

Гидрология  
Юдина (Куровская) В.А.

## ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.4.042; 551.435.47

doi: 10.17072/2079-7877-2022-4-66-79

### ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ГЛЯЦИАЛЬНОГО СЕЛЕВОГО ПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕПОЧКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

**Виктория Антоновна Юдина (Куровская)**

Московский государственный университет им. Ломоносова, г. Москва, Россия

viktoriaakurovskaia@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-2633-3634>, Scopus ID 57211199635

**Аннотация.** Рассматривается применение цепочки математических моделей для расчета гляциального селевого потока. Моделирование выполнялось для долины р. Бодомдара для случая прорыва озера Бодомдара Нижнее (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан). Использовалась программа FLOVI, написанная на языке программирования Python, в которой объединяются уравнения для расчета гидрографа прорыва озера и характеристик селевого потока в процессе его формирования. Таким образом, для расчета гидрографа прорывного паводка применялась модель прорыва озера через внутриледниковый канал, разработанная Ю.Б. Виноградовым. Были выполнены дополнительные расчеты с изменением длины канала. Так, при уменьшении внутриледникового канала на 100 м максимальный расход может увеличиться на 7%. Оценка характеристик потока в потенциальном селевом очаге проводилась с помощью транспортно-сдвиговой модели селеобразования. В связи с тем, что исходные данные о параметрах селевого потенциального массива отсутствовали, автором были выполнены численные эксперименты с разными параметрами модели. Для моделирования потока в долине использовалась двумерная гидродинамическая модель FLO-2D. Все расчеты осуществлялись для двух сценариев: 1-й – вся цепочка математических моделей, 2-й – без транспортно-сдвиговой модели. По результатам моделирования по сценарию 2 площадь потенциальной зоны затопления оказалась меньше почти на 19%. Таким образом, использование всей цепочки моделей позволяет получить более реалистичные зоны затопления.

**Ключевые слова:** прорывной паводок, селевой поток, математическое моделирование, FLOVI, транспортно-сдвиговая модель, FLO-2D

**Сведения о финансировании:** выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-35-90006 – Моделирование селевых потоков (на примере Памира)).

**Благодарности:** автор выражает благодарности Т.А. Виноградовой за ценные советы для моделирования, сотрудникам МГУ им. Ломоносова С.С. Черноморцу, И.Н. Крыленко, И.В. Крыленко за помощь в обработке материалов, сотрудникам Филиала Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан А.Г. Гуломайдарову, И.И. Зиккилобекову, У.Р. Пирмамадову, Ю.Х. Раимбекову за предоставленные данные, Р.А. Бобову, Т.З. Сабзалиеву, Н.С. Абдуласанову, А. Акимбекову, М. Гуломносирову, М. Мародмамадову, Ф. Фидолиеву за помощь в организации полевых работ.

**Для цитирования:** Юдина В.А. Оценка характеристик гляциального селевого потока с использованием цепочки математических моделей // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 4(63). С. 66–79. doi: 10.17072/2079-7877-2022-4-66-79.

## HYDROLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-4-66-79

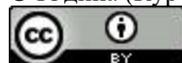
### ESTIMATION OF GLACIAL DEBRIS FLOW CHARACTERISTICS USING A CHAIN OF MATHEMATICAL MODELS

**Viktoriia A. Iudina (Kurovskaia)**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

viktoriaakurovskaia@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-2633-3634>, Scopus ID 57211199635

© Юдина (Куровская) В.А., 2022



*Гидрология*  
*Юдина (Куровская) В.А.*

**Abstract.** The paper discusses the application of a chain of mathematical models for calculating glacial debris flow. Modeling was carried out for the Bodomdara River valley for the case of an outburst of Lower Bodomdara Lake (Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Tajikistan). FLOVI program, written in the Python programming language, was applied; it combines equations for calculating the lake outburst hydrograph and the characteristics of debris flow during its formation. To calculate the outburst flood hydrograph, the model of lake outburst through an intraglacial channel developed by Yu.B. Vinogradov was used. Additional calculations were made with a change in the length of the intraglacial channel. With a decrease by 100 m, the maximum discharge can increase by 7%. The flow characteristics in a potential mudflow source were assessed using a transport-shift model of debris flow formation. Since there were no initial data on the parameters of the debris flow source, the author conducted numerical experiments. The flow in the valley was simulated using the FLO-2D hydrodynamic model. Calculations were performed for two scenarios: 1 – the entire complex of mathematical models, 2 – without the transport-shift model. According to the simulation results for scenario 2, the area of the potential flood zone was found to be less by almost 19%. Thus, the use of the entire chain of models makes it possible to obtain more realistic flood zones.

**Keywords:** outburst flood, debris flow, mathematical modeling, FLOVI, transport-shift model, FLO-2D

**Financial support:** the study was funded by the RFBR, project No. 20-35-90006.

**Acknowledgments:** the author is grateful to T.A. Vinogradova for valuable advice on modeling, to Lomonosov Moscow State University staff members: S.S. Chernomorets, I.N. Krylenko, I.V. Krylenko – for help with initial data processing, to the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan staff members: A.G. Gulomaidarov, I.I. Zikkilobekov, U.R. Pirmamadov, Yu.Kh. Raimbekov – for the provided data, and to R.A. Bobov, T.Z. Sabzaliev, N.S. Abdulasanov, A. Akimbekov, M. Gulomnosirov, M. Marodmamadov, F. Fidoliev – for help in organizing field work.

**For citation:** Iudina (Kurovskaia) V.A. (2022). Estimation of glacial debris flow characteristics using a chain of mathematical models. *Geographical Bulletin*. No. 4(63). Pp. 66–79. doi: 10.17072/2079-7877-2022-4-66-79.

### Введение

Деградация горного оледенения приводит к интенсивному образованию ледниковых озер [15; 29; 33; 38]. Каждое ледниковое озеро проходит три стадии развития: стабильное существование; серия последовательных прорывов, интенсивность которых зависит от мощности дамбы; исчезновение озера [40].

Выявление потенциально прорывоопасных озер может осуществляться с помощью данных дистанционного зондирования [38; 45]. Ледниковые озера, как правило, расположены в достаточно труднодоступных районах для организации систематического наблюдения и регулярных маршрутных обследований (однако такие примеры существуют [8; 18; 30]).

Одним из способов оценки характеристик прорыва являются эмпирические зависимости. Чаще всего в их основе лежат регрессионные уравнения [16; 19; 22; 44]. Входными параметрами обычно являются ширина плотины, высота перемычки, площадь озера и его объем. В случае, если площадь озера неизвестна, можно использовать уравнение, предложенное [24; 25]. В результате расчета обычно даются дискретное значение, пиковый расход или время наступления максимума. Примеры использования эмпирических зависимостей для расчета прорывов озера и оценка неопределенности результатов представлены в [41; 45]. Исходя из того, что эмпирические зависимости не учитывают физику процесса, их использование часто приводит к недооценке реального значения расхода прорыва [31]. Существуют модели, основывающиеся на упрощенных представлениях физических процессов [17; 32]. В таких моделях, как правило, темпы роста разрушений дамбы зависят только от времени. Входными данными являются морфометрические характеристики, включая конечную геометрию прорыва (например, ширина основания и боковой угол наклона), и время, необходимое для его полного формирования. Для расчетов прорыва озер, подпруженных мореной, также используют модель BREACH [35; 37; 47]. Развитие прорыва в данном случае зависит от свойств материала плотины: гранулометрического состава, уплотнения, удельного веса, угла внутреннего трения и прочности сцепления, но не учитывает неоднородность слагающего материала. Также применяется гидродинамическая модель NWS DAMBRK [21], основанная с помощью уравнений движения Сен-Венана.

