубина по результатам съёмки оказалась равной 7.5 м, а средняя — 4.7 м, что на 1.2 м больше, чем по опубликованным данным (История озёр..., 1995; Бородавко, 1998). Площадь оз. Маашей до его катастрофического спуска составляла 259 тыс. м² при соответствующем объёме водной массы 1.21 млн м³. Поскольку озеро при прорыве спустилось полностью, весь объём воды сформировал прорывной паводок и сопряжённый с ним селевый поток.

Выполненная тахеометрическая съёмка позволила также установить форму и оценить морфометрические характеристики образовавшегося прорана в теле подпруживающей озеро плотины в результате прорыва: высота — 10 м, ширина по дну и гребню — 7 и 69 м соответственно. Площадь прорана оказалась равной 415 м².

Моделирование гидрографа прорыва оз. Маашей.

В качестве начальных условий для моделирования задавались: объём водоёма, предшествующий прорыву — 1.21 млн м³ (получен при выполнении полевых работ авторами в конце сентября 2022 г.), удельный вес грунта — 2740 кг/м³, доля содержания глины в грунте — 15%, индекс пластичности — 13. Характеристики материала плотины соответствуют средним значениям удельного веса, процентного содержания глины и индексу пластичности для моренных материалов согласно (Westoby et al., 2014, 2015; Zheng et al., 2021) и для моренных материалов, отобранных авторами на других горных массивах Алтая. Расчётный шаг по времени был равен 1 секунде. Смоделированный гидрограф прорывного паводка приведён на рис. 6.

Согласно полученным результатам расчёта сброс воды через фильтрационный канал происходил около 3 часов, после чего начался перелив и сформировалась волна прорывного паводка, максимальный расход воды которой составил 694 м³/с. Средние скорости течения воды при прорыве изменялись от 0.2 м/с в начале прорыва и достигали 5–7 м/с на пике прорывного паводка. Продолжительность прорывного паводка по результатам расчёта составила около 5.5 часов. Проран образовался на всю высоту плотины (10 м). Его рассчитанные морфометрические характеристики таковы: средняя ширина — 47.5 м (по измеренным данным — 41.5 м), площадь — 476 м² (по измеренным данным — 415 м²). Расхождение между смоделированными и измеренными значениями ширины и площади поперечного сечения прорана составило около 15%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Перечислим факторы, которые привели к прорыву оз. Маашей: в результате повышенного притока воды к озеру, обусловленного более интенсивным таянием ледника в результате потепления климата, в многолетнем разрезе водоём увеличивался в размерах, что могло ослабить запрудную плотину; дополнительное воздействие внешнего триггера в виде продолжительных осадков привело к обводнению подпруживающей перемычки, её размыву и последующему прорыву. По данным метеостанции Кара-Тюрек, которая находится в 82 км к западу от объекта исследования, суточное количество осадков в период прорыва озера было таким: 13 июля — 19.8 мм, 14 июля — 13.6 мм, 15 июля — 34 мм (Бульгина и др., 2014). При этом в последний день (15 июля 2012 г.) 34 мм осадков выпало в течение 12 часов, что относится к категории опасных метеорологических явлений для селеопасных горных районов, согласно перечню опасных явлений Западно-Сибирского

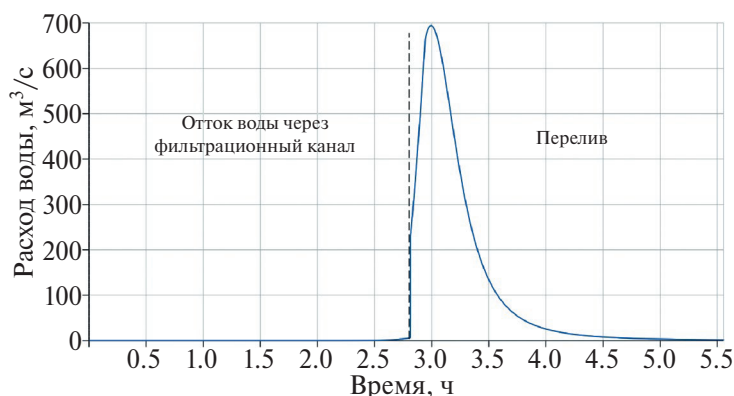


Рис. 6. Смоделированный гидрограф прорывного паводка, образовавшегося в результате прорыва озера Маашей. Пунктирная линия разделяет отток воды по фильтрационному каналу и перелив воды после обрушения грунта над каналом

