

Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

**ГИДРОЛОГИЯ**

Научная статья

УДК 551.4.042; 551.435.47

doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-59-70

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОРЫВА ЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА  
НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ВАРШЕЗКУЛЬ НИЖНЕЕ (ТАДЖИКИСТАН)****Виктория Антоновна Юдина<sup>1</sup>, Сергей Семенович Черноморец<sup>2</sup>, Елена Александровна Савернюк<sup>3</sup>,  
Иван Владимирович Крыленко<sup>4</sup>, Вера Михайловна Кидяева<sup>5</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> МГУ им. Ломоносова, г. Москва, Россия<sup>1</sup> viktoriiaurovskaia@gmail.com, Scopus ID: 57211199635<sup>2</sup> sc@geogr.msu.ru, Scopus ID: 15131000100<sup>3</sup> savernyuk@geogr.msu.ru, Scopus ID: 57193665733<sup>4</sup> i-krylenko@yandex.ru, Scopus ID: 57220095415<sup>5</sup> vera.kidyaeva@yandex.ru, Scopus ID: 26632201700

**Аннотация.** В работе рассматривалось моделирование возможного прорывного паводка на примере ледникового озера Варшезкуль Нижнее, расположенного на территории Западного Памира. С момента образования озера в 1968 г. и по 2022 г. озеро увеличилось в 8,3 раза, активный рост наблюдался до 2000 г. По результатам обследования долины в 2018 г. объем озера составил 1,94 млн м<sup>3</sup>. Для оценки максимального расхода паводка применялась программа FLOVI, включающая в себя уравнения модели прорыва озера через внутрiledниковый туннель, разработанные Ю.Б. Виноградовым. По результатам моделирования было выявлено, что начальная температура воды в озере является наиболее чувствительным параметром модели. Максимальный расход прорывного паводка при температуре воды, равной 4 °С, окажется на 2,8 раза выше, чем для 0 °С, и составит 400 м<sup>3</sup>/с. Кроме того в интервале от 0 до 4 °С расход прорывного паводка будет увеличиваться в среднем на 30 % на 1 °С. Также были приведены результаты обработки реанализа ERA5 (ECMWF Re-Analysis 5) в виде графиков температуры поверхностного слоя, придонной и общей, в период с июня по октябрь за 2018–2022 гг. Наблюдалось практически полное совпадение значений, и температура в даты установления ледостава на озере была значительно завышена. Это может быть связано с малым разрешением данных (30 км) и небольшой площадью озера. Также было проведено сравнение результатов моделирования с оценками максимального расхода прорывного паводка по эмпирическим зависимостям. Разница в значениях расхода, определенных по различным формулам, составила около 95 %.

**Ключевые слова:** ледниковое озеро, прорывной паводок, Памир, FLOVI, ERA5

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке тем госзадания МГУ им. М.В. Ломоносова НИЛ Снежных лавин и селей и НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, разделы I.7(ЦИТИС 121051300175-4), 1.13 (ЦИТИС 121051100166-4).

**Благодарность:** авторы выражают благодарность Aga Khan Agency for Habitat и лично У.Р. Пирмамадову, И.И. Зикиллобекову, Ю.Х. Раимбекову за помощь и поддержку.

**Для цитирования:** Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М. Особенности моделирования прорыва ледникового озера на примере озера Варшезкуль Нижнее (Таджикистан) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 1(68). С. 59–70. doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-59-70



## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

## HYDROLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-59-70

THE FEATURES OF A GLACIAL LAKE OUTBURST MODELING:  
A CASE STUDY OF VARSHEZKUL LOWER (TAJIKISTAN)Viktoriia A. Iudina<sup>1</sup>, Sergey S. Chernomorets<sup>2</sup>, Elena A. Savernyuk<sup>3</sup>, Ivan V. Krylenko<sup>4</sup>, Vera M. Kidyayeva<sup>5</sup><sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia<sup>1</sup> viktoriiaurovskaya@gmail.com, Scopus ID 57211199635<sup>2</sup> devdorak@gmail.com, Scopus ID 15131000100<sup>3</sup> savernyuk@gmail.com, Scopus ID 57193665733<sup>4</sup> i-krylenko@yandex.ru, Scopus ID 57220095415<sup>5</sup> vera.kidyayeva@yandex.ru, Scopus ID 26632201700

**Abstract.** The study deals with the modeling of a possible outburst flood with the example of glacial lake Varshezkul Lower located in the Western Pamirs. From the formation of the lake in 1968 and until 2022, the lake increased by 8.3 times, its active growth was observed until 2000. According to the survey of the valley in 2018, the volume of the lake was 1.94 million m<sup>3</sup>. To estimate the maximum flood discharge, the FLOVI program was used, which includes model equations of a lake outburst through an intraglacial tunnel developed by Yu.B. Vinogradov. The simulation showed the initial water temperature in the lake to be the most sensitive parameter of the model. The maximum discharge of an outburst flood at a water temperature of 4 °C will be 2.8 times higher than for 0 °C and will amount to 400 m<sup>3</sup>/s. In the range from 0 to 4 °C, the outburst flood discharge will increase by approximately 30% 1 °C. The results of processing the ERA5 reanalysis (ECMWF Re-Analysis 5) were presented in the form of graphs of the surface layer temperature, bottom and general temperature in the period from June to October for 2018-2022. An almost complete coincidence of values was observed, and the temperature on the dates of the freeze-up on the lake was significantly overestimated. This may be due to a low resolution of the data (30 km) and a small area of the lake. Also, the simulation results were compared with estimates of the maximum outburst flood discharge from empirical dependences. The difference in the flow discharges determined by various formulas was about 95%.

**Keywords:** glacial lake, flood outburst, Pamir, FLOVI, ERA5

**Funding:** This study was carried out within the framework of state assignments of Lomonosov Moscow State University, sections I,7 (CITIS 121051300175-4).

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to Aga Khan Agency for Habitat and particularly to U.R. Pirmamadov, I.I. Zikillobekov, and Yu.Kh. Raimbekov for help and support.

**For citation:** Iudina, V.A., Chernomorets, S.S., Savernyuk, E.A., Krylenko, I.V., Kidyayeva, V.M. (2024). The features of a glacial lake outburst modeling: a case study of Varshezkul Lower (Tajikistan). *Geographical Bulletin*. No. 1(68). Pp. 59–70. doi: 10.17072/2079-7877-2024-1-59-70

## Введение

Ледниковые озера являются одними из самых распространённых в мире и составляют около 50 % от общего числа озёр [7]. В условиях изменения климата наблюдается активное отступление ледников, которое в свою очередь ведет к образованию от сотен до тысячи ледниковых озёр по всему миру [19, 25].

