КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 5, с. 14–28 **https://www.sibran.ru**

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 551.4.042; 551.435.47 DOI: 10.15372/KZ20220502

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРОРЫВНЫХ ПАВОДКОВ НА ПРИМЕРЕ ДОЛИНЫ РЕКИ БОДОМДАРА (ТАДЖИКИСТАН)

В.А. Юдина (Куровская)[1], С.С. Черноморец[1], И.Н. Крыленко[1,2], Т.А. Виноградова[3], И.В. Крыленко[1], Е.А. Савернюк[1], А.Г. Гуломайдаров[4], И.И. Зикиллобеков[4], У.Р. Пирмамадов[4], Ю.Х. Раимбеков[4]

[1] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; viktoriiakurovskaia@gmail.com, devdorak@gmail.ru, i-krylenko@yandex.ru, savernyuk@gmail.com*
[2] *Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия; krylenko_i@mail.ru*
[3] *ООО НПО "Гидротехпроект", 175400, Валдай, Новгородская обл., ул. Октябрьская, 55А, Россия; vinograd1950@mail.ru*
[4] *Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, 737450, Душанбе, ул. Мирзо Турсунзаде, 23, Таджикистан; amiraidar.ghulomaidarov@akdn.org, inom.zikillobekov@akdn.org, ubaidullo.pirmamadov@ardn.org, yusuf.raimbekov@akdn.org*

Рассмотрены предпосылки и моделирование возможных прорывных паводков в долине реки Бодомдара (Таджикистан) с использованием детальных полевых данных. По результатам маршрутного обследования установлено, что озеро Бодомдара Верхнее является наледниковым, что предполагает его дальнейший прорыв и, в свою очередь, может привести к каскадному прорывному паводку. Чаша озера Бодомдара Нижнее относительно стабильна, его прорыв возможен и без каскадного паводка при аномально высоких температурах, снеготаянии в сочетании с экстремальными дождевыми осадками. Было рассмотрено два вероятных сценария: I – прорыв озера Бодомдара Нижнее (по результатам батиметрической съемки 2020 г. объем составил 328 тыс. м^3); II – каскадный прорыв озер Бодомдара Верхнее и Нижнее (объемом 700 тыс. м^3). В качестве данных о рельефе использовались цифровая модель рельефа ALOS PALSAR (12.5 м), а для конуса р. Бодомдара – цифровая модель на основе снимков с беспилотного летательного аппарата. Гидрограф прорывного паводка для сценария I был получен с использованием модели прорыва озера, разработанной Ю.Б. Виноградовым, для сценария II – с помощью эмпирической формулы. Приращение материала оценивалось в транспортно-сдвиговой модели селеобразования. Полученный гидрограф использовался для зонирования долин рек Бодомдара и Шахдара суммарной протяженностью 75 км на основе модели FLO-2D. По результатам моделирования в вершине устьевого конуса выноса р. Бодомдара по сценарию I максимальный расход составит 143 м^3/с, по сценарию II равен 348 м^3/с.

Ключевые слова: *прорывные паводки, селевые потоки, транспортно-сдвиговая модель, модель FLO-2D, модель прорыва озера, Таджикистан.*

ASSESSMENT OF POSSIBLE CONSEQUENCES OF OUTBURST FLOODS BY THE EXAMPLE OF THE BODOMDARA RIVER VALLEY (TAJIKISTAN)

V.A. Iudina (Kurovskaia)[1], S.S. Chernomorets[1], I.N. Krylenko[1,2], T.A. Vinogradova[3], I.V. Krylenko[1], E.A. Savernyuk[1], A.G. Gulomaydarov[4], I.I. Zikillobekov[4], U.R. Pirmamadov[4], Yu.Kh. Raimbekov[4]

[1] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia; viktoriiakurovskaia@gmail.com*
[2] *Water Problems Institute, RAS, Gubkina str. 3, Moscow, 119333, Russia*
[3] *Research and Production Association Gidrotekhproekt LLC, Oktyabrskaia dtr. 55A, Valdai, Novgorod region, 175400, Russia*
[4] *Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Rudaki ave. 34, Dushanbe, 737450, Tajikistan; amiraidar.ghulomaidarov@akdn.org*