Fig. 6. Simulated hydrograph of the outburst flood resulting from Lake Maashei outburst. The dotted line separates the water outflow through the filtration channel and the overflow of water after the collapse of the soil above the channel

УГМС (<http://www.meteo-nso.ru/pages/115>). Из-за горного рельефа и удалённости метеостанции от котловины оз. Маашей невозможно точно определить, какое количество осадков выпало в рассматриваемой долине реки, однако авторы предполагают, что сумма выпавших осадков была близка по величине к категории опасного метеорологического явления.

В рамках обсуждения отметим, что согласно опубликованным работам (Bogodavko et al., 2013) после прорыва оз. Маашей было выполнено математическое моделирование движения волны прорывного паводка по долине р. Маашей с использованием программного комплекса HEC-RAS. Начальный гидрограф прорыва в этом случае рассчитывался по эмпирическим формулам (Costa, 1988; Cenderelli, 2000), согласно которым максимальный расход воды прорывного паводка в створе плотины составил $800 \text{ м}^3/\text{с}$. В случае такого подхода схематизация гидрографа не совсем корректна, поскольку не учитываются морфометрические характеристики водоёма и характеристики грунта, из которого была сложена подпруживающая перемычка, от которых зависит величина максимального расхода воды прорывного паводка и его продолжительность. При использовании эмпирических формул не проводился также расчёт развития прорана, хотя размеры образовавшегося прорана — зачастую единственная проверочная информация для оценки качества моделирования, поскольку отсутствует возможность сравнения смоделированных максимальных расходов с наблюдаемыми значениями.

Качество моделирования характеристик прорывного паводка по предложенной в статье методике оценивалось по результатам сравнения рассчитанных по методике и измеренных размеров прорана, поскольку эти данные служат единственной проверочной информацией. Сравнение показало, что расхождение расчётных и измеренных размеров не превышает 15%. Поскольку морфометрические характеристики прорана были получены спустя 10 лет после прорыва озера, то, учитывая тот факт, что борта прорана сложены рыхлообломочным материалом, размеры прорана за прошедший период времени могли измениться, и это может служить объяснением расхождения между наблюдаемой и рассчитанной шириной прорана. Поэтому, по нашему мнению, с учётом возможного изменения размеров прорана результат моделирования кажется удовлетворительным, а рассчитанные величины скоростей потока представляются правдоподобными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Время существования оз. Маашей от его образования вследствие перекрытия стока р. Маашей каменным глетчером до катастрофического спуска оценивается по разным данным в 200—300 лет. На основе анализа данных дистанционного

зондирования Земли, полевых материалов и математического моделирования были рассмотрены факторы, которые привели к прорыву озера. Причиной разрушения запрудной плотины стало её ослабление вследствие роста объёма озера ввиду повышенного притока талых вод к водоёму (в год, когда произошёл прорыв озера, величина абляции ледника Большой Маашей была одной из самых максимальных за период с начала 1960-х годов по настоящее время). Воздействие внешнего триггера в виде интенсивных и продолжительных дождей (сумма осадков составила 67.4 мм) привело к сильному обводнению плотины, её размыву и прорыву, вследствие чего сформировался прорывной паводок. На основе проведения полевых исследований была выдвинута гипотеза о том, что механизмом прорыва озера стало образование фильтрационного канала в теле запрудной плотины. Для этого сценария развития событий выполнено математическое моделирование прорыва озера: оценены максимальный расход прорывного паводка, скорости потока и продолжительность прорыва (максимальный расход составил $694 \text{ м}^3/\text{с}$, скорости потока изменялись от 0.2 до 5—7 м/с, период прохождения прорывного паводка составил около 5.5 часов). Качество моделирования оценивалось по результатам сравнения рассчитанных и измеренных размеров прорана. Сравнение показало, что расхождение не превышает 15%.