По данным [23], на 2017 г. на Памире насчитывалось 12 186 ледников площадью  $10\,396,20 \pm 421,16$  км<sup>2</sup>, неравномерно распределённых по разным районам. Из них на Западном Памире (бассейн Амударьи) 10031 ледников общей площадью  $8106,58 \pm 346,24$  км<sup>2</sup> (77,98 ± 3,33 %), на Восточном Памире (бассейн реки Тарим) 2155 ледников общей площадью  $2289,62 \pm 74,92$  км<sup>2</sup> (22,02 ± 0,72 %). С 2000 по 2017 г. площадь оледенения на Памире сократилась на  $124,28 \pm 81,33$  км<sup>2</sup> со скоростью приблизительно  $1,17 \pm 0,77$  % [23]. Согласно климатическому сценарию [18], будет наблюдаться значительное сокращение массы льда (до 87 % в Азии). При реализации данного сценария самые большие ледниковые озера будут находиться в Каракоруме и на Памире [18].

По данным [17], площадь моренных озёр на Памире с 2008 по 2017 г. увеличилась на 10 %. Общий объём 8 крупнейших моренных озёр на Памире, по данным [18], составляет  $2,57 \pm 0,74$  км<sup>3</sup>. Средняя площадь ледниковых озёр составляет 0,19 км<sup>2</sup>, а это больше, чем в

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

центральных Гималаях (0,15 км<sup>2</sup>), восточных Гималаях (0,12 км<sup>2</sup>), юго-востоке Тибетского нагорья (0,11 км<sup>2</sup>) и Перуанских Андах (0,10 км<sup>2</sup>) [30].

В связи с вышеперечисленным увеличивается опасность прорыва ледниковых озер. Целью данной работы является оценка характеристик прорывного паводка на примере ледникового озера Варшезкуль Нижнее, расположенного на территории Западного Памира в пределах Горно-Бадахшанской автономной области.

## Объект исследования

Исследуемое озеро Варшезкуль Нижнее располагается в верховьях реки Варшездара. Бассейн реки расположен на северном склоне восточной оконечности Шугнанского хребта. Река является левым притоком Гунта и впадает в него на 102 км выше устья последнего – на отметке 3106 м. Длина реки Варшездара составляет 18 км, а площадь водосбора равняется 71,7 км<sup>2</sup> [3]. Бассейн расположен на границе Западного и Восточного Памира и сочетает черты рельефа, характерные для обеих областей. Так, наблюдаются значительные перепады высот от гребней хребтов до днища долин (1–1,3 км) и ледниковый рельеф, еще слабо переработанный эрозией и склоновыми процессами.

Озеро Варшезкуль Верхнее находится на высоте 4788,6 м в 15 км от устья реки Варшездара. Площадь акватории озера составляет 348 тыс. м<sup>2</sup>, длина – 1000 м, характерная ширина – 300 м. Северный берег крутой скальный, западный и восточный – моренные, на южном к воде выходят два склоновых ледника с разделяющим их скальным гребнем. Запруда озера представляется достаточно надёжной.

Сравнение снимков высокого разрешения 1969, 1971 и 2012 гг. показало, что изменения в чаше озера Варшезкуль Верхнее происходили только за счет сокращения прилегающих ледников. Площадь озера за 53 года увеличилась на 25 тыс. м<sup>2</sup> – с 355 тыс. м<sup>2</sup> до 380 тыс. м<sup>2</sup>, то есть на 7 %. Несмотря на общее понижение поверхности ледника Варшез за период с 1969 по 2022 г., отступления и разрушения массива береговой морены ледника Варшез, слагающей нижнюю часть перемычки озера, вверх по склону в сторону озера пока не произошло.

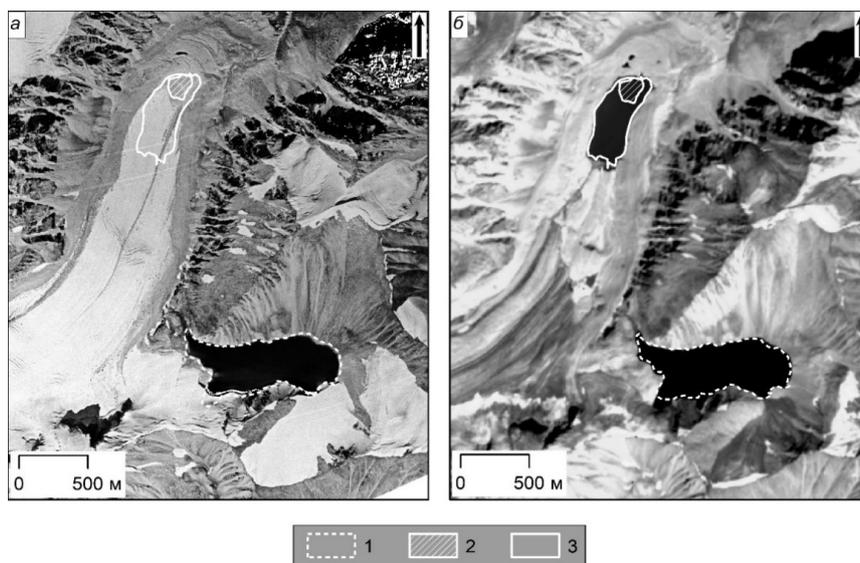


Рис. 1. Схема изменения и развития озер с 1969 по 2022 г.: а – космический снимок КН-4И от 15.09.1971, б – космический снимок Sentinel 2 от 31.08.2022; 1 – контур озера Варшезкуль Верхнее (на снимке а – 31.08.2022, на снимке б – 15.09.1971), 2 – контур озера Варшезкуль Нижнее от 27.09.1969, 3 – граница озера Варшезкуль Нижнее от 31.08.2022

Fig. 1. Scheme of change and development of lakes from 1969 to 2022: а – KH-4I satellite image dated 15 September 1971, б – Sentinel 2 space image dated 31 August 2022; 1 – the contour of Lake Varshezkul Verkhneye (in picture а – 31 August 2022, in picture б – 15 September 1971), 2 – the contour of Lake Varshezkul Lower as of 27 September 1969, 3 – the border of Lake Varshezkul Lower as of 31 August 2022