The prerequisites and modeling of possible outburst floods in the valley of the Bodomdara River (Tajikistan) are considered using detailed field data. According to the route survey results, Lake Bodomdara Upper is a supraglacial lake, which assumes possibility of its outburst leading to a cascade outburst flood. The depression of Lake Bodomdara Lower is relatively stable, and its outburst is possible without cascade flooding at anomalously high temperatures, upon snowmelt combined with extreme rainfall. Two probable scenarios are considered: (I) the outburst of Lake Bodomdara Lower (its volume comprised 328 000 m^3 according to the bathymetric survey of 2020) and (II) the cascade outburst flood of Lake Bodomdara Upper (700 000 m^3). Digital elevation model (DEM) ALOS PALSAR (12.5 m) and DEM based on images from an unmanned aerial vehicle for the Bodmodara River alluvial fan were used for predicting flood consequences. The outburst flood hydrographs for scenarios I and II were obtained using the lake outburst model developed by Yu.B. Vinogradov and an empirical formula, respectively. The material increment was estimated in the transport-shift model of mudflow formation.

The resulting hydrograph was applied for zoning the Bodomdara and Shahdara river valleys with a total length of 75 km based on the FLO-2D model. According to the modeling, the maximum water discharge at the top of the alluvial cone of the Bodomdara River will reach 143 m^3/s under scenario I and 348 m^3/s under scenario II.

Key words: *outburst floods, debris flows, transport-shift model, FLO-2D model, model of lake outburst, Tajikistan.*

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата приводят к деградации горного оледенения в Центральной Азии [*Jansky et al., 2009; Mergili et al., 2011; Wang et al., 2013; Harrison et al., 2018*]. Отступание ледников на Памире преимущественно связано с увеличением температуры воздуха [*Glazyrin et al., 2018*]. На территории Памира насчитывается 6730 ледников общей площадью 7493 км^2 [*Kotlyakov et al., 2011*]. На восточном Памире у ледников выявлена тенденция к ускорению таяния с конца 1970-х гг. до 2001 г., площадь ледников уменьшилась на 7.8 % в течение 1978–1990 гг. и на 11.6 % за 1990–2001 гг. [*Khromova et al., 2006, 2014*]. Отступание ледников ведет к формированию ледниковых озер.

Выявление потенциально прорывоопасных озер осуществляется с помощью данных дистанционного зондирования и маршрутных обследований [*Kääb et al., 2005; Quincey et al., 2007*]. В работе [*Mergili et al., 2013*] инвентаризация озер в верховьях р. Аму-Дарья производилась на основе разновременных спутниковых снимков. Всего было выявлено 1642 озера, из них 652 ледниковые, 73 % всех озер расположены выше 4000 м над ур. моря. Результаты анализа также указывают на смещение районов роста ледниковых озер с юго-западного Памира на центральный и северный Памир [*Mergili et al., 2013*]. По данным анализа спутниковых снимков, в 2007 г. в бассейнах рек Гунт и Шахдара на юго-западе Памира существовало 172 ледниковых озера [*Mergili, Schneider, 2011*]. Большинство из них расположены на высоте 4400–4700 м над ур. моря и были образованы или значительно увеличили свои размеры с 1968 г. На юго-западе Памира почти все ледники отступают и наблюдается рост ледниковых озер [*Mergili, Schneider, 2011*]. На 2018 г. в бассейне р. Гунт было обнаружено более 600 горных озер по многоспектральным снимкам, большая часть из которых образовалась в последние десятилетия [*Кидяева и др., 2020*]. Также был составлен каталог горных озер бассейна р. Гунт, в котором рассчитаны их площади и генетический тип озерных котловин. Выдающийся прорывной паводок с последующим селевым потоком на Памире произошел в 2002 г. в долине р. Дашт [*Mergili et al., 2011*] вследствие прорыва термокарстового озера по подземным каналам стока (площадь перед прорывом 37 000 м^2, по данным [*Докукин и др., 2020*] – 44 600 м^2).