Однако прорывы ледниковых озер могут происходить не только из-за разрушения дамбы, но и в результате образования внутриледникового канала [20; 23; 26]. Модель опорожнения озера, предложенная в работе [1], описывает развитие внутриледникового туннеля, связывая в единый процесс падение уровня воды в озере, расход истечения,

Гидрология  
Юдина (Куrowsкая) В.А.

температуру воды, возникновение туннеля, его длину и перепад уровней. Ранее эта модель использовалась для расчета прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоемов [10] и прорывов горных озер [4; 7].

Прорывной паводок в случае значительных уклонов долины и достаточного количества рыхлообломочного материала может трансформироваться в селевой поток. Для оценки характеристик селевого потока используется большое количество математических моделей [9]. Довольно часто применяются гидродинамические модели, такие как FLO-2D [34], RAMMS [43] и др. Также используются модели, где селевой поток представлен в виде материальных точек или твердых тел, например, DEBRIS [9]. В настоящее время активно используются комбинации различных математических моделей для увеличения их функционала [28; 48]. Так, например, в работе [27] для расчета прорывного паводка из озера Башкара от 1 сентября 2017 г. применялись модели STREAM\_2D и ECOMAG. Однако в данных моделях не учитывается приращение материала в ходе формирования потока в очаге. Эту проблему можно решить при использовании транспортно-сдвиговой модели селеобразования в зоне формирования селя [3]. Проведенное сравнение модельных характеристик с данными наблюдений Чемолганских экспериментов [41] показало работоспособность модели.

В данной работе впервые для расчета характеристик прорывного паводка использовалась цепочка математических моделей: модель прорыва озера для расчета гидрографа паводка, транспортно-сдвиговая для получения характеристик селевого потока в очаге и гидродинамическая модель FLO-2D для зонирования долины. Целью работы являлось проведение оценки работоспособности используемой цепочки моделей.

### Объекты и методы исследования

Моделирование выполнялось для р. Бодомдара в случае прорыва озера Бодомдара Нижнее (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан). Каскад озер располагается в верховьях р. Дармайдован, притоке Бодомдары (рис. 1).

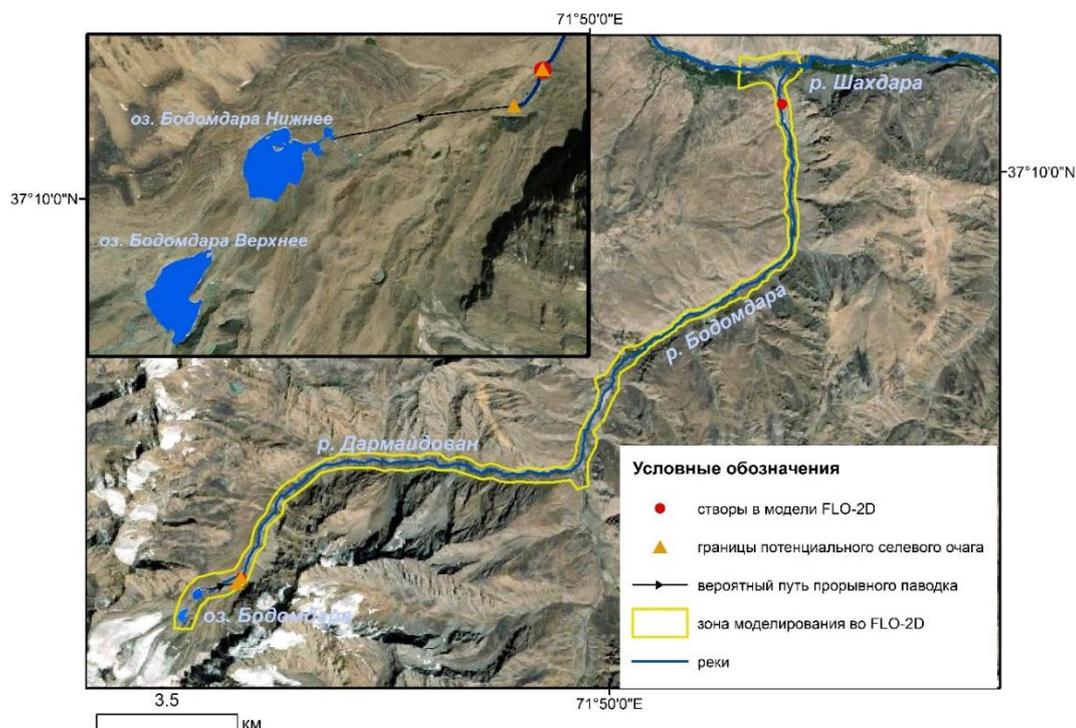


Рис.1. Схема расположения долины р. Бодомдара  
Fig.1. Location map of the Bodomdara River valley

*Гидрология*  
*Юдина (Куровская) В.А.*

Длина р. Дармайдован составляет 12 км, площадь водосбора – 65,6 км<sup>2</sup>. Длина р. Бодомдара равняется 27 км, площадь бассейна составляет 318 км<sup>2</sup>. Река Бодомдара является притоком р. Шахдара и впадает в нее в 49,5 км выше места впадения последней в р. Гунт у г. Хорог, который является административным центром ГБАО.

Продольный профиль долины Дармайдована слабовыпуклый, характерный для многих горных долин со свежими следами оледенения. Русловые деформации ограничены, морфодинамический тип русла – порожисто-водопадное слабоизвилистое или прямолинейное. В настоящее время русло р. Дармайдован не имеет характерных признаков прохождения селевых потоков. Так, отсутствуют селевой U-образный врез, селевые гряды, террасы, поля аккумуляции и конусы выноса, выдвинутые в долину Бодомдара.

В верховьях р. Дармайдован располагаются два ледниковых озера: Бодомдара Верхнее и Нижнее. Нижнее озеро существует, по меньшей мере, с последней четверти XX в., в конфигурации близкой к современной и на том же месте нанесено на крупномасштабную карту масштаба 1:100000 (лист J42-108, изд. 1988 г.). 31 июля 2020 г. сотрудником АКАН была выполнена батиметрическая съемка с помощью эхолота Lowrance Hook 5 [13]. Площадь озера составила до 54000 м<sup>2</sup>, средняя глубина по данным измерения – 6,2 м, максимальная – 21,8 м; объем озера – 343 тыс. м<sup>3</sup>. Верхнее озеро возникло в последнее десятилетие, предположительно под его ложем еще сохраняется лед. Батиметрическая съемка озера Бодомдара Верхнее не проводилась. В данной работе рассматривается вариант прорыва озера Бодомдара Нижнее.

В настоящее время долина р. Дармайдован посещается только в теплое время года. В долине р. Бодомдара и ее притоках населенных пунктов нет. В 3 км ниже устья Дармайдована на левобережной террасе и старом оползневом теле сохранились остатки хутора Бодомдара. В долине имеются несколько действующих кошей, обитаемых летом в потенциально селе- и прорывоопасный период, также возможны заходы охотников и туристов. В связи с этим рассматриваемую опасность в случае прорыва озера Бодомдара Нижнее можно отнести к потенциальной.

### **Материалы и методы**

Оценка характеристик селевого потока выполнялась с использованием цепочки математических моделей: модель прорыва озера, транспортно-сдвиговая модель селеобразования и гидродинамическая модель FLO-2D. Ранее модель прорыва озера была написана на языках программирования Fortran [4] и Delphi [10], но в открытом доступе не была опубликована.