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

Озеро Варшезкуль Нижнее лежит в чаше, образованной мёртвыми льдами бывшего языка ледника Варшез, на абсолютной отметке 4532,5 м. Длина озера Варшезкуль Нижнее составляет 700 м, ширина в средней части – 260 м, глубины превышают 20 м, площадь акватории в летний период – 173 тыс. м<sup>2</sup>, объем, по состоянию на 2018 г., составляет 1,94 млн м<sup>3</sup> [6]. Современный активный язык ледника находится на южном берегу озера в 100–150 м от уреза воды. С запада и востока берега озера образуют высокие, по 15–25 м, гряды мёртвых льдов, покрытые рыхлообломочным плащом и круто обрывающиеся к озеру. Северный берег и запруду озера Варшезкуль Нижнее формирует последний по времени образования конечно-моренный вал. На поверхности вала хорошо прослеживаются изогнутые полосы движения, имеются просадки с небольшими эфемерными озерами. Предположительно, большая часть вала все еще остается цельным ледовым телом, покрытым чехлом грубообломочной поверхностной морены. Поскольку озеро наледниковое, то, скорее всего, продолжится трансформация его ложа и берегов в результате таяния льдов. Так, наблюдается значительное возрастание площади акватории озера Варшезкуль Нижнее на протяжении последних 40 лет.

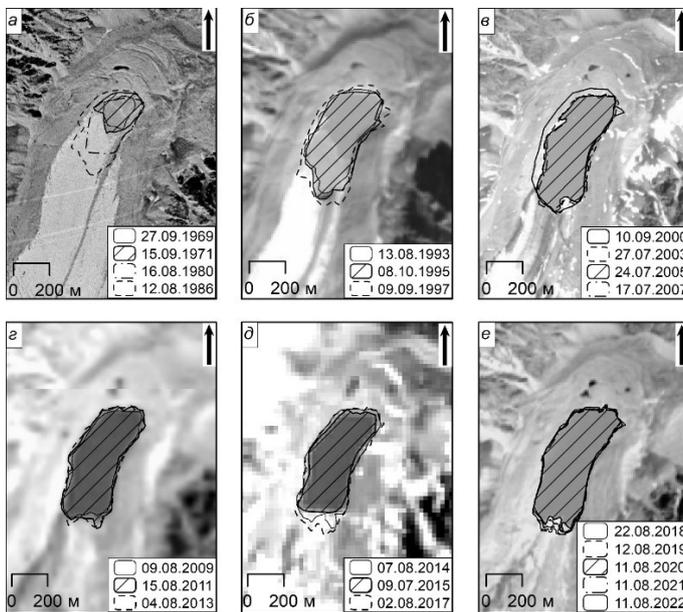


Рис. 2. Развитие озера Варшезкуль Нижнее с 1969 по 2022 г. Подложка: а – КН-4В от 15.09.1971; б – SPOT 3 от 08.10.1995; SPOT 5 от 24.07.2005; Landsat 5 от 15.08.2011; Landsat 8 от 09.07.2015; Sentinel 2 от 11.08.2020

Fig. 2. Development of Lake Varshezkul Lower from 1969 to 2022. Substrate: а – КН-4В dated 15 September 1971; б – SPOT 3 dated 8 October 1995; SPOT 5 dated 24 July 2005; Landsat 5 as of 15 August 2011; Landsat 8 dated 9 July 2015; Sentinel 2 as of 11 August 2020

В 1968 г., по данным [24], площадь озера составляла 23,3 тыс. м<sup>2</sup>. Процесс формирования озера Варшезкуль Нижнее (рис. 2) прослеживается по космическим снимкам КН-4А (1969), КН-4В (1971), Landsat 1 (1980), SPOT 1 (1986), Landsat 4 (1993, 1994, 1996–1999), SPOT 3 (1995), SPOT 4 (2000–2002), SPOT 5 (2003–2007), Landsat 5 (2008–2011), Landsat 7 (2012), Landsat 8 (2013–2016), Sentinel 2 (2017–2022).

В 1969 г. озеро лежало в ледяной чаше, с боков образованной заморенными ледяными грядами срединных морен, в северной части ограниченной серией разновозрастных конечно-моренных валов и в южной – отступающим языком ледника Варшез. Активный рост озера наблюдался с 1969 по 2000 г. За этот период максимальная площадь водного зеркала выросла в 8,3 раза. В 2000 г., по данным [31–34], наблюдалась максимальная площадь – около 190 тыс. м<sup>2</sup>. В последующие годы минимальная площадь в период абляции (август) зафиксирована на космоснимке от 09.08.2009 г. – 145 тыс. м<sup>2</sup>, а близкая к максимальной – 187 тыс. м<sup>2</sup> – наблюдалась 11.08.2022 г.

Сравнение снимков высокого разрешения 1969, 1971 и 2012 гг. показало, что изменения в чаше озера происходили в основном на боковых массивах мертвых льдов гряд срединных морен. Активных оползаний и оплывин с уступа массива конечно-моренных валов с 1969 г. не было. Эфемерные озера на конечно-моренных валах стабильны и не меняют своего положения, не увеличиваются в размерах. Следы паводков и селевых потоков с озера и уступа мас-

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

сива конечно-моренных валов с 1969 по 2022 г. отсутствуют. С левой стороны имеется термокарстовая воронка, образовавшаяся в 2008–2009 гг. Рост озера происходил в основном за счет отступления ледника Варшез.

В целом береговая линия озера с 2003 г. стабильная. Отступивший на 200 м (1 км с 1969 г.) от озера край ледника сейчас не играет активной роли в росте границ озера. Можно предположить, что линейные размеры озера будут прирастать незначительно, если фильтрация воды в озере будет оставаться на том же уровне, что и сейчас. Однако возможно дальнейшее увеличение глубины озера, рост его объёма за счет протаивания льдов в днище и на перемычке правой ледяной гряды и изменение режима фильтрации. По результатам геоморфологического обследования, проведенного в 2019 г., были выявлены просадки и сбросы в запруде озера Варшезкуль Нижнее. Одним из вариантов развития прорывного паводка является возможность образования канала стока в гряде мертвых льдов.