В связи с тем, что ледниковые озера расположены, как правило, в труднодоступных районах, где отсутствуют систематические наблюдения, прогнозировать прорывы достаточно сложно. Одним из способов оценки рисков, связанных с прорывами ледниковых озер, является математическое моделирование. Если русло реки, в верховьях которой находится ледниковое озеро, имеет значительный уклон, а в днище долины и на прилегающих склонах имеется достаточное количество грубообломочного материала, то прорыв озера сопровождается сходом селевых потоков, обладающих огромной разрушительной силой. Из-за сложности процессов формирования и движения селевых потоков было разработано большое количество математических моделей [*Михайлов, 2011; Hutter et al., 1994; Jan, Shen, 1997*]. В публикациях довольно часто для расчета селевых потоков используются модели, основанные на уравнении движения вязкой жидкости. В основе гидродинамических моделей лежит решение уравнения движения вязкой жидкости Навье–Стокса в явном виде или в интегрированной по глубине гидравлической форме – уравнения движения Сен-Венана. По данным [*Михайлов, Черноморец, 2011*], гидродинамическая модель FLO-2D является одной из наиболее распространенных в исследованиях [*Cesca, D'Agostino, 2008; Mergili et al., 2011; Petrakov et al., 2012; Wu et al., 2013*]. Также многие модели используют однофазный подход (аналогичный лавинам метод Фелми), например, модель RAMMS (Rapid Mass Movements). В гидравлической модели, предложенной Фелми, не учитываются деформации сдвига [*Voellmy, 1995*]. В настоящей работе для оценки приращения материала в селевом очаге была использована транспортно-сдвиговая модель селеобразования [*Виноградов, 1980; Виноградов, Виноградова, 2010*].

Целью работы была оценка потенциальных зон затопления в долинах рек Бодомдара и Шахдара на основе детальных полевых данных с применением комплекса математических моделей.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являлись озера Бодомдара Верхнее и Нижнее, расположенные в долине р. Дармайдован (рис. 1), крупного левого притока р. Бодомдара.

Река Бодомдара впадает в р. Шахдара в 49.5 км выше места впадения последней в р. Гунт у города Хорог, который является административным центром Горно-Бадахшанской автономной области. Протяженность р. Дармайдован состав-