В настоящее время запрудной плотины, которая могла бы перекрыть сток р. Маашей, не существует. Однако борта долины реки в месте образовавшегося при прорыве прорана сложены рыхлым мелкообломочным материалом. Не исключено, что может произойти обвал грунта, который перекроет речной поток и сформирует условия для повторного заполнения котловины озера. Вероятность нового перекрытия русла в результате движения самого ледника и образования запрудной плотины также весьма высока. В обоих случаях нельзя исключить вероятность риска повторного прорыва водоёма. Кроме того, в настоящее время в 14 км к югу от котловины оз. Маашей в долине р. Правый Карагем расположено завальное озеро, подпруженное каменным глетчером. Сейчас из этого озера наблюдается поверхностный сток, однако при движении каменного глетчера может произойти перекрытие русла ручья, что увеличит риск прорыва озера.

Для завальных озёр, перекрытых высокими слабоустойчивыми плотинами или каменными глетчерами, гребень которых выше, чем поверхность зеркала водоёма, наиболее вероятным сценарием прорыва служит развитие фильтрационного канала в наиболее слабом месте подпруживающей плотины. Результаты настоящего исследования вносят теоретический вклад в понимание процесса формирования процесса прорывов озёр, подпруженных каменными глетчерами, а также имеют практическую значимость при оценке опасных

гидрологических явлений: возможно использование физически обоснованной математической модели, описанной в настоящем исследовании, для оценки характеристик возможных прорывов завальных озёр. Расчётный гидрограф прорывного паводка может быть использован в качестве начальных условий в моделях расчёта движения как волны прорыва, так и селевого потока.

Благодарности. Авторы благодарят Е. С. Деркач и Ю. А. Горбунову за помощь в проведении полевых работ. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-67-00020 «Изменения климата, ледников и ландшафтов Алтая в прошлом, настоящем и будущем как основа модели адаптации населения внутриматериковых горных районов Евразии к климатообусловленным изменениям среды».