**Материалы и методы**

В данной работе применялась программа FLOVI [12], а именно первый блок, в котором используются уравнения модели прорыва озера с ледяной плотиной [1]. В основе модели лежит предположение, что тепла, выделяемого за счет превышения температуры воды над температурой тающего льда и особенно диссипации энергии водного потока, достаточно для выработки за относительно короткий промежуток времени туннеля, способного обеспечить катрастофических сброс воды из озера [1–2]:

$$Q = \delta * \left\{ \frac{\rho_0 * g}{\rho r l} * \left[ (x + h) * (W_0 - W) + \frac{a}{m + 1} * (W_0^{m+1} - W^{m+1}) \right] \right\}^{\frac{5}{4}} * \sqrt{a * W^m}$$

$$x = \frac{c_0}{g} * t * \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{400 * \delta^{0.3} * l * (a * W^m)^{0.15}}{Q^{0.55} * \rho_0 * c_0} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – плотность воды, 1000 кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность воды и льда, 850–910 кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $r$  – удельная теплота плавления льда, 334000 Дж/кг;  $l$  – длина туннеля, м;  $h$  – превышение точки входа туннель над точкой выхода, м;  $W_0$  – объём воды в озере перед началом прорыва, тыс. м<sup>3</sup>;  $a, m$  – морфометрические параметры чаши озера, определяемые из уравнения  $H = aW^m$ ;  $C_0$  – удельная массовая теплоемкость воды, 4190 Дж/кг·°С,  $t$  – температура воды в озере, °С. Максимальный расход прорывного паводка будет наблюдаться при  $W$ , при котором будет выполняться равенство:

$$W_0 * \left( h + \frac{a}{m} * W_0^m \right) = W * \left[ \left( \frac{2.5}{m} + 1 \right) * h + \frac{a}{m+1} * \left( \frac{2.5}{m} + 3.5 \right) * W^m \right]. \quad (2)$$

Согласно геоморфологическому обследованию долины, длина подледникового канала составит 650 м. Разница в отметках высот между началом и концом туннеля определялась с использованием спутникового снимка ALOS PALASR (разрешение 12,5 м) и составила 81 м. Объём воды в озере Варшезкуль, а также морфометрические параметры чаши были определены на основе батиметрической съемки и составили 1,94 млн м<sup>3</sup> [6].

Ранее программа FLOVI уже применялась для моделирования прорывных паводков на территории Западного Памира [9–10]. Также результаты моделирования прорыва озера Варшезкуль Нижнее с уменьшенной длиной канала представлены в работе [11].

**Результаты и обсуждение**

**Моделирование прорывного паводка.** По результатам моделирования наименьший расход прорывного паводка наблюдается при начальной температуре воды, равной 0 °С, и составляет 141 м<sup>3</sup>/с (рис. 3). Время наступления пикового расхода при этом составляет 19 часов.

При увеличении температуры воды на 0,5 °С пиковый расход увеличивается на 21 %, а время добега сокращается на 6,4 часа. При дальнейшем росте температуры расход прорывного паводка будет увеличиваться примерно на 13 % на каждые 0,5 °С, в среднем на 30 % на 1 °С. Максимальный расход при температуре воды, равной 4 °С, окажется в 2,8 раза выше, чем

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

для  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и составит  $400\text{ м}^3/\text{с}$ . При этом время добегаания уменьшится приблизительно на 16 часов. Также нужно отметить, что, начиная с температуры воды, равной  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше, разница во времени добегаания составляет в среднем  $0,6$  часа. Кроме того, нужно отметить, что график зависимости времени добегаания максимального расхода от начальной температуры воды в озере имеет форму гиперболы (рис. 4А).

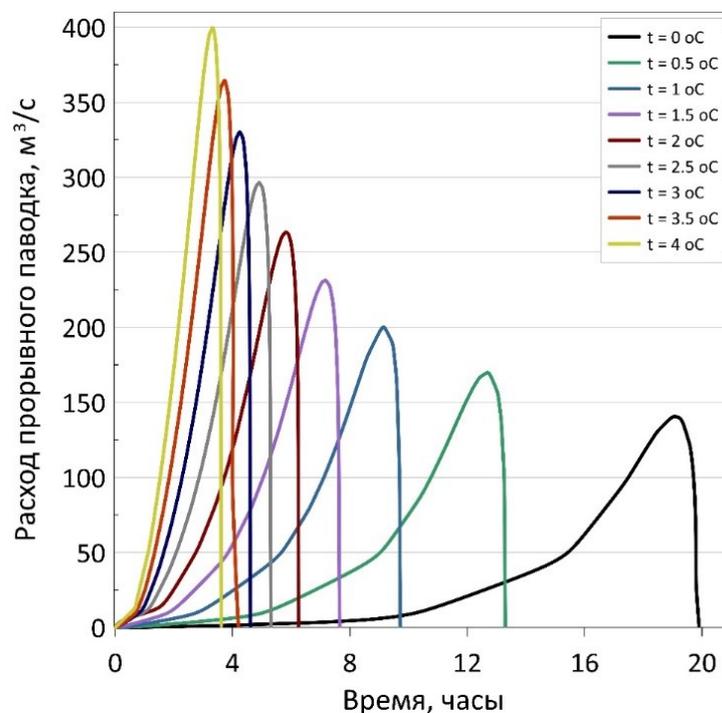


Рис. 3. Гидрографы прорывного паводка озера Варшезкуль Нижнее при начальной температуре воды от  $0$  до  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Hydrographs of the outburst flood of Lake Varshezkul Lower at an initial water temperature from  $0$  to  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

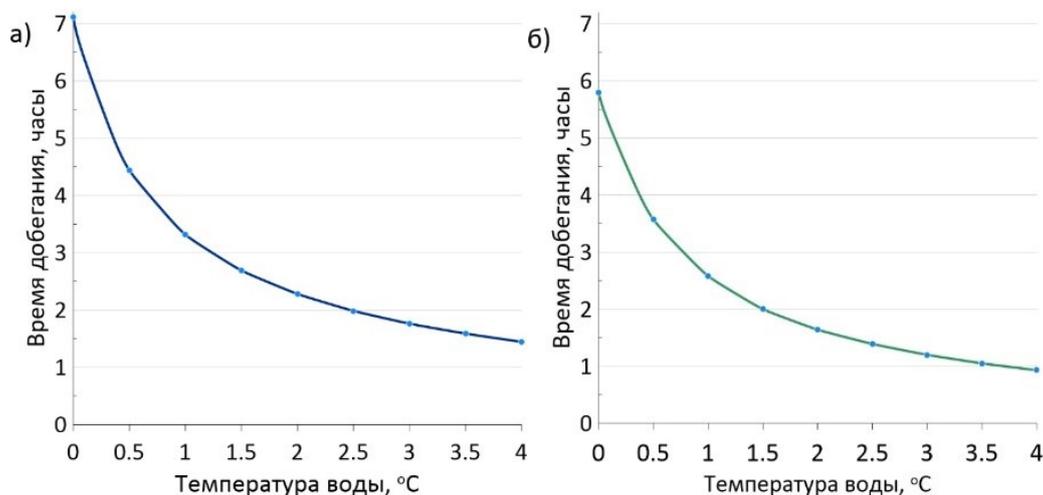


Рис. 4. Зависимость времени добегаания максимального расхода прорывного паводка от начальной температуры воды: а) для озера Варшезкуль Нижнее, б) для озера Бодомдара Нижнее [8]

Fig. 4. Dependence of the travel time of the maximum discharge of outburst flood on the initial water temperature: а) for Lake Varshezkul Lower, б) for Lake Bodomdara Lower [8]

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

Схожий график был ранее получен при моделировании паводка из озера Бодомдара (ГБАО, Таджикистан) [8] (рис. 4Б). Также разница во времени добегаания сокращается в среднем до 0,2 часа при достижении значения температуры воды, равной 2 °С и выше. Полученные графики демонстрируют, что от величины общей температуры воды в озере зависят не только значения максимального расхода, но и его время добегаания.