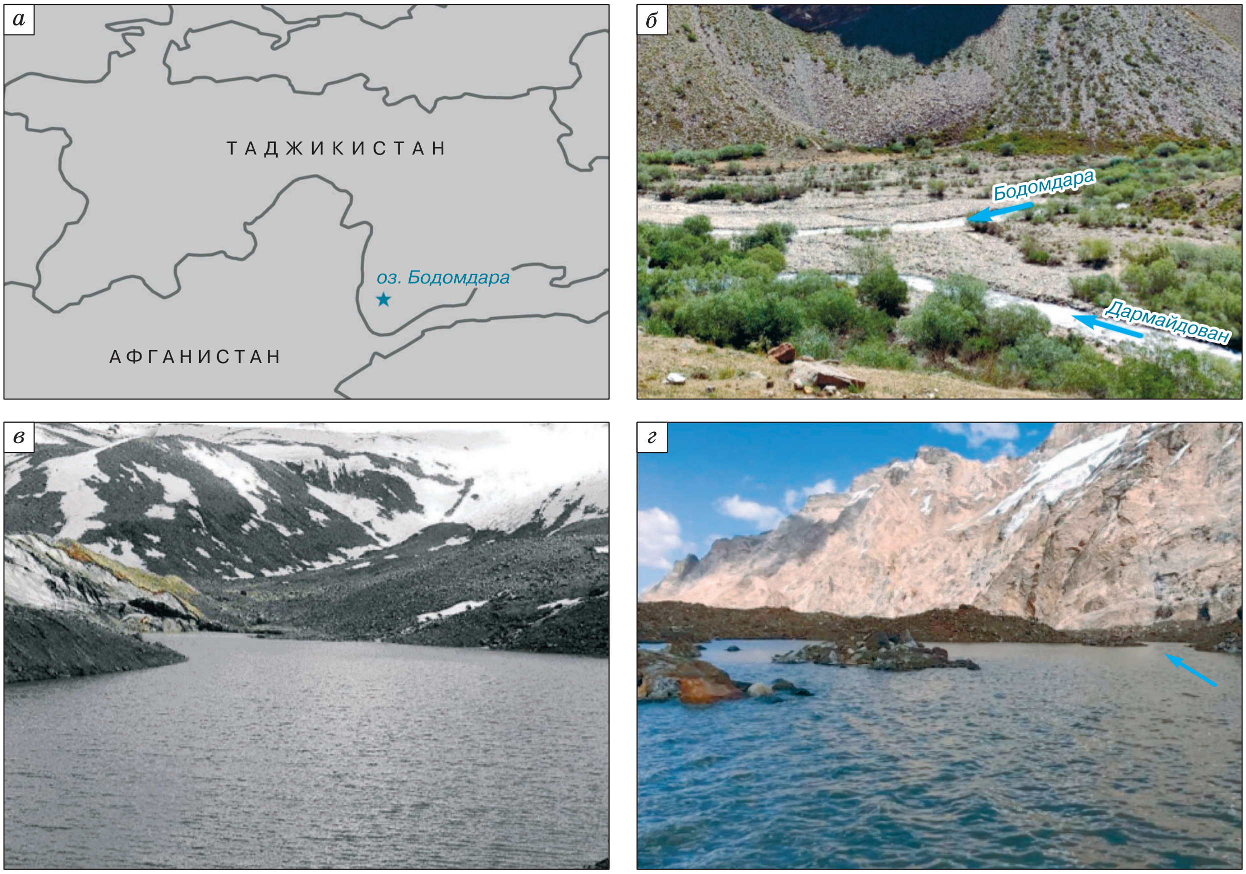

Рис. 1. Схема расположения озер Бодомдара:

а – расположение озер Бодомдара; *б* – расширение днища долины р. Бодомдара, в центральной части которого находится устье р. Дармайдован (13.2 км выше устья Бодомдары); *в* – озеро Бодомдара Верхнее, вид с северо-западного берега на южную часть водоема; *г* – озеро Бодомдара Нижнее, вид с юго-запада на понижение озерной запруды, где находится исток из озера (его местоположение указано синей стрелкой).

ляет 12 км [*Ресурсы..., 1967*], площадь водосбора 65.6 км^2. Бассейн р. Дармайдован вытянутый, длиной около 14 км, максимальной шириной (в средней его части) до 5.5 км. Длина р. Бодомдара от истока ее левой составляющей Ляджвардары составляет 27 км, площадь бассейна 318 км^2. Площадь открытых ледников в исследуемой части долины (без притока р. Ляджвардара) по состоянию на 11.08.2020 г. составила 6.66 км^2, суммарная площадь водоемов 0.2 км^2. Длина р. Шахдара составляет 142 км, площадь бассейна 4180 км^2.

В верхнем течении р. Дармайдован долина сложена гнейсами с прослоями мраморов, в среднем – роговообманковыми и биотит-роговообманковыми гнейсами ямчинской свиты; в среднем течении долины – породы гармчашминской свиты биотитовые, силлиманитовые, кианитовые гнейсы, мигматиты; в нижнем – гранобиотитовые гнейсы птупской свиты.

По ведущим экзогенным рельефообразующим процессам в долине р. Дармайдован выделяются следующие характерные участки: ледниково-моренный комплекс в верховьях долины (ледники и истоки); участок моренных отложений в верхней части троговой долины; участок ступенчатого русла в средней и нижней частях долины; приустьевая ступень; приустьевой участок с направленной аккумуляцией наносов (вложенный конус выноса).