Ранее для моделирования селевых потоков была создана компьютерная программа FLOVI на языке программирования Python. Особенностью данной программы является объединение уравнений моделей прорыва озера и транспортно-сдвигового селеобразования, каждая из которых представляет собой отдельный блок. Решение уравнений выполняется методом последовательного приближения [1]. Также была проведена модернизация транспортно-сдвиговой модели, что позволило использовать в качестве входных данных водный гидрограф и получить гидрограф селевой волны, а не одно число, как это было ранее [14]. Таким образом, гидрограф прорывного паводка, полученный по первому блоку уравнений, может быть использован во втором для расчета характеристик селя в зоне формирования. Кроме того, предусмотрен расчет отдельно селевого потока в случае, если в бассейне отсутствует озеро. Наряду с этим, в программе была реализована возможность расчета характеристик селя на участках подпитки материалом в русле. В данном случае в качестве входных данных использовался гидрограф, полученный в модели FLO-2D.

**Модель прорыва озера.** За основу модели прорыва озера, предложенной Ю.Б. Виноградовым [1; 2], взяты уравнения для расчета расхода прорывного паводка:

Гидрология  
Юдина (Куrowsкая) В.А.

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

$$x = \frac{C_0}{g} * t * \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{400 * \delta^{0.3} * l * (a * W^m)^{0.15}}{Q^{0.55} * \rho_0 * C_0} \right] \right\}, \quad (1)$$

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 тоннеля, м;  $h$  – превышение точки входа тоннеля 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·°C,  $t$  – температура воды в озере, °C. Максимальный расход прорывного паводка будет наблюдаться при  $W$ , при котором будет выполняться равенство

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

Сравнения модельных и наблюдаемых гидрографов приведены в работах [1; 3] для ледниковых озер Исландии, Британской Колумбии, Таджикистана и США. В целом рассчитанные и наблюдаемые гидрографы совпадают.

Несмотря на то, что модель разрабатывалась для озер, подпруженных ледниковой плотиной, автор полагает, что для данного объекта модель также можно применять. Озеро Бодомдара Нижнее подпружено мореной с ледяным ядром, поэтому при таянии внутреннего льда могут образоваться и каналы стока. Таким образом, вероятность того, что прорыв озера будет осуществляться сначала по каналам ледникового стока, а потом уже выйдет на поверхность, достаточно велика. Схожий случай описан в работе [20], когда при прорыве озера Тезтор, расположенного в Киргизии, сток поступал во внутриледниковые каналы и только через 400 м вышел на поверхность.

**Транспортно-сдвиговая модель селеобразования.** Модель основана на предположении о том, что приращение расхода твердого вещества в процессе формирования прямо пропорционально коэффициенту неустойчивости материала, элементарной потенциальной мощности потока и показателю подвижности селевой массы. При подготовке исходных данных потенциальный или действующий селевой очаг делится на участки с приблизительно одинаковыми уклонами. Для каждого участка производится расчет приращения твердого материала по уравнению [42]

$$l = \frac{\left[ \frac{Q\rho_0}{\zeta\rho_0 + \rho} \ln \frac{Q\rho_0 + (\zeta\rho_0 + \rho)G}{Q\rho_0 + (\zeta\rho_0 + \rho)G_0} - \frac{Q}{\zeta - \theta_{nn}} \ln \frac{Q + (\zeta - \theta_{nn})G}{Q + (\zeta - \theta_{nn})G_0} \right]}{A \frac{tg\alpha}{tg\varphi} g \sin\alpha [Q\rho_0(\zeta - \theta_{nn}) + Q(\zeta\rho_0 + \rho)]} + l_0, \quad (3)$$

где  $l$  – расстояние по тальвегу селевого очага, м;  $l_0$  – расстояние до текущего участка, м;  $G$  – расход твёрдого вещества, м<sup>3</sup>/с;  $G_0$  – начальное значение переменной  $G$  для определенного участка и результат расчёта для ему предшествующего (для первого верхнего участка  $G_0 = 0$ ), м<sup>3</sup>/с;  $\alpha$  – угол наклона тальвега селевого очага, °;  $Q$  – расходы воды, м<sup>3</sup>/с;  $\theta_{nn}$  – отношение объёма воды к объёму твёрдого вещества, но на пределе текучести (неподвижности) смеси воды и селеформирующих грунтов;  $\varphi$  – угол внутреннего трения селеформирующих грунтов, °;  $\zeta$  – отношение объёма воды к объёму твёрдого вещества, безразмерная величина;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_0$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность селеформирующих грунтов, кг/м<sup>3</sup>;  $A$  – коэффициент пропорциональности, м/с<sup>2</sup>·кг [3]. На основании немногочисленных данных, полученных при искусственном воспроизведении селевых потоков в природных условиях, было установлено, что коэффициент пропорциональности находится где-то в диапазоне  $A = (3 \div 5) \cdot 10^{-6}$  м·с<sup>2</sup>/кг, скорее, всего несколько ближе ко второму значению, приведенному в скобках [42]. Расход селевого потока определяется по следующей формуле:

## Гидрология

Юдина (Куrowsкая) В.А.

$$Qc = Q + (1 + \zeta) * G, \quad (5)$$

где  $Q$  – расход воды, поступивший в селевой очаг, м<sup>3</sup>/с. Плотность селевой массы рассчитывается для каждого участка по следующему выражению:

$$y = \frac{Q * p_0 + (\zeta * p_0 + p) * G}{Q + (1 + \zeta) * G}. \quad (6)$$

В связи с тем, что исходными гидрологическими данными для модели FLO-2D являются гидрографы, автором была модернизирована транспортно-сдвиговая модель. Была выбрана формула для расчета скорости, предложенная Ю.Б. Виноградовым [3]

$$\begin{aligned} M &= \mu / 2\gamma\beta^2, \\ N &= g(\sin\alpha - \operatorname{tg}\varphi^* \cos\alpha) / \beta^2, \\ S &= g h \sin\alpha / \beta^2, \\ V &= \left( \frac{1}{1.5Nh} \right) \left[ \left( \frac{M^2}{h^2} + S + Nh \right)^{1.5} - \left( \frac{M^2}{h^2} + S \right)^{1.5} \right] - M/h, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости потока, Па·с;  $\gamma$  – плотность селевой массы, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент сопротивления перемешиванию, безразмерный;  $\alpha$  – угол наклона тальвега селевого очага, °;  $\varphi^*$  – динамический угол внутреннего трения селеформирующих грунтов, °;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – глубина потока [3]. Преимуществами данной формулы является учет не только уклона и глубины потока, но и плотности и различных свойств потенциального селевого массива в отличие от большинства эмпирических формул [5; 11].

В первичных расчетах скорости селя глубина потока на всех участках принималась равной 1 м; зная расход селевого потока и скорость, можно получить примерную площадь поперечного сечения. Ширина потока оценивалась с помощью различных космоснимков, разрешением от 15 до 30 м. Таким образом, происходил перерасчет глубины, получившиеся значения подставлялись в расчет формулы скорости. Время прохождения волны рассчитывалось как расстояние между участками, деленное на скорость. Таким образом, был получен гидрограф селевого потока на выходе из потенциального очага.

**Гидродинамическая модель FLO-2D.** В основу модели положено решение уравнений Сен-Венана, в котором характеристики потока по глубине осредняются (так называемые уравнения «мелкой воды») [6]. При моделировании движения селевого потока в модели FLO-2D принимается, что сели движутся как жидкость Бингама (вязкопластичная жидкость) [34]. Базовое уравнение модели – уравнение для расчета уклона трения:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td}, \quad (10)$$

где  $S_f$  — уклон трения является суммой уклона поверхности  $S_y$ , уклона вязкости  $S_v$  и турбулентно-дисперсионного уклона  $S_{td}$ .