**Оценка температуры воды в озере.** Во время обследования озера в июле 2018 г. температура поверхностного слоя воды в озере составляла приблизительно около 5 °С [6]. Однако в модели прорыва озера используется именно средняя температура воды в озере, а не поверхностного слоя [1]. В данном случае наиболее вероятная температура воды в озере может находиться в летний период времени в интервале от 2,5 до 4 °С в зависимости от суточного хода температуры воды, а также температуры воздуха.

В настоящее время для определения как атмосферных, так и гидрологических характеристик активно используются данные реанализа [13, 20, 21, 27]. Одним из наиболее широко используемых реанализов является ERA5 (ECMWF Re-Analysis 5) [20], необходимый в данной работе для определения общей температуры воды в озере и придонной. Реанализ ERA5 представляет собой сеточные данные Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с часовым осреднением значений с шагом в  $0,25 \times 0,25^\circ$  широты и долготы [20]. В основе лежит четырехмерная вариационная ассимиляция данных наблюдений. По результатам обработки данных реанализа для озера Варшездара был получен следующий график температуры воды (рис. 5).

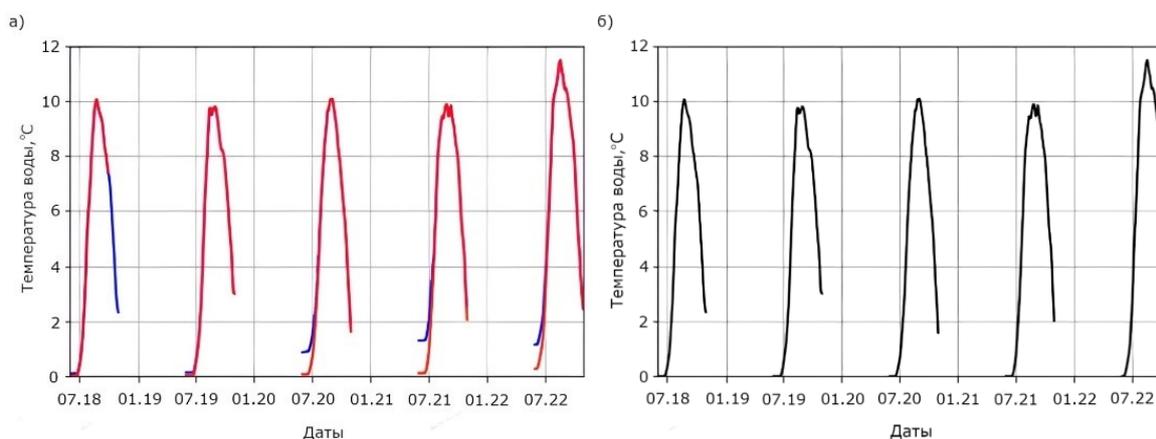


Рис. 5. Температура воды в озере по данным реанализа ERA5: а) красная линия – общая температура воды в озере, синяя – придонная, б) черная линия – температура поверхностного слоя

Fig. 5. Water temperature in the lake according to ERA5 reanalysis: a) red line – total water temperature in the lake, blue – bottom temperature, b) black line – surface layer temperature

Как можно видеть на рисунке, наблюдается практически полное совпадение температуры поверхностного слоя – общей и придонной. Согласно классификации по термическому режиму [5], высокогорные озера подразделяются на субполярные и полярные. В субполярных озерах температура поверхности воды выше 4 °С наблюдается только летом в течение очень короткого промежутка времени. В полярных озерах температуры поверхности воды в озере всегда находятся в интервале от 0 до 4 °С. Средняя поверхностная и общая температура с 2018 по 2022 г. оказываются идентичными и составляют 0,24 °С в июне, 3,8 °С в июле, 9 °С в августе, 8,9 °С в сентябре и 5,1 °С в октябре. При этом установление ледового покрова на озера Варшезкуль Нижнее происходило в период с 20 по 25 октября. Среднее значение общей температуры воды в эти даты, по данным реанализа, составило 3,7 °С. Несоответствие данных может быть связано с малым разрешением данных (30 км) и небольшой площадью озера.

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

Таким образом, можно говорить о том, что данные реанализа на настоящий момент не могут быть использованы для определения температуры воды в высокогорных озерах.

**Оценка расхода прорывного паводка по эмпирическим зависимостям.** Ранее для долины реки Варшездара была проведена оценка возможных последствий возникновения прорывного паводка с использованием модели FLO-2D [4]. Максимальный расход прорывного паводка в данном случае задавался равным  $100 \text{ м}^3/\text{с}$  [4]. В данной работе дополнительно были проведены расчеты максимального расхода прорывного паводка по эмпирическим формулам (табл.).

Таблица

Эмпирические уравнения, используемые для оценки максимального расхода прорывного паводка, и результаты расчетов

Empirical equations used to estimate the maximum outburst flood discharge and calculation results

№	Источник	Формула	Расход прорывного паводка $Q$ , $\text{м}^3/\text{с}$
1	[26]	$Q = 1.776 * V^{0.47}$	1602
2	[16]	$Q = 0.72 * V^{0.53}$	1548
3	[29]	$Q = 0.045 * V^{0.66}$	636
4	[14]	$Q = 75 * (V/10^6)^{0.67}$	117
5	[28]	$Q = 46 * (V/10^6)^{0.66}$	70
6	[15]	$Q = 113 * (V^{64})$	140

Как можно видеть, разница в расходах, вычисленных по эмпирическим формулам, может достигать более  $900 \text{ м}^3/\text{с}$ , то есть примерно 95 %. При этом нужно отметить, что значение, полученное по формуле [28], оказалось минимальным. Далее следуют формулы [14–15], разница в максимальных значениях составляет около 20 %. Достаточно близкие результаты были получены по формулам [16, 26], разница в расходах составила около 3 %. Также значения, вычисленные по этим формулам, оказались наибольшими. Результаты моделирования, полученные в программе FLOVI, попадают в диапазон результатов формул [14, 29].