Acknowledgements. The authors thank E. S. Derkach and Yu. A. Gorbunova for assistance in conducting field work. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-67-00020 «Changes in climate, glaciers and landscapes of Altai in the past, present and future as the basis for a model of adaptation of the population of inland mountainous regions of Eurasia to climate-induced environmental changes».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атаев З. В.* Верхнее Дюльтычайское озеро — самое крупное озеро в высокогорном Дагестане // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 1 (43). С. 6–8.
- Барбаш В. Р., Бочарова Н. Г., Давидович Н. В., Кренке А. Н.* Расчёты некоторых характеристик таяния и его тепловых ресурсов с помощью ЭВМ // Материалы гляциол. исследований. 1982. № 43. С. 114–119.
- Бородавко П. С.* Исследование процессов осадконакопления в приледниковых озерах // Актуальные вопросы геологии и географии Сибири: материалы научной конференции. Томск, 1998. Т. 4. Томск: Томский гос. ун-т, 1998. С. 20–22.
- Булыгина О. Н., Веселов В. М., Разуваев В. Н., Александрова Т. М.* «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549. Основные метеорологические параметры (срочные данные) // Электронный ресурс. <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (Дата обращения: 21.09.2023).
- Быков Н. И.* Маашейское озеро: рождение, жизнь и смерть // География и природопользование Сибири. 2013. № 16. С. 22–30.
- Быков В. Д., Васильев А. В.* Гидрометрия. Издание четвертое, переработанное и дополненное. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 444 с.
- Галахов В. П., Мухаметов Р. М.* Ледники Алтая. Новосибирск: Наука, 1999. 136 с.
- Ерохин С. А., Загинаев В. В.* Прорывоопасность завально-оползневых озёр Тянь-Шаня. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Тр. 6-й Международ. конф. Душанбе–Хорог, Таджикистан, 2020. Т. 1. Душанбе: ООО «Промоушн», 2020. С. 183–193.
- История озёр Севера Азии (Серия: История озёр). СПб.: Наука, 1995. 288 с.
- Котляков В. М.* Программа и методические указания по составлению Атласа снежно-ледовых ресурсов мира // Материалы гляциол. исследований. 1977. № 29. С. 53–144.
- Михайлов Н. Н.* Озёра Алтая, их происхождение и история // География и природопользование Сибири. 1994. Вып. 1. С. 75–89.
- Назришоев Х. А., Ярг Л. А., Винниченко С. М.* Сарезское озеро и основные проблемы высокогорных завальных озёр // Инженерная геология. 2010. № 2. С. 42–49.
- Попов С. В., Боронина А. С.* Программное обеспечение для обработки данных тахеометрической съёмки // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование. Сб. материалов III Всерос. науч.-практич. конф. 6–8 ноября 2019 г. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2019. С. 258–263.
- Протождяконов М. М.* Давление горных пород и рудничное крепление. Гос. изд-во РСФСР, 1931. 65 с.
- Распутина В. А., Пряхина Г. В., Ганюшкин Д. А., Банцев Д. В., Панютин Н. А.* Особенности уровня режима приледниковых моренно-подпрудных озёр в стадии роста (на примере озёр горного массива Таван-Богдо-Ола, Юго-Восточный Алтай) // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 3. С. 441–454.
- Распутина В. А., Пряхина Г. В., Попов С. В.* Опыт моделирования гидрографа прорывного паводка при разрушении грунтовых плотин в результате перелива // Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 194–205.
- Стром А. Л.* Завальные плотины и катастрофические прорывные паводки в долинах рек Памира. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Тр. 6-й Международ. конф. (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Т. 1. Душанбе: ООО «Промоушн», 2020. С. 111–121.
- Тронов М. В.* Очерки оледенения Алтая. М.: Географгиз, 1949. 375 с.
- Фоменко И. К., Стром А. Л., Зеркаль О. В., Сироткина О. Н., Барыкина О. С.* Крупномасштабные оползни в скальных массивах: проблематика и перспективные направления исследований // 5-я Международ. науч.-практич. конф. «Инновации в геологии, геофизике и географии-2020». Севастополь, 2020. С. 153–155.
- Чижова Ю. Н., Рец Е. П., Васильчук Ю. К., Токарев И. В., Буданцева Н. А., Киреева М. Б.* Два подхода к расчёту расчленения гидрографа стока реки с ледниковым