Устье р. Дармайдован находится в центре выположенного участка в расширении долины р. Бодомдара длиной 1.2 км и шириной 100–160 м, днище которого полностью заполнено аллювиальными отложениями. В 600 м ниже уклоны Бодомдары заметно возрастают на ступени, образованной конусом выноса правого притока. Далее вниз, вплоть до начала конуса выноса, перед впадением в Шахдару русло р. Бодомдара ступенчатое. Средний уклон р. Бодомдара ниже устья р. Дармайдован составляет около 0.03.

Осредненный продольный профиль русла реки близок к уклону днища троговой долины. Река

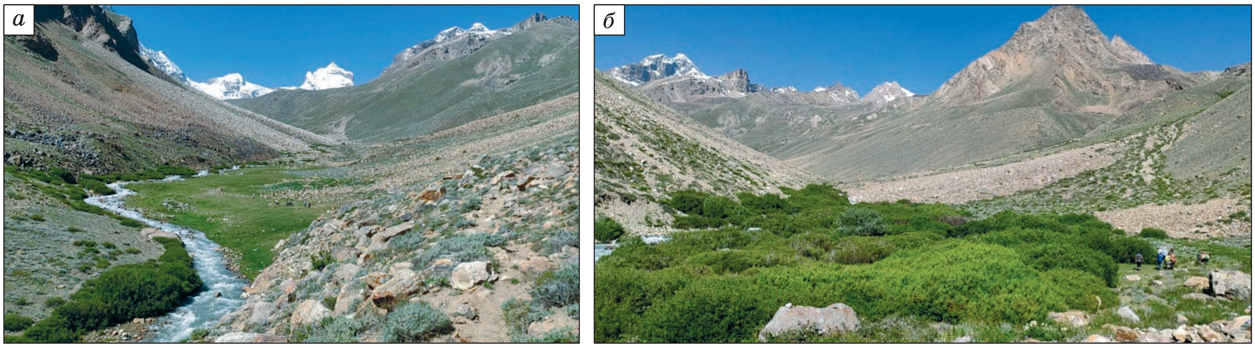

Рис. 2. Расширения днища долины реки Дармайдован в районе 8 км выше устья, вид вверх по долине (*а*) и в районе 6.4 км выше устья, вид вверх по течению (*б*).

Выполаживание полностью заросло старым низкорослым лесом. Вдали на левом склоне просматриваются прислоненные высокие моренные террасы и долины притоков с ригелями на выходе в основную долину.

Дармайдован на всем протяжении течет вдоль основания правого склона по дну глубокого V-образного, местами U-образного вреза, между моренными отложениями слева и конусами осыпей справа. Характер реки бурный, в летнее время ширина водного потока составляет 6–8 м, ближе к низовьям 8–12 м, глубины – первые десятки сантиметров, максимальные – до 1 м. На узких участках река занимает все днище вреза, шириной от 6–7 до 10–15 м. Русловые деформации ограничены, морфодинамический тип русла – порожисто-водопадное слабоизвилистое или прямолинейное. Изгибы русла вынужденные, образованы в результате огибания рекой конусов выноса притоков или крупных осыпных конусов.

Отличительной особенностью р. Дармайдован в настоящее время является неселевой характер русла. На это указывает ряд признаков: "перегруженность" склонов (местами и днища) руслового вреза осыпным неокатанным материалом; наличие вплоть до уреза воды растительности и моховой подушки на участках относительно пологих берегов в средней части долины (рис. 2), заросли старого низкорослого леса на выположенных расширениях в нижней части долины; отсутствие специфического селевого рельефа (селевого U-образного вреза, селевых гряд, террас, полей аккумуляции и др.) и конуса выноса, выдвинутого в долину р. Бодомдара.

Ледниково-моренный комплекс и озера. Сравнение местоположения края языков активных льдов на космических снимках 2008 и 2020 гг. (рис. 3) показывает, что за 12 лет они отступили на 50–120 м (т. е. скорость отступания составляла до 10 м/год). Край ледниково-моренного комплекса стабилен, но ледовая стенка в выемке над истоком также заметно отступила – за 12 лет на 35–40 м (3 м/год).