Однако такие зависимости достаточно ограничены в использовании. Большинство из этих формул были получены обратным путем на основании исторических данных по прорывам озер. В данных формулах не рассматриваются физические процессы, происходящие при опорожнении ледникового озера, что может привести к недооценке реальных значений [24].

### Заключение

В работе представлены результаты моделирования прорывного паводка на примере ледникового озера Варшезкуль Нижнее, расположенного на территории Западного Памира. В бассейне реки Варшездара расположены два высокогорных озера Варшезкуль – Верхнее и Нижнее. По результатам геоморфологического обследования, проведенного в 2018 г., было установлено, что запруда озера Варшезкуль Верхнее достаточно стабильна. Также площадь озера за 53 года увеличилась на 7 %. В то время как сравнение комических снимков с 1969 по 2022 г. показало, что площадь озера Варшезкуль Нижнее выросла в 8,3 раза. Увеличение акватории озера происходило в основном на боковых массивах мертвых льдов гряд срединных морен. Одним из вариантов развития прорывного паводка является возможность образования канала стока в гряде мертвых льдов.

Расчет характеристик прорывного паводка проводился в программе FLOVI, при этом использовался блок уравнений модели прорыва озера, предложенных Ю.Б. Виноградовым. Дополнительно было выполнено сравнение результатов моделирования со значениями, полученными по эмпирическим зависимостям. Разница в расходах, вычисленных по эмпирическим формулам, может достигать 95 %. Несмотря на то, что результаты моделирования попадают в диапазон значений расходов, определенных по эмпирическим зависимостям, нельзя однозначно утверждать, какие именно зависимости следует использовать. Это связано прежде

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

всего с тем, что такие формулы не учитывают физические процессы, происходящие при прорыве озер. Также эмпирические коэффициенты в данных зависимостях были получены на основе небольшого количества прорывов озер.

По результатам моделирования в программе FLOVI было выявлено, что температура воды в озере является одним из наиболее чувствительных параметром в модели. Температура воды в озере варьируется по глубине, в течение суток и в рамках сезонных изменений. Единичные измерения распределения температуры по глубине не могут дать точное значение средней температуры, при которой будет наблюдаться прорыв озера. Однако такие измерения позволяют определить, к какому типу по термическому режиму [5] – субполярному или полярному – можно отнести то или иное озеро. В результате обработки данных реанализа ERA5 нами были получены значения общей и придонной температуры воды в озере за 2018–2022 гг. с августа по октябрь. Так, общая температура воды в озере за август и сентябрь значительно превысила значения, предлагаемые в классификации [5]. Также были продемонстрированы графики изменения общей температуры воды для дат, когда озеро уже было покрыто льдом. Полученные значения сильно превышают прогнозируемые. Таким образом, на настоящий момент в связи с имеющимся разрешением (30 км) данные реанализа некорректно отображают температуру воды для высокогорных озер, общая длина которых оказывается значительно ниже сетки реанализа.

При моделировании прорыва ледниковых озер в отсутствие данных наблюдений рекомендуется проводить численные эксперименты с изменением температуры воды в озере от 0 и до 4 °С согласно классификации [5] для определения наибольшего возможного расхода прорывного паводка. В каждом конкретном случае следует учитывать высоту расположения озера, близость ледников, а также распределение глубин в озере. Важным этапом будущих работ станет моделирование ледниковых озер Памира с различной начальной температурой воды в озере и выявление закономерностей изменения пикового расхода прорывного паводка.

## Библиографический список

1. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 156 с.
2. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Изд-во Академия, 2010. 304 с.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Том 14. Бассейны рек Средней Азии. Выпуск 3. Бассейн р. Аму-Дарья. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 322 с.
4. Кидяева В.М., Крыленко И.В., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Куровская В.А., Раимбеков Ю.Х., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р., Мародасейнов Ф.О. Реакция высокогорных озер западного Памира на изменение климата (на примере озера Варшезкуль Нижнее, Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан). // Геоморфология. 2021. № 52. С. 90–104.
5. Хатчинсон Д.Э. Лимнология. / сокр. пер. с англ. Цыцарпина Г.В., Шинкар Г.Г. / ред. и предисл. Россолимо Л.Л. М.: Прогресс, 1969. 592 с.
6. Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Рудой А.Н., Висхаджиева К.С., Аршинова М.А., Юдина (Куровская) В.А. Батиметрическая съемка озер Куленкуль (Дузахдара), Варшезкуль, Патхур (Чапдара), Джизев, Хавраздара и моделирование возможных прорывов. М.: Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2018. 278 с.
7. Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ: учеб. для вузов. М.: Перо, 2014. 399 с.
8. Юдина В.А. Оценка характеристик селевых потоков и прорывных паводков на основе комплекса математических моделей: автореф. дис. канд. геог. наук: 1.6.16. М., 2022. 28 с.
9. Юдина (Куровская) В.А. Оценка характеристик гляциального селевого потока с использованием цепочки математических моделей // Географический вестник. 2022. Т. 4, № 63. С. 67–79.
10. Юдина (Куровская) В.А., Черноморец С.С., Крыленко И.Н., Виноградова Т.А., Крыленко И.В., Савернюк Е.А., Гуломайдаров А.Г., Зикиллобеков И.И., Пирмамадов У.Р., Раимбеков Ю.Х. Оценка возможных последствий прорывных паводков на примере долины реки Бодомдара (Таджикистан) // Криосфера Земли. 2022. Т. 26, № 5. С. 14–28.
11. Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М. Моделирование прорыва ледникового озера // Труды IX Всероссийской научно-практической конф. с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов». Пермь, 25–28 мая 2023 г.; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2023. С. 217–222.
12. Юдина В.А., Юдин Н.Е., Виноградова Т.А. Программа для расчета прорывного паводка и селевого потока (FLOVI). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022683748. 2022.
13. Cerlini P.B., Saraceni M., Silvestri L., Meniconi S, Brunone B. Monitoring the water mass balance variability of small shallow lakes by an ERA5-Land reanalysis and water level measurement-based model. An Application to the Trasimeno Lake, Italy // Atmosphere. 2022. V. 13. 949 p. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13060949>
14. Clague J.J., Mathews W.H. The magnitude of jokulhlaups // Journal of Glaciology. 1973. № 12. P. 501–504.