Исходными данными для модели являются топографические карты, данные промеров и топографической съемки участков долин, синтезированные в цифровые модели рельефа (ЦМР), «фоновые» расходы и уровни воды в основных руслах и притоках, входной гидрограф и его форма. Результаты моделирования могут быть представлены в виде карт пространственного распределения глубины и скорости потока, а также гидрографа на замыкающем створе.

**Сценарии и исходные данные.** В работе было рассмотрено два сценария прорывного паводка в долине. Сценарий 1 предполагает использование всех трех моделей для расчета характеристик потока. Для того чтобы оценить влияние учета приращения материала в очаге на итоговые значения характеристик потока, в сценарии 2 используются только две модели: модель прорыва озера и FLO-2D.

Морфометрические параметры чаши озера Бодомдара Нижнее а и т были получены на основе данных батиметрической съемки и составили 0,061 и 0,65 соответственно. Длина

Гидрология  
Юдина (Куровская) В.А.

подледникового канала в случае прорыва озера была оценена по цифровой модели рельефа (ЦМР) PALSAR и составила 732 м. Температура воды в озере была принята равной 2,5°C. В качестве гидрологических данных использовался гидрограф прорыва озера.

Для транспортно-сдвиговой модели в качестве данных о рельефе использовалась ЦМР PALSAR (размер ячейки — 12,5 м) [49]. По результатам геоморфологического анализа долины был определен наиболее вероятный путь прохождения возможного прорывного паводка. Границы потенциального селевого очага были выделены в результате анализа уклонов поверхности. Таким образом, очаг располагается на морене в верховьях р. Дармайдован со средним уклоном в 13° (рис.1). Для оценки параметров потенциального селевого массива, таких как угол внутреннего трения массива, плотность и влажность, были выполнены численные эксперименты.

Для модели FLO-2D рельеф был получен также с использованием ЦМР PALSAR [49]. После корректировки все данные о рельефе были интерполированы в расчетную сетку модели с шагом 12,5×12,5 м. Для конуса выноса р. Бодомдара использовалась ЦМР, полученная в ходе обработки снимков с БПЛА (беспилотного летательного аппарата). Разрешение цифровой модели местности для конуса выноса составило 1 м. Наиболее вероятные параметры селевых потоков были заданы на основе материалов предыдущих исследований [36]. По сценарию 1 на выходе из очага по данным моделирования по плотности поток можно было отнести к грязевому по классификации [3], объемная концентрация в модели FLO-2D была задана как 29%. Для сценария 2 без применения транспортно-сдвиговой модели была использована меньшая объемная концентрация – 22% в соответствии с [34]. Базовый расход в р. Бодомдара задавался равным 5 м<sup>3</sup>/с на основе данных полевых исследований, для р. Шахдара – 30 м<sup>3</sup>/с с использованием данных [12].

### Результаты моделирования

Максимальный расход прорывного паводка согласно результатам моделирования составит 167 м<sup>3</sup>/с, время наступления максимума – 57 мин с начала прорыва. Дополнительно были проведены расчеты с уменьшением длины канала на 100 м. Максимальный расход в таком случае будет равняться 179 м<sup>3</sup>/с. Как видим, разница в данном случае составляет не более 12 м<sup>3</sup>/с, т.е. 7%.

Далее осуществлялись расчеты в транспортно-сдвиговой модели селеобразования. В связи с тем, что данные параметров потенциального селевого массива, такие как угол внутреннего трения породы (УГВТ) ( $\varphi$ ), начальная влажность ( $\zeta$ ) и плотность ( $\rho$ ), отсутствуют, автором были проведены численные эксперименты (рис. 2).

Из рисунка видно, что наибольшее влияние оказывает именно начальная влажность потенциального селевого массива. При расчете с использованием наибольшей влажности расход селевого потока значительно увеличивается примерно от 146 до 186 м<sup>3</sup>/с по сравнению с абсолютно сухим потенциальным селевым массивом. Угол внутреннего трения и плотность также влияют на значение максимального расхода, но значительно меньше. Так, при уменьшении угла внутреннего трения пиковый расход потока может возрастать на 43–83 м<sup>3</sup>/с для различных вариантов. При увеличении плотности массива на 600 кг/м<sup>3</sup> расход потока будет увеличиваться примерно на 40 м<sup>3</sup>/с.

Измерения данных параметров в полевых условиях достаточно затруднительны, так как потенциальный селевой массив может состоять не только из мелкодисперсного наполнителя, но и огромных валунов, что значительно затрудняет возможность определения. Получение точечных данных не будет отображать весь диапазон значений в селевом очаге.

Для моделирования потока в долине ниже по течению использовался 1-й вариант (рис. 2), чтобы показать, что даже в случае возникновения потока при низкой начальной влажности и плотности массива зона затопления на конусе окажется значительной.

Гидрология  
Юдина (Куровская) В.А.

Таким образом, максимальный расход на выходе из потенциального селевого очага по 1-му сценарию составит  $459 \text{ м}^3/\text{с}$ . Плотность потока –  $1637 \text{ кг}/\text{м}^3$ , что соответствует грязевому потоку по классификации [3].

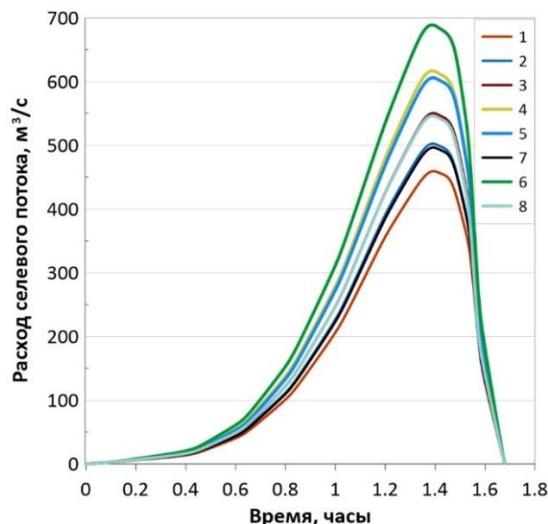


Рис. 2. Результаты численных экспериментов в транспортно-сдвиговой модели по 8 вариантам: 1-й вариант – начальная влажность = 0, УГВТ = 40, плотность = 2000; 2 – начальная влажность = 0, УГВТ = 35, плотность = 2000; 3 – начальная влажность = 0,133, УГВТ = 40, плотность = 2000; 4 – начальная влажность = 0,133, УГВТ = 35, плотность = 2000; 5 – начальная влажность = 0,2, УГВТ = 40, плотность = 2000; 6 – начальная влажность = 0,2, УГВТ = 35,  $\rho = 2000$ ; 7 – начальная влажность = 0, УГВТ = 40, плотность = 2600; 8 – начальная влажность = 0, УГВТ = 35, плотность = 2600

Fig. 2 The results of numerical experiments in the transport-shift model for 8 cases: case 1 – initial humidity = 0, angle of internal friction = 40, density = 2,000; 2 – initial humidity = 0, angle of internal friction = 35, density = 2,000; 3 – initial humidity = 0.133, angle of internal friction = 40, density = 2,000; 4 – initial humidity = 0.133, angle of internal friction = 35, density = 2,000; 5 – initial humidity = 0.2, angle of internal friction = 40, density = 2,000; 6 – initial humidity = 0.2, angle of internal friction = 35, density = 2,000; 7 – initial humidity = 0, angle of internal friction = 40, density = 2,600; 8 – initial humidity = 0, angle of internal friction = 35, density = 2600

Для сценария 2 в качестве входных гидрологических данных использовался гидрограф прорыва озера. На вершине конуса расход выноса согласно результатам моделирования по 1-му сценарию составит  $143 \text{ м}^3/\text{с}$ , время добегания – 1,67 ч. Для сценария 2 время добегания максимального расхода до вершины конуса выноса р. Бодомдара будет составлять 2,09 ч. Однако максимальный расход будет в 1.8 раз меньше, чем по сценарию 1, и составит  $81 \text{ м}^3/\text{с}$  при входном в  $167 \text{ м}^3/\text{с}$  (таблица).