Озера в долине р. Дармайдован находятся внутри ледниково-моренного комплекса (см. рис. 3), ближе к левому борту долины. Данные озера разновозрастные. Озеро Бодомдара Нижнее существует по меньшей мере с последней четверти XX в. – упоминание об озере есть в отчете туристической группы, посещавшей долину в 1974 г. Однако упоминания об озере нет в описании П.Н. Лукницкого, выполнившего 12.08.1931 г. рекогносцировочный маршрут по долине р. Дармайдован вплоть до ледника [*Лукницкий, 1955*].

На космическом снимке KH-9 от 13.08.1975 г. [*https://earthexplorer.usgs.gov/*] площадь оз. Бодомдара Нижнее составила 20 000 м^2, что в 2.6 раза меньше, чем в 2020 г. Озеро в конфигурации, близкой к современной, и на том же месте нанесено на крупномасштабную карту масштаба 1:100 000 [*Рошткала: J-42-108..., 1988*], где состояние местности указано на 1978–1984 гг.

Озеро Бодомдара Верхнее возникло в последнее десятилетие – на космоснимке за август 2008 г. озера нет, имеются лишь отдельные западины с водой (см. рис. 3). По данным космоснимков (Landsat 7 от 20.08.2010 г. [*https://earthexplorer.usgs.gov/*]) в 2010 г. воедино слилось несколько крупных западин, которые развивались с 2005 г. Длина озера по длинной оси составила 300 м. С этого момента озеро начало активно увеличиваться в размерах, и на 2020 г. его площадь составила 56.1 тыс. м^2. Предположительно озеро Бодомдара Верхнее наледниковое, под его ложем еще сохраняется лед. Верхнее озеро освобождается ото льда на короткое время, как правило, в третьей декаде июля, к началу августа, а к третьей декаде сентября уже покрывается льдом.

По состоянию на 2020 г. площади акватории озер примерно одинаковые, близки и их размеры (табл. 1).