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

15. Costa J.E., Shuster R.L. The formation and failure of natural dams // Geological Society of America Bulletin. 1988. № 100. P. 1054–1068.
16. Evans S.F. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-made and natural dams // Canadian Geotechnical Journal. 1986. № 23. P. 385–387.
17. Chen F., Zhang M., Guo H., Allen S., Kargel J.S., Haritashya U.K., Watson C.S. Annual 30 m dataset for glacial lakes in High Mountain Asia from 2008 to 2017 // Earth System Science Data. 2021. № 2. C. 741–766.
18. Furian W, Loibl D, Schneider C. Future glacial lakes in High Mountain Asia: an inventory and assessment of hazard potential from surrounding slopes // Journal of Glaciology. 2021. № 264. P. 653–670. URL: <https://doi.org/10.1017/jog.2021.18>
19. Harrison S., Kargel J.S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi Dh., Vilímek V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods // The Cryosphere. 2018. № 12. P. 1195–1209. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>, 2018.
20. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2023. URL: <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
21. Irwandi H., Rosid M.S. Mart T. Effects of Climate change on temperature and precipitation in the Lake Toba region, Indonesia, based on ERA5-land data with quantile mapping bias correction // Scientific Reports. 2023. № 13. P. 2542. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29592-y>
22. Kraaijenbrink PDA, Bierkens MFP, Lutz AF and Immerzeel. WW Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers // Nature 549. 2017. № 7671. P. 257–260. URL: <https://doi.org/10.1038/nature23878>
23. Li Zh., Wang N., Chen A., Liang Q., Yang D. Light change of glaciers in the Pamir over the period 2000–2017 // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2022. № 1. P. 13–24. URL: <https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2028475>
24. Mergili M., Schneider J.F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. № 11. P. 1447–1462.
25. Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K., Kargel J.S., Watson C.S., Kennedy M.C., Bevington A.R., Betts R.A., Harrison S., Strattman K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. // Nature Climate Change. 2020. № 10. P. 939–945. URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4>
26. Singh K., Snorrason A. Sensitivity of Outflow Peaks and Flood Stages to the Selection of Dam Breach Parameters and Simulation Models // Journal of Hydrology. 1984. № 68. P. 295–310.
27. Stefanidis K., Varlas G., Vourka A., Papadopoulos A., Dimitriou E. Delineating the relative contribution of climate related variables to chlorophyll-a and phytoplankton biomass in lakes using the ERA5-Land climate reanalysis data // Water Research. 2021. № 196. P. 117053.
28. Walder J.S., Costa J.E. Outburst floods from glacier-dammed lakes: The effect of mode of lake drainage on flood magnitude // Earth Surface Processes and Landforms. 1996. № 21. P. 701–723.
29. Walder J.S., O'Connor J.E. Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams // Water Resources Research. 1997. № 33. P. 2337–2348.
30. Wangchuk S., Bolch T. Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: strengths and challenges // Science of Remote Sensing. 2020. № 2. P. 100008.
31. swh Data center – CNES URL: <https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/60> (дата обращения: 01.02.023).
32. Sentinel Hub URL: <https://www.sentinel-hub.com/> (дата обращения: 01.02.023).
33. Google Earth URL: <https://earth.google.com/web/@0,-2.8496,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r> (дата обращения: 01.02.023).
34. World Imagery – Overview – ArcGIS Online URL: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9> (дата обращения: 01.02.023)

## References

1. Vinogradov Yu.B. (1977). *Glacial breakthrough floods and mudflows*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 156 p.
2. Vinogradov Yu.B. and Vinogradova T.A. (2020). *Mathematical modeling in hydrology*. Moscow: Akademiia, 304 p.
3. Surface water resources of the USSR. (1967). *Volume 14. Central Asia. Issue 3. Amudaria river basin*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 322 p.
4. Kidyayeva V.M., Krylenko, I.V., Chernomorets, S.S., Savernyuk. E.A., Kurovskaia, V.A., Raimbekov, Yu.H., Bobov, R.A., Pirmamadov, U.R., Marodasein, F.O. (2021). The responds of the Western Pamirs alpine lakes to climate chang (Lake Lower Varshedzkul case study, Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Tajikistan). *Geomorfologiya*, vol. 52, no. 3, pp. 90–104.
5. Hutchinson D.E. (1969). *Limnology*. Abbr. per. from English. Tsytsarpina, G.V., Shinkar G.G. Ed. and foreword. Rossolimo, L.L. M.: Progress, 592 p.
6. Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Kidyayeva V.M., Rudoi A.N., Viskhadzhieva K.S., Arshinova M.A., and Kurovskaia V.A. (2018). *Bathymetric survey of lakes Oulenkul (Duzakhdara), Varshedzkul, Patkhur (Chapdara), Jizev, Khavrazdara and modelling of potential outbursts*. Moscow: MGU (Publ.), 278 p.
7. Edelstein K.K. (2014). Hydrology of lakes and reservoirs. *Textbook for universities*. M.: Pero, 399 p.
8. Iudina V.A. (2022). Estimation of debris flows and outburst floods characteristics based on the complex of mathematical models. *Abstract of the thesis. dis. cand. geog. sciences: 1.6.16*. M., 28 p.
9. Iudina (Kurovskaia) V.A. (2022). Estimation of glacial debris flow characteristics using a chain of mathematical models. *Geographical Bulletin*, vol. 4, no, 63, pp. 66–79. Available at: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-4-66-79> [05.02.2023]
10. Iudina (Kurovskaia) V.A., Chernomorets S.S., Krylenko I.N., Vinogradova T.A., Krylenko I.V., Savernyuk E.A., Gulomaydarov A.G., Zikillobekov I.I., Pirmamadov U.R., Raimbekov Yu.Kh. (2022). Assessment of possible consequences of outburst floods by the example of the Bodomdara river valley (Tajikistan). *Kriosfera Zemli*, vol. 26, no. 5, pp. 14–28.