Максимальные расходы и время добегания по результатам моделирования с использованием цепочки математических моделей

Maximum discharges and the time of water travel based on simulation using the chain of mathematical models

№ n/n	Участок моделирования	1-й сценарий $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	1-й сценарий $t, \text{ ч}$	2-й сценарий $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	2-й сценарий $t, \text{ ч}$
1	Расход прорывного паводка	167	2,39	167	2,39
2	На выходе из очага	459	2,40	–	–
3	Вершина конуса р. Бодомдара	143	4,07	81	4,48

В долине р. Бодомдара максимальная скорость потока для сценария 1 будет составлять  $15,3 \text{ м}/\text{с}$ , для 2-го – до  $12,9 \text{ м}/\text{с}$ . Максимальная глубина потока для сценария 1 составляет  $5,5 \text{ м}$ , для 2-го сценария –  $4,2 \text{ м}$ . На конусе выноса поток растекается с затоплением большей части конуса. Распределение скорости потока по сценарию 1 представлено на рис. 3, а.

Гидрология  
Юдина (Куровская) В.А.

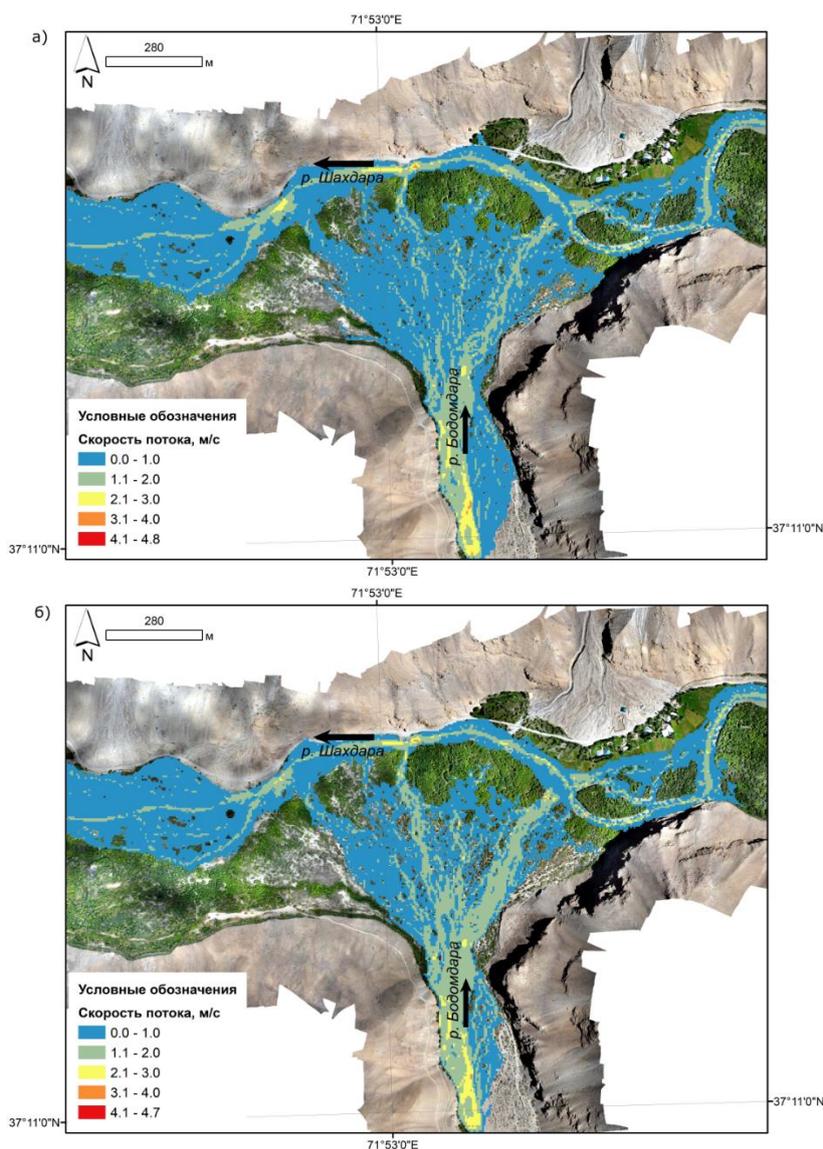


Рис. 3. Скорость течения на конусе выноса р. Бодомдара по результатам моделирования в программном комплексе FLO-2D: *а* – для сценария 1, *б* – для сценария 2

Fig. 3. Flow velocity on the alluvial fan of the Bodomdara River according to the results of modeling in FLO-2D software package, *a* – for scenario 1, *b* – for scenario 2

Глубина потока варьируется от 0,5 м до 4,6 м, наибольшие глубины наблюдаются в русле р. Шахдара. Наибольшая глубина потока по сценарию 2 составит 4,3 м и также будет наблюдаться в русле р. Шахдара. Плановое распределение скорости потока на конусе по сценарию 2 представлено на рис. 3, *б*.

Общая площадь зоны затопления, согласно сценарию 1, составит 638805 м<sup>2</sup>, для сценария 2 без использования транспортно-сдвиговой зона затопления уменьшится на 119532 м<sup>2</sup>, т.е. почти на .19%. Однако в настоящее время долина р. Бодомдара освоена незначительно, поэтому данная опасность, скорее, потенциальная и должна быть учтена при развитии сельского хозяйства и постройке жилых зданий в долине.

### Заключение

Была проведена оценка использования цепочки математических моделей: модель прорыва озера, модель транспортно-сдвигового селеобразования, объединённые

*Гидрология*  
*Юдина (Куrowsкая) В.А.*

в компьютерной программе FLOVI и FLO-2D при моделировании гляциального селевого потока. В качестве объекта исследования была выбрана долина р. Бодомдара, в верховьях которой располагаются два ледниковых озера. Автор статьи рассматривает только сценарий прорыва озера Бодомдара Нижнее с объемом, согласно батиметрической съемке, выполненной в 2020 г., 343 тыс. м<sup>3</sup>. Моделирование выполнялось по двум сценариям: 1 – с использованием всей цепочки моделей, 2 – без транспортно-сдвиговой модели. Гидрограф прорывного паводка был получен с помощью модели прорыва озера, разработанной Ю.Б. Виноградовым [2]. Была продемонстрирована возможность использования данной модели не только для озер, подпруженных ледниковой дамбой, но и в случае морены с ледяным ядром. Результаты расчетов с уменьшением длины канала на 100 м показали, что максимальный расход может увеличиться на 7%.

При расчетах селевого потока в очаге использовалась транспортно-сдвиговая модель селеобразования. Проведенные численные эксперименты с изменениями параметров потенциального селевого массива, таких как угол внутреннего трения породы, начальная плотность и влажность массива, выявили, что модель наиболее чувствительная к значениям начальной влажности. Для моделирования долины ниже по течению был выбран вариант задания исходных параметров с абсолютно сухим потенциальным массивом и низкой его плотностью для того, чтобы показать, что даже в этом случае может сформироваться поток, приводящий к значительным затоплениям. По результатам гидродинамического моделирования были получены значения скорости и глубины потока. Также при сравнении зоны затопления по сценарию 1 с использованием транспортно-сдвиговой модели и по сценарию 2 без нее было показано, что площадь затопления отличается почти на 19%. Таким образом, можно говорить о том, что использование транспортно-сдвиговой модели в цепочке моделей позволяет учитывать приращение твердого материала в селевом очаге и получать более реалистичную картину зоны затопления.