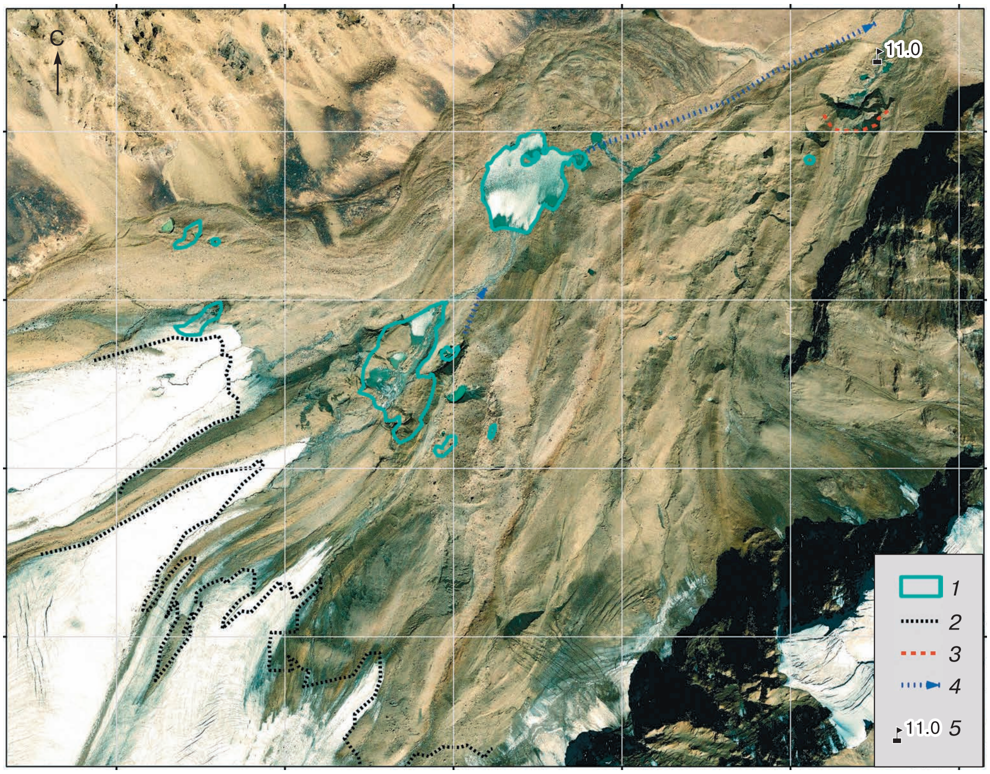

Рис. 3. Схема расположения озер на ледниково-моренном комплексе в верховье долины р. Дармайдован (подложка – космоснимок августа 2008 г.).

1 – границы озер и эфемерных водоемов на 11.06.2020 г.; *2* – край чистого льда (активных ледников) на 11.08.2020 г.; *3* – край ледовой выемки в истоке реки на 11.08.2020 г.; *4* – наиболее вероятные пути прохождения предполагаемого прорывного паводка; *5* – расстояние от устья р. Дармайдован. Размер ячеек координатной сетки 500 × 500 м.

Таблица 1. **Морфометрические характеристики ледниковых озер Бодомдара**

Озеро	Абс. отметка, м	Площадь акватории, тыс. м^2	Длина по продольной оси, м	Наибольшая ширина, м	Глубина, м		Объем озера, млн м^3
					средняя	наибольшая измеренная*	
Нижнее	4289	54.0	300	235	6.2	21.8	0.328
Верхнее	4361	56.1	360	200	Нет данных	Нет данных	Нет данных

* Измеренные по данным батиметрической съемки 30.07.2020 г. (нижнее озеро) и по космоснимку Sentinel-2B 11.08.2020 г. [*https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/*] (верхнее озеро).

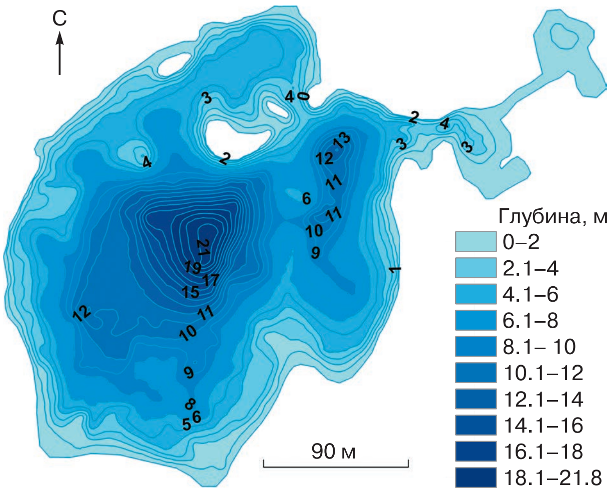

Рис. 4. Батиметрическая карта озера Бодомдара Нижнее по состоянию на 31.07.2020 г.

Наледниковое положение оз. Бодомдара Верхнее предполагает дальнейшие активные деформации его ложа и берегов в результате протаивания/отступания ледника. Следствием этого будет оседание дна, а также отступание и изменение очертаний берегов. Перемычка озера неустойчивая, что в сочетании с разрастанием озера создает предпосылки к его прорыву/спуску.

Чаша оз. Бодомдара Нижнее относительно стабильная. На карте издания 1988 г. площадь озера составляет 40 900 м^2, в конце теплого периода, в августе 2008 г., площадь акватории достигла 49 200 м^2 (прирост около 20 %), через 12 лет составляет 52 000 м^2 (прирост примерно на 5 %). Первоначально увеличение площади шло в направлении на юг и восток, за счет таяния льдов западнее мощного вала срединной морены. В последнее десятилетие береговая линия стабильна, а некоторое увеличение площади (с учетом возможной погрешности) может быть связано с уменьшением имеющихся в озере островов из моренных отложений. В настоящее время озеро расположено в котловине, выполненной льдом. Глубины в центре котловины достигают 