- питанием с помощью изотопных методов // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 2. С. 161–168.
- Borodavko P. S., Litvinov A. S.* Russian Altai Mountains: Lake Maashey and Lake Sofiyskoe. In book: Borodavko P. S., Glazirin G. E., Herget J., Severskiy I. V. Hazard assessment and outburst flood estimation of naturally dammed lakes in Central Asia. Aachen: Shaker Verlag. 2013. P. 35–43.
- Bowen G. J.* The Online Isotopes in Precipitation Calculator, version X.X. // Электронный ресурс. <http://www.waterisotopes.org> (Дата обращения: 21.09.2023).
- Cenderelli D. A.* Floods from natural and artificial dam failures. In book: Inland Flood Hazards. Wohl E. E. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. P. 73–103.
- Chang D. S., Zhang L. M.* Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth // Nature Hazards Earth Syst. Sci. 2010. V. 10. P. 933–946.
- Chen S., Zhong Q., Shen G.* Numerical modeling of earthen dam breach due to piping failure // Water Science and Engineering. 2019. V. 12. No. 3. P. 169–178.
- Costa J. E.* Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of waterflows, hyperconcentrated flows and debris flows. In book: Baker V. R., Kochel R. C., Patton P. C. (Eds.), Flood Geomorphology. New York, 1988. P. 113–122.
- Ganyushkin D., Bantcev D., Derkach E., Agatova A., Nepop R., Griga S., Rasputina V., Ostanin O., Dyakova G., Pryakhina G., Chistyakov K., Kurochkin Y., Gorbunova Y.* Post-Little-Ice Age Glacier Recession in the North-Chuya Ridge and Dynamics of the Bolshoi Maashei Glacier, Altai // Remote Sensing. 2023. V. 15 (8). 2186 p.
- Neupane R., Chen H., Cao C.* Review of moraine dam failure mechanism // Geomatics, natural hazards and risk. 2019. V. 10. No 1. P. 1948–1966.
- Okeke A. C.-U., Wang F.* Hydromechanical constraints on piping failure of landslide dams: an experimental investigation // Geoenvironmental Disasters. 2016. V. 3. № 1. P. 1–17.
- Osti R., Egashira S.* Hydrodynamic characteristics of the Tam Pokhari Glacial Lake outburst flood in the Mt. Everest region, Nepal // Hydrological Processes. 2009. V. 23. P. 2943–2955.
- Sökefeld M.* The Attabad-Landslide and the Politics of Disaster in Gojal, Gilgit-Baltistan. In: Luig, U. (Hrsg.): Negotiating Disasters: Politics, Representation, Meanings. Frankfurt: Peter Lang, 2012. P. 175–204.
- Temple D. M., Hanson G. J.* Headcut development in vegetated earth spillways // Appl. Eng. Agric. 1994. V. 10 (5). P. 677–682.
- Westoby M. J., Brasington J., Glasser N. F., Hambrey M. J., Reynolds J. M., Hassan M. A., Lowe A.* Numerical modelling of glacial lake outburst floods using physically based dam-breach models // Earth Surface Dynamics. 2015. V. 3. P. 171–199.
- Westoby M. J., Glasser N. Fr., Brasington J., Hambrey M. J., Quincey D. J., Reynolds J. M.* Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes // Earth-Science Reviews. 2014. V. 134. P. 137–159.
- Zhang T., Wang W., Gao T., An B.* Simulation and Assessment of Future Glacial Lake Outburst Floods in the Poiqu River Basin, Central Himalayas // Water. 2021. V. 13 (1376). P. 1–18.
- Zheng G., Mergili M., Emmer A., Allen S., Bao A., Guo H., Stoffel M.* The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwucuo, Tibet: causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment // The Cryosphere. 2021. V. 15. P. 3159–3180.
- Zhong Q., Chen S., Deng Z.* A simplified physically based breach model for a high concrete-faced rockfill dam: a case study // Water Science and Engineering. 2018. V. 11. Is. 1. P. 46–52.
- WaterIsotopes.org // Электронный ресурс. <https://waterisotopes.utah.edu/waterisotopes/index.html> (Дата обращения: 22.09.2023).
- Западно-Сибирское УГМС / Перечень опасных явлений // Электронный ресурс. <http://www.meteo-nso.ru/pages/115/> (Дата обращения: 22.09.2023).
- EarthExplorer // Электронный ресурс. <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Дата обращения: 03.11.2023).