**Список источников**

1. Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // Селевые потоки. 1976. № 1. С. 138–153.
2. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 154 с.
3. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Изд-во Академия, 2010. 304 с.
4. Гнездилов Ю.А., Иващенко Е.Н., Красных Н.Ю. Оценка гипотетического прорыва озера Башкара // Сб. науч. тр. ОАО Севкавгипроводхоз. Пятигорск, 2007. Вып. 17. С. 123–145.
5. Голубцов В.В. О гидравлическом сопротивлении и формуле для расчета средней скорости течения горных рек // Труды КазНИГМИ. 1969. Вып. 33. С. 30–41.
6. Кюнж Ж.А., Холли Ф.М., Вервей А. Численные методы в задачах речной гидравлики. М.: Энергоатомиздат, 1985. 255 с.
7. Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Алейников А.А., Штоффел М., Граф К. Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер // Геориск. 2018. Т. 12, № 2. С. 38–46.
8. Медеу А.Р., Аскарлова М.А., Благовещенский В.П., Ранова С.У., Степанов Б.С. Концепция мониторинга селевой опасности в Иле Алатау // Труды 5-й Межд. конф. «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Тбилиси, Грузия, 1–5 октября 2018 г. Тбилиси: Универсал, 2018. С. 492–498.
9. Михайлов В.О., Черноморец С.С. Математическое моделирование селей, обвалов и оползней. М.: Ламберт, 2011. 131 с.
10. Попов С.В., Пряхина Г.В., Боронина А.С. Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоёмов // Криосфера Земли. 2019. Т. 23(3), С. 25–32.
11. РД 52.30.238-90. Руководство селестокосным станциям и гидрографическим партиям. Организация и проведение работ по изучению селей. М.: Гидрометеиздат, 1990. Вып. 1. 199 с.
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Бассейн р. Амударья. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с. URL: <http://www.cawaterinfo.net/library/rus/hist/resources-amudary> (дата обращения: 23.02.2022).

## Гидрология

Юдина (Куровская) В.А.

13. Черноморец С.С., Висхаджиева К.С., Кидяева В.М., Юдина (Куровская) В.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Савернюк Е.А., Аршинова М.А., Черноморец М.С. Батиметрическая съемка озера Сарез (1 этап): отчет. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2020.
14. Юдина (Куровская) В.А., Черноморец С.С., Виноградова Т.А., Крыленко И.Н. Моделирование селевых потоков снегового генезиса (на примере реки Барсемдара, Таджикистан) // Криосфера Земли. 2022. Т. 26(3), С. 51–63.
15. Bajracharya S.R., Maharjan S.B., Shrestha F., Sherpa T.C., Wagle N., Shrestha A.B. Inventory of glacial lakes and identification of potentially dangerous glacial lakes in the Koshi, Gandaki, and Karnali River Basins of Nepal, the Tibet Autonomous Region of China // International Centre for Integrated Mountain Development GPO. 2020. 54 p.
16. Blown I.G., Church M. Catastrophic lake drainage within the Homathko River basin, British Columbia // Can. Geotech. J. 1985. V. 22. P. 551–563.
17. Capart H. Analytical solutions for gradual dam breaching and downstream river flooding // Water Resour. Res. 2013. V. 49. P. 1968–1987.
18. Chakraborty I.S., Das S., Rai N., Patra A., Dhar A., Sadhu A., Gautam B., Verma P., Singh A., Sherpa C., Karn L. Development of UAV based glacial lake outburst monitoring system // IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2019. P. 9372–9375. available at: <http://doi:10.1109/IGARSS.2019.8900454> (Accessed 7 February 2022).
19. Costa J.E., Schuster R.L. The formation and failure of natural dams // Geol. Soc. Am. Bull. 1988. V. 100. P. 1054–1068.
20. Erokhin S.A., Zaginaev V.V., Meleshko A.A. Ruiz-Villanueva V., Petrakov, D., Chernomoretz S.S., Viskhadzhieva K., Tutubalina O. Debris flows triggered from non-stationary glacier lake outbursts: the case of the Teztor Lake complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan) // Landslides. 2018. V. 15. P. 83–98. doi: 10.1007/s10346-017-0862-3.
21. Fread D.L. BREACH: An erosion model for earthen dam failures // Office of Hydrology, National Weather Service. Silver Spring, 1988. 35 p.
22. Froehlich D.C. Peak outflow from breached embankment dam // J. Water Resour. Plan. Manag. 1995. V. 121. P. 90–97.
23. Hewitt K., Jingshi L. Ice-dammed lakes and outburst floods, Karakoram Himalaya: historical perspectives on emerging threats // Physical Geography. 2010. V. 31, N. 6. P. 528–551.
24. Huggel C., Haeblerli W., Käab A., Hoelzle M., Ayros E., Portocarrero C. Assessment of glacier hazards and glacier runoff for different climate scenarios based on remote sensing data: a case study for a hydropower plant in the Peruvian Andes // EARSeL eProc. 2000. V. 2. P. 22–33.
25. Huggel C., Käab A., Haeblerli W., Teyssie P., Paul F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps // Can. Geotech. J. 2002. V. 39. P. 316–330.
26. Huss M., Bauder A., Werder M., Funk M., Hock R. Glacier-dammed lake outburst events of Gornensee, Switzerland // Journal of Glaciology. 2007. V. 53, N. 181. P. 189–200.
27. Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A. Modeling of extreme hydrological events in the Baksan river basin, the central Caucasus, Russia // Hydrology. 2021. V. 8, N. 24. P. 1–24.
28. Lala J.M., Rounce D.R., McKinney D.C. Modeling the glacial lake outburst flood process chain in the Nepal Himalaya: reassessing Imja Tsho's hazard // Hydrology and Earth System Science. 2018. N. 22. P. 3721–3737. doi: 10.5194/hess-22-3721-2018
29. Luo W., Zhang G., Chen W., Xu F. Response of glacial lakes to glacier and climate changes in the western Nyainqentanglha range // Science of The Total Environment. 2020. V. 735. P. 139607. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139607.
30. Maurer J.M., Schaefer J.M., Russell J.B., Rupper S., Wangdi N., Putnam A.E., Young N. Seismic observations, numerical modeling, and geomorphic analysis of a glacier lake outburst flood in the Himalayas // Science Advances. 2020. V. 6, N. 38. doi: 10.1126/sciadv.aba3645.
31. Mergili M., Schneider J.F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 1447–1462.
32. Morris M.W., Hassan M., Kortenhaus A., Geisenhaines P., Visser P.J., Zhu Y. Modelling breach initiation and growth // Flood Risk Management: Research and Practice. London, 2009. P. 581–591.
33. Mutschmann A., Huggel C., Carey M., Moulton H., Walker-Crawford N., Muñoz R. Losses and damages connected to glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru // Climatic Change. 2020. V. 162(2). P. 837–858. doi: 10.1007/s10584-020-02770-x.
34. O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood, mudflow simulation // J. Hydraulic Engineering. ASCE. 1993. V. 119, N. 2. P. 244–259.
35. O'Connor J.E., Hardison J.H., Costa J.E. Debris flows from failures of Neoglacial-age moraines in the Three Sisters and Mount Jefferson wilderness areas, Oregon // US Geol. Surv. Prof. Pap. 2001. P. 1606.