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

11. Iudina V.A., Chernomoretz S.S., Savernyuk E.A., Krylenko I.V., Kidyayeva V.M. (2023) Modeling the glacial lake outburst Proceedings of the IX All-Russian scientific-practical conference with international participation " Modern problems of reservoirs and their catchments", Perm: Universal, pp. 217–222.
12. Iudina V.A., Iudin N.E., Vinogradova T.A. (2022). Program for calculation of outburst flood and debris flows (FLOVI). Certificate of state registration of the computer program no. 2022683748.
13. Cerlini P.B., Saraceni M., Silvestri L., Meniconi S, Brunone B. (2022). Monitoring the water mass balance variability of small shallow lakes by an ERA5-Land reanalysis and water level measurement-based model. An Application to the Trasimeno Lake, Italy. *Atmosphere*, vol. 13, 949 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13060949> [08.02.2023]
14. Clague J.J., and Mathews W.H. (1973). The Magnitude of Jökulhlaups. *Journal of Glaciology*, no. 12, pp. 501–504.
15. Costa J.E., Shuster R.L. (1988). The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin*, no. 100, pp. 1054–1068.
16. Evans S.F. (1986). The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-made and natural dams. *Canadian Geotechnical Journal*, no. 23, pp. 385–387.
17. Chen F., Zhang M., Guo H., Allen S., Kargel J.S., Haritashya U.K., Watson C.S. (2021). Annual 30 m dataset for glacial lakes in High Mountain Asia from 2008 to 2017. *Earth System Science Data*, no. 2, pp. 741–766.
18. Furian W., Loibl D., Schneider C. (2021). Future glacial lakes in High Mountain Asia: an inventory and assessment of hazard potential from surrounding slopes. *Journal of Glaciology*, no. 264, pp. 653–670. Available at: <https://doi.org/10.1017/jog.2021.18> [05.02.2023]
19. Harrison S., Kargel J.S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimeš, J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi Dh., Vilimek V. (2018). Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, no. 12, pp. 1195–1209. Available at: <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018> [08.02.2023]
20. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS)*. Available at: <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47> [05.02.2023]
21. Irwandi H., Rosid M.S. Mart T. (2023). Effects of Climate change on temperature and precipitation in the Lake Toba region, Indonesia, based on ERA5-land data with quantile mapping bias correction. *Scientific Reports*, no. 13, 2542 p. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29592-y> [05.02.2023]
22. Kraaijenbrink PDA, Bierkens MFP, Lutz AF and Immerzeel WW. (2017). Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. *Nature* no. 7671, pp. 257–260 Available at: <https://doi.org/10.1038/nature23878> [05.02.2023]
23. Li Zh., Wang N., Chen A., Liang Q., Yang D. (2022). Slight change of glaciers in the Pamir over the period 2000–2017. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, no. 1, pp. 13-24. Available at: <https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2028475> [08.02.2023]
24. Mergili M., Schneider J.F. (2011). Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, no. 11, pp. 1447–1462.
25. Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K., Kargel J.S., Watson C.S., Kennedy M.C., Bevington A.R., Betts R.A., Harrison S., Strattman K. (2020). Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, no. 10, pp. 939–945. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4> [08.02.2023]
26. Singh K., Snorrason A. (1984). Sensitivity of Outflow Peaks and Flood Stages to the Selection of Dam Breach Parameters and Simulation Models. *Journal of Hydrology*, no. 68, pp. 295–310.
27. Stefanidis K., Varlas G., Vourka, A., Papadopoulos A., Dimitriou E. (2021). Delineating the relative contribution of climate related variables to chlorophyll-a and phytoplankton biomass in lakes using the ERA5-Land climate reanalysis data. *Water Research*, no. 196, pp. 117053.
28. Walder J.S., Costa J.E. (1996). Outburst floods from glacier-dammed lakes: The effect of mode of lake drainage on flood magnitude. *Earth Surface Processes and Landforms*, no. 21, pp. 701–723.
29. Walder J.S., O'Connor, J.E. (1997). Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams. *Water Resources Research*, no. 33, pp. 2337–2348.
30. Wangchuk S., Bolch T. (2020). Mapping of glacial lakes using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and a random forest classifier: strengths and challenges. *Science of Remote Sensing*, no. 2, 100008 p.
31. CNES (2023). Available at: <https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/60> (Accessed 1 February 2023).
32. Sentinel Hub (2023). Available at: <https://www.sentinel-hub.com/> (Accessed 1 February 2023).
33. Google Earth (2023). Available at: <https://earth.google.com/web/@0,-2.8496,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r> (Accessed 1 February 2023).
34. ArcGIS Online (2023). Available at: <https://www.arcgis.com/h+ome/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9> (Accessed 1 February 2023)

Статья поступила в редакцию: 27.04.2023, одобрена после рецензирования: 21.09.2023, принята к опубликованию: 14.03.2024.

The article was submitted: 27 April 2023; approved after review: 21 September 2023; accepted for publication: 14 March 2024.

## Гидрология

Юдина В.А., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Кидяева В.М.

## Информация об авторах

## Information about the authors

**Виктория Антоновна Юдина**

кандидат географических наук, б/з, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей, географического факультета МГУ им. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1  
e-mail: viktoriiakurovskaia@gmail.com

**Viktoriia A. Iudina**

Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Research Laboratory for Snow Avalanches and Debris Flows, Lomonosov Moscow State University;  
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

**Сергей Семенович Черноморец**

кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ им. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

**Sergey S. Chernomorets**

Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Research Laboratory for Snow Avalanches and Debris Flows, Lomonosov Moscow State University;  
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

sc@geogr.msu.ru

**Елена Александровна Савернюк**

научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ им. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

**Elena A. Savernyuk**

Researcher, Research Laboratory for Snow Avalanches and Debris Flows, Lomonosov Moscow State University  
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

savernyuk@geogr.msu.ru

**Иван Владимирович Крыленко**

б/с, б/з, научный сотрудник в научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ им. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

**Ivan V. Krylenko**

Researcher, Makkaveev Research Laboratory for Soil Erosion and Fluvial Processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University;  
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

i-krylenko@yandex.ru

**Вера Михайловна Кидяева**

кандидат географических наук, б/з, научный сотрудник в Научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей, географического факультета МГУ им. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

**Vera M. Kidyeva**

Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Research Laboratory for Snow Avalanches and Debris Flows, Lomonosov Moscow State University  
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

vera.kidyeva@yandex.ru

**Вклад авторов**

Юдина В.А. – идея, написание статьи, обработка данных ERA5, моделирование.  
Черноморец С.С. – сбор данных, обработка материалов, научное редактирование текста.  
Савернюк Е.А. – сбор данных, обработка материалов, написание статьи.  
Крыленко И.В. – сбор данных, обработка материалов, написание статьи.  
Кидяева В.М. – сбор данных, обработка материалов.  
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors**

Viktoriia A. Iudina – the idea; writing of the article; ERA5 data processing; modeling.  
Sergey S. Chernomorets – collection of materials; data processing; scientific editing of the text.  
Elena A. Savernyuk – collection of materials; data processing; writing of the article.  
Ivan V. Krylenko – collection of materials; data processing; writing of the article.  
Vera M. Kidyeva – collection of materials; data processing.  
The authors declare no conflict of interest.