Citation: Rasputina V.A., Pryakhina G.V., Ganyushkin D.A., Bantcev D.V., Griga S.A., Svirepov S.S. The outburst of dammed lake Maashey (North-Chuya ridge, Central Altai). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (1): 189–201. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424020026

The outburst of dammed lake Maashey (North-Chuya ridge, Central Altai)

V. A. Rasputina*, G. V. Pryakhina, D. A. Ganyushkin, D. V. Bantcev, S. A. Griga, S. S. Svirepov

Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*e-mail: lerasputina88@gmail.com

Received September 25, 2023 / Revised November 29, 2023 / Accepted 2024

The dammed lakes are widespread in mountainous areas and usually occur when river flow is blocked by landslides, rock glaciers, etc. Among such lakes, the most dangerous are those located in the periglacial zone and blocked by rock glaciers. Continued deglaciation of mountainous areas under changing climate conditions contributes to accumulation of large volumes of melt water in lakes, which may increase pressure on the dam, cause its failure and subsequent outburst flood. In this article we describe the development of such a lake before its outburst and the process of its outburst. The object of study was Maashey Lake (North Chuya Ridge, Central Altai) located in the zone of mountain glaciation and dammed by a rock glacier, where the lake outburst occurred in July 2012. The lake area before the outburst was $259 \times 10^3 \text{ m}^2$ and water volume $1.21 \times 10^6 \text{ m}^3$. As a result of the outburst, the lake was completely drained. We analyzed the published works on Lake Maashey, materials of our own field studies in the lake basin combined with remote sensing data. We hypothesized that the mechanism of the outburst occurred in 2012 was caused by the water erosion of the filtration channel in the dam body. The mechanism of this outburst was numerically simulated using the method presented in this article. The modeling allowed to reproduce the outburst flood hydrograph, to estimate such characteristics as maximum water discharge, volume of the outburst flood, water flow velocities and the size of the formed breach. Estimated maximum discharge was $694 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, flow velocities varied from 0.2 to $5\text{--}7 \text{ m s}^{-1}$, and the outburst flood period was about 5.5 hours. The breach was formed to the full height of the dam (10 m). Its calculated morphometric characteristics were as follows: average width 47.5 m (measured 41.5 m), cross-section area 476 m^2 (measured 415 m^2). The discrepancy between the modeled and measured values was about 15%.

Keywords: landslide lakes, outbursts of landslide lakes, dangerous hydrological phenomena, the Altai Mountains, mathematical modelling

REFERENCES

- Atayev Z. V. Upper Dultychay lake – the largest lake in high-mountain Dagestan. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. Monitoring. Science and technologies. 2020, 1 (43): 6–8. [In Russian].
- Barbash V. R., Bocharova N. G., Davidovich N. E., Krenke A. N. Calculations of some characteristics of melting and its heat resources by means of a computer. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1982, 43: 114–119. [In Russian].
- Borodavko P. S. Study of sedimentation processes in periglacial lakes. *Aktualnye voprosy geologii i geografii Sibiri: materialy nauchnoj konferencii*. Current issues of geology and geography of Siberia: materials of a scientific conference, Tomsk, 1998. Vol. 4. Tomsk: Tomsk State University. 1998: 20–22. [In Russian].
- Bulygina O. N., Veselov V. M., Razuvaev V. N., Aleksandrova T. M. «Description of an array of urgent data on the main meteorological parameters at Russian stations». Certificate of state registration of the database No. 2014620549. Basic meteorological parameters (urgent data). Retrieved from: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (Last access: 21 September 2023).
- Bykov N. I. Lake Maashey: birth, life and death. *Geografiya i prirodopolzovanie Sibiri*. Geography and environmental management of Siberia. 2013, 16: 22–30. [In Russian].
- Bykov V. D., Vasiliev A. V. *Gidrometriya. Izdanie chetyvortoe, pererabotannoe i dopolnennoe*. Hydrometry. Fourth edition, revised and expanded. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 444 p. [In Russian].
- Galahov V. P., Muhametov R. M. *Ledniki Altaya*. Glaciers of Altai. Novosibirsk: Nauka, 1999: 136 p. [In Russian].