## Гидрология

Юдина (Куровская) В.А.

36. Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyaeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., Seynova I.B. Monitoring of Bashkara Glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst // *Natural hazards*. 2012. V. 61, N. 3. P. 1293–1316.
37. Shrestha A.B., Eriksson M., Mool P., Ghimire P., Mishra B., Khanal N.R. Glacial lake outburst flood risk assessment of Sun Koshi basin, Nepal // *Geomatics Nat. Hazards Risk*. 2010. V. 1. P. 157–169.
38. 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 // *Nat. Clim. Chang.* 2020. V. 10. P. 939–945. doi: 10.1038/s41558-020-0855-4.
39. Strozzi T., Wiesmann A., Käab A., Joshi S., Mool P. Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2012. V. 12. P. 2487–2498, available at: <http://doi.org/10.5194/nhess-12-2487-2012> (Accessed 11 February 2022).
40. Thorarinsson S. Chapter IX. The ice dammed lakes of Iceland with particular reference to their values as indicators of glacier oscillations // *Geografiska Annaler*. 1939. V. 21(3–4). P. 216–242.
41. Thornton C.I., Pierce M.W., Abt S.R. Enhanced predictions for peak outflow from breached embankment dams // *J. Hydrol. Eng. ASCE*. 2011. V. 16. P. 81–88.
42. Vinogradova T.A., Vinogradov A.Yu. The Experimental Debris Flows in the Chemolgan River Basin // *Natural Hazards*. 2017. V. 88. P. 189–198.
43. Voellmy A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen // *Schweizer. Bauzeitung*. 1995. V. 73. N. 12. P. 159–162.
44. Wahl T. Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: A Literature Review and Needs Assessment. Water Resources Research Laboratory. Denver, 1998. P. 67.
45. Wahl T. Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters // *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 2004. V. 5. P. 389–397.
46. Wangchuk S., Tobias Bolch T., Zawadzki J. Towards automated mapping and monitoring of potentially dangerous glacial lakes in Bhutan Himalaya using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar data // *International Journal of Remote Sensing*. 2019. V. 40(12). P. 4642–4667. doi: 10.1080/01431161.2019.1569789.
47. Xin W., Shiyin L., Wanqin G., Junli X. Assessment and simulation of Glacier Lake Outburst Floods for Longbasaba and Pida Lakes, China // *Mt. Res. Dev.* 2008. V. 28. P. 310–317.
48. Zhang, L., Lu, J., Chen, X., Sauvage, S., Sánchez Pérez, J. Stream flow simulation and verification in ungauged zones by coupling hydrological and hydrodynamic models: A case study of the Poyang Lake ungauged zone // *Hydrology and Earth System Science*. 2018. N.21. doi: 10.5194/hess-21-5847-2017, 2017.
49. URL: <https://search.asf.alaska.edu/#/> (last visited: 11.01.2022).

## References

1. Vinogradov, Yu.B. (1976), Method of calculating the flood hydrograph during the breakout of a glacier-loaded lake. *Mudflows*, no. 1, pp. 138–153.
2. Vinogradov, Yu.B. (1977), *Glacial breakthrough floods and mudflows*, Leningrad: Gidrometeoizdat.
3. Vinogradov, Yu.B., Vinogradova, T.A. (2020), *Mathematical modeling in hydrology*, Moscow: Akademiia.
4. Gnezdilov, Yu.A., Ivashhenko, E.N., Krasnyh, N.Yu. (2007), Assessment of a hypothetical breakthrough of Lake Bashkara. In: *JSC Sevkaigiprovodhoz*, Pyatigorsk, vol. 17, pp. 123–145.
5. Golubcov, V.V. (1969), On hydraulic resistance and the formula for calculating the average flow rate of mountain rivers, *Works of KazNIGMI*, vol. 33, pp. 30–41.
6. Kyunzh, Zh.A., Holli, F.M., Vervey, A. (1985), *Numerical methods in problems of river hydraulics*, Energoatomizdat, Moscow.
7. Kidiaeva, V.M., Petrakov, D.A., Krylenko, I.N., Aleynikov, A.A., Stoffel, M., Graf K. (2018), The experience of modeling the breakthrough of the Bashkara lakes, *Georisk*, vol. 12, no. 2, pp. 38–46.
8. Medeu, A.R., Askarova, M.A., Blagoveshhenskiy, V.P., Ranova, S.U., Stepanov, B.S. (2018), The concept of monitoring mudflow hazards in the Alatau silt, *Proceedings of the 5th International Conference "Mudflow flows: disasters, risk, forecast, protection"*, Tbilisi: Universal, pp. 492–498.
9. Mikhailov, V.O., Chernomorets, S.S. (2011), *Mathematical modeling of mudflows, collapses and landslides*, Moscow: Lambert.
10. Popov, S.V., Priakhina, G.V., Boronina, A.S. (2019), Assessment of water consumption in the process of development of breakthrough flood of glacial and subglacial reservoirs, *Kriosfera Zemli*, vol. 23(3), pp. 25–32.
11. RD 52.30.238-90 (1990), *Management of mudflow stations and hydrographic parties. Organization and conduct of work on the study of mudflows*, Moscow: Hydrometeoizdat, vol. 1, 199 p.
12. Surface water resources of the USSR (1971), *Volume 14. Central Asia. Issue 3. Amudar'ia river basin*, Leningrad: Hydrometeoizdat, available at: <http://www.cawaterinfo.net/library/rus/hist/resources-amudarya> (Accessed 23 February 2022).

## Гидрология

Юдина (Куровская) В.А.

13. Chernomorets, S.S., Vishadzhieva, K.S., Kidiaeva, V.M., Yudina (Kurovskaia), V.A., Krylenko, I.V., Krylenko, I.N., Savernyuk, E.A., Arshinova, M.A., Chernomorets, M.S. (2020), *Bathymetric survey of Lake Sarez (Stage 1). Report*, Moscow: Geographical Faculty of Lomonosov Moscow State University.
14. Iudina (Kurovskaia) V.A., Chernomorets S.S., Vinogradova T.A., Krylenko I.N. Modeling of debris flow triggered by snow melting: case study of the Barsemdara river, Tajikistan. *Kriosfera Zemli*, vol. 26(3), pp. 51–63.
15. Bajracharya, S.R., Maharjan, S.B., Shrestha, F., Sherpa, T.C., Wagle N., Shrestha A.B. (2020), *Inventory of glacial lakes and identification of potentially dangerous glacial lakes in the Koshi, Gandaki, and Karnali River Basins of Nepal, the Tibet Autonomous Region of China*, International Centre for Integrated Mountain Development GPO.
16. Blown, I.G., Church, M. (1985), Catastrophic lake drainage within the Homathko River basin, British Columbia, *Can. Geotech. J.*, vol. 22, pp. 551–563.
17. Capart, H. (2013), Analytical solutions for gradual dam breaching and downstream river flooding, *Water Resour. Res.*, vol. 49, pp. 1968–1987.
18. Chakraborty, I.S., Das, S., Rai, N., Patra, A., Dhar, A., Sadhu, A., Gautam, B., Verma, P., Singh, A., Sherpa, C., Karn, L. (2019), Development of UAV based glacial lake outburst monitoring system. In: *IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. pp. 9372–9375, available at: <http://doi:10.1109/IGARSS.2019.8900454> (Accessed 7 February 2022).
19. Costa, J.E., Schuster, R.L. (1988). The formation and failure of natural dams, *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 100, pp. 1054–1068.
20. Erokhin, S.A., Zaginaev, V.V., Meleshko, A.A. Ruiz-Villanueva, V., Petrakov, D., Chernomorets, S.S., Viskhadzhieva, K. and Tutubalina, O. (2018), Debris flows triggered from non-stationary glacier lake outbursts: the case of the Teztor Lake complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan). *Landslides*, vol. 15, pp. 83–98. doi: 10.1007/s10346-017-0862-3.
21. Fread, D.L. (1988), *BREACH: An erosion model for earthen dam failures*, Office of Hydrology, National Weather Service, Silver Spring.
22. Froehlich, D.C. (1995), Peak outflow from breached embankment dam, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 121, pp. 90–97.
23. Hewitt, K., Jingshi, L. (2010), Ice-dammed lakes and outburst floods, Karakoram Himalaya: historical perspectives on emerging threats, *Physical Geography*, vol. 31, no. 6, pp. 528–551.
24. Huggel, C., Haeberli, W., Käab, A., Hoelzle, M., Ayros, E., Portocarrero, C. (2000), Assessment of glacier hazards and glacier runoff for different climate scenarios based on remote sensing data: a case study for a hydropower plant in the Peruvian Andres, *EARSel eProc.*, vol. 2, pp. 22–33.
25. Huggel, C., Käab, A., Haeberli, W., Teysseire, P., Paul, F. (2002), Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps, *Can. Geotech. J.*, vol. 39, pp. 316–330.
26. Huss, M., Bauder, A., Werder, M., Funk, M., Hock, R. (2007), Glacier-dammed lake outburst events of Gornensee, Switzerland. *Journal of Glaciology*, vol. 53, no. 181, pp. 189–200.
27. Kornilova, E.D., Krylenko, I.N., Rets, E.P., Motovilov, Y.G., Bogachenko, E.M., Krylenko, I.V., Petrakov, D.A. (2021), Modeling of extreme hydrological events in the baksan river basin, the central Caucasus, Russia. *Hydrology*, vol. 8, no. 24, pp. 1–24.
28. Lala, J.M., Rounce, D.R., McKinney, D.C. (2018), Modeling the glacial lake outburst flood process chain in the Nepal Himalaya: reassessing Imja Tsho's hazard, *Hydrology and Earth System Science*, vol. 22, pp. 3721–3737.
29. Luo, W., Zhang, G., Chen, W., Xu, F. (2020), Response of glacial lakes to glacier and climate changes in the western Nyainqentanglha range, *Science of The Total Environment*, vol. 735, 139607. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139607.
30. Maurer, J.M., Schaefer, J.M., Russell, J.B., Rupper, S., Wangdi, N., Putnam, A.E., Young, N. (2020), Seismic observations, numerical modeling, and geomorphic analysis of a glacier lake outburst flood in the Himalayas, *Science Advances*, vol. 6, no. 38. doi: 10.1126/sciadv.aba3645.
31. Mergili, M., Schneider, J.F. (2011), Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 11, pp. 1447–1462.
32. Morris, M.W., Hassan, M., Kortenhaus, A., Geisenhaines, P., Visser, P.J., Zhu, Y. (2009), Modelling breach initiation and growth, *Flood Risk Management: Research and Practice*, London, pp. 581–591.
33. Motschmann, A., Huggel, C., Carey, M., Moulton, H., Walker-Crawford, N., Muñoz, R. (2020), Losses and damages connected to glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, *Climatic Change*, vol. 162(2), pp. 837–858. doi: 10.1007/s10584-020-02770-x.
34. O'Brien, J., Julien, P., Fullerton, W. (1993), Two-dimensional water flood, mudflow simulation, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 119, no. 2, pp. 244–259.
35. O'Connor, J.E., Hardison, J.H., Costa, J.E. (2001), Debris flows from failures of Neoglacial-age moraines in the Three Sisters and Mount Jefferson wilderness areas, Oregon, *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, 1606 p.

## Гидрология

Юдина (Куровская) В.А.

36. Petrakov, D.A., Tutubalina, O.V., Aleinikov, A.A., Chernomorets, S.S., Evans, S.G., Kidyaeva, V.M., Krylenko, I.N., Norin, S.V., Shakhmina, M.S., Seynova, I.B. (2012), Monitoring of Bashkara Glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst, *Natural hazards*, vol. 61, no. 3, pp. 1293–1316.
37. Shrestha, A.B., Eriksson, M., Mool, P., Ghimire, P., Mishra, B., Khanal, N.R. (2010), Glacial lake outburst flood risk assessment of Sun Koshi basin, Nepal, *Geomatics Nat. Hazards Risk*, vol. 1, pp. 157–169.
38. 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. *Nat. Clim. Chang.*, vol. 10, pp. 939–945, available at: <http://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4> (Accessed 13 February 2022).
39. Strozzi, T., Wiesmann, A., Käab, A., Joshi, S., Mool, P. (2012), Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 12, pp. 2487–2498, available at: <http://doi.org/10.5194/nhess-12-2487-2012> (Accessed 11 February 2022).
40. Thorarinsson, S. (1939), Chapter IX. The ice dammed lakes of Iceland with particular reference to their values as indicators of glacier oscillations, *Geografiska Annaler*, vol. 21(3–4), pp. 216–242.
41. Thornton, C.I., Pierce, M.W., Abt, S.R. (2011), Enhanced predictions for peak outflow from breached embankment dams, *J. Hydrol. Eng.*, ASCE, vol. 16, pp. 81–88.
42. Vinogradova, T.A., Vinogradov, A.Yu. (2017), The Experimental Debris Flows in the Chemolgan River Basin, *Natural Hazards*, vol. 88, pp. 189–198.
43. Voellmy, A. (1995), Über die Zerstörungskraft von Lawinen, *Schweizer. Bauzeitung*, vol. 73, no. 12, pp. 159–162.
44. Wahl, T. (1998), *Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: A Literature Review and Needs Assessment*, Denver: Water Resources Research Laboratory.
45. Wahl, T. (2004), Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters, *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, vol. 5, pp. 389–397.
46. Wangchuk, S., Tobias, Bolch, T., Zawadzki, J. (2019), Towards automated mapping and monitoring of potentially dangerous glacial lakes in Bhutan Himalaya using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 40(12), pp. 4642–4667, available at: <http://doi.org/10.1080/01431161.2019.1569789> (Accessed 20 February 2022).
47. Xin, W., Shiyin, L., Wanqin, G., Junli, X. (2008), Assessment and simulation of Glacier Lake Outburst Floods for Longbasaba and Pida Lakes, China, *Mt. Res. Dev.*, vol. 28, pp. 310–317.
48. Zhang, L., Lu, J., Chen, X., Sauvage, S., Sánchez Pérez, J. (2017), Stream flow simulation and verification in ungauged zones by coupling hydrological and hydrodynamic models: A case study of the Poyang Lake ungauged zone, *Hydrology and Earth System Science*, vol. 21, pp. 1–26.
49. Available at: <https://search.asf.alaska.edu/#/> (Accessed 11 January 2022).

Статья поступила в редакцию: 18.04.2022; одобрена после рецензирования: 08.08.2022; принята к опубликованию: 13.12.2022.

The article was submitted: 18 April 2022; approved after review: 08 August 2022; accepted for publication: 13 December 2022.

## Информация об авторе

**Виктория Антоновна Юдина (Куровская)**

инженер 2 категории НИЛ снежных лавин и селей географического факультета МГУ им. Ломоносова (Москва, Россия), аспирант кафедры гидрологии суши МГУ им. Ломоносова;

119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

## Information about the author

**Viktoriia A. Iudina (Kurovskaia)**

Engineer of the 2nd category of the Research Laboratory of snow avalanches and debris flows, Lomonosov Moscow State University;

1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

e-mail: viktoriiakurovskaia@gmail.com