- Erokhin S. A., Zaginaev V. V.* The outburst hazard of the landslide-dammed lakes of the Tien Shan. *Selevyte potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Trudy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii, Dushanbe–Horog, Tadjikistan, 2020.* Mudflows: disasters, risk, forecast, protection. Proceedings of the 6th International Conference, Dushanbe–Khorog, Tajikistan, 2020. T. 1. Dushanbe: Promotion LLC, 2020: 183–193. [In Russian].
- Istoriya ozer Severa Azii (Seriya: Istoriya ozer).* History of lakes in North Asia (Series: History of lakes). Saint Petersburg: Nauka, 1995: 288 p. [In Russian].
- Kotlyakov V. M.* Program and guidelines for compiling the Atlas of Snow and Ice Resources of the World. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1977, 29: 53–144. [In Russian].
- Mikhailov N. N.* Lakes of Altai, their origin and history. *Geografiya i prirodopolzovanie Sibiri.* Geography and environmental management of Siberia. 1994, 1: 75–89. [In Russian].
- Nazrishoev H. A., Yarg L. A., Vinnichenko S. M.* Lake Sarez and the main problems of high-mountain landslide lakes. *Inzhenernaya geologiya.* Engineering geology. 2010, 2: 42–49. [In Russian].
- Popov S. V., Boronina A. S.* Software for processing data of tachometric survey. *Geodeziya. kartografiya. geoinformatika I kadastry. Nauka i obrazovaniye. Sbornik materialov III vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 06–08 noyabrya 2019 g., SPb.* Geodesy, cartography, geoinformatics and cadasters. Science and education. Sat. materials of the III All-Russian scientific-pract. conf. November 6–8, 2019. Saint Petersburg: Publishing house RGPU them. A. I. Herzen, 2019: 258–263. [In Russian].
- Protodyakonov M. M.* *Davlenie gornyh porod i rudnichnoe kreplenie.* Rock pressure and mine lining. State Publishing House, 1931: 65 p. [In Russian].
- Rasputina V. A., Pryakhina G. V., Ganyushkin D. A., Bantcev D. V., Paniutin N. A.* The water level regime of periglacial lakes during the growth stage (the lakes of the Tavan-Bogdo-Ola mountain massif, South-Eastern Altai). *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2022, 62 (3): 441–454. [In Russian].
- Rasputina V. A., Pryakhina G. V., Popov S. V.* Modelling experience of the outburst flood hydrograph due to the earth dams destruction as a result of overflow. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya.* Advances in current natural sciences. 2021, 12: 194–205 [In Russian].
- Strom A. L.* Rockslide dams and catastrophic outburst floods in the river valleys of the Pamir mountains. *Selevyte potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Trudy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii, Dushanbe–Horog, Tadjikistan, 2020.* Mudflows: disasters, risk, forecast, protection. Proceedings of the 6th International Conference, Dushanbe–Khorog, Tajikistan, 2020. T. 1. Dushanbe: Promotion LLC, 2020: 111–121. [In Russian].
- Tronov M. V.* *Ocherki oledeneniya Altaya.* Essays on the glaciation of Altai. Moscow: Geographgiz, 1949: 375 p. [In Russian].
- Fomenko I. K., Strom A. L., Zerkal' O. V., Sirotkina O. N., Barykina O. S.* Large-scale landslides in rock massifs: problems and perspective lines of research. *5-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Innovacii v geologii, geofizike i geografii-2020» g. Sevastopol', 2020.* 5th International Scientific and Practical Conference “Innovations in Geology, Geophysics and Geography-2020”. Sevastopol, 2020: 153–155. [In Russian].
- Chizhova Yu. N., Rec E. P., Vasilchuk Yu. K., Tokarev I. V., Budanceva N. A., Kireeva M. B.* Two approaches to hydrograph separation of the glacial river runoff using isotopic methods. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2016, 56 (2): 161–168. [In Russian].
- Borodavko P. S., Litvinov A. S.* Russian Altai Mountains: Lake Maashey and Lake Sofiyskoe. In book: Borodavko P. S., Glazirin G. E., Herget J., Severskiy I. V. Hazard assessment and outburst flood estimation of naturally dammed lakes in Central Asia. Aachen: Shaker Verlag, 2013: 35–43.
- Bowen G. J.* The Online Isotopes in Precipitation Calculator, version X.X. Retrieved from: <http://www.waterisotopes.org> (Last access: 21 September 2023).
- Cenderelli D. A.* Floods from natural and artificial dam failures. In book: Inland Flood Hazards. Wohl E. E. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 73–103.
- Chang D. S., Zhang L. M.* Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010, 10: 933–946.
- Chen S., Zhong Q., Shen G.* Numerical modeling of earthen dam breach due to piping failure. *Water Science and Engineering.* 2019, 12 (3): 169–178.
- Costa J. E.* Rheologic, geomorphic and sedimentologic differentiation of waterflows, hyperconcentrated flows and debris flows. In book: Baker, V.R., Kochel, R.C., Patton, P.C. (Eds.), *Flood Geomorphology.* New York, 1988: 113–122.
- Ganyushkin D., Bantcev D., Derkach E., Agatova A., Nepop R., Griga S., Rasputina V., Ostanin O., Dyakova G., Pryakhina G., Chistyakov K., Kurochkin Y., Gorbunova Y.* Post-Little-Ice Age Glacier Recession in the North-Chuya Ridge and Dynamics of the Bolshoi Maashei Glacier, Altai. *Remote Sens.* 2023, 15 (8): 2186 p.
- Neupane R., Chen H., Cao C.* Review of moraine dam failure mechanism. *Geomatics, natural hazards and risk.* 2019, 10 (1): 1948–1966.
- Okeke A. C.-U., Wang F.* Hydromechanical constraints on piping failure of landslide dams: an experimental investigation. *Geoenvironmental Disasters.* 2016, 3 (1): 1–17.
- Osti R., Egashira S.* Hydrodynamic characteristics of the Tam Pokhari Glacial Lake outburst flood in the Mt. Everest region, Nepal. *Hydrological Processes.* 2009, 23: 2943–2955.
- Sökefeld M.* The Attabad-Landslide and the Politics of Disaster in Gojal, Gilgit-Baltistan. In: Luig, U. (Hrsg.): *Negotiating Disasters: Politics, Representation, Meanings.* Frankfurt: Peter Lang, 2012: 175–204.

- Temple D. M., Hanson G. J.* Headcut development in vegetated earth spillways. *Appl. Eng. Agric.* 1994, 10 (5): 677–682.
- Westoby M. J., Brasington J., Glasser N. F., Hambrey M. J., Reynolds J. M., Hassan M. A., Lowe A.* Numerical modelling of glacial lake outburst floods using physically based dam-breach models // *Earth Surf. Dynam.* 2015, 3: 171–199.
- Westoby M. J., Glasser N. Fr., Brasington J., Hambrey M. J., Quincey D. J., Reynolds J. M.* Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes. *Earth-Science Reviews.* 2014, 134: 137–159.
- Zhang T., Wang W., Gao T., An B.* Simulation and Assessment of Future Glacial Lake Outburst Floods in the Poiqu River Basin, Central Himalayas. *Water.* 2021, 13 (1376): 1–18.
- Zheng G., Mergili M., Emmer A., Allen S., Bao A., Guo H., Stoffel M.* The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment. *The Cryosphere.* 2021, 15: 3159–3180.
- Zhong Q., Chen S., Deng Z.* A simplified physically based breach model for a high concrete-faced rockfill dam: a case study. *Water Science and Engineering.* 2018, 11 (1): 46–52.
- WaterIsotopes.org. Retrieved from: <https://wateriso.utah.edu/waterisotopes/index.html> (Last access: 22 September 2023).
- FSBI “West Siberian UGMS” / List of hazardous phenomena. Retrieved from: <http://www.meteo-nso.ru/pages/115> (Last access: 22 September 2023).
- EarthExplorer. Retrieved from: <https://earthexplorer.usgs.gov> (Last access: 3 November 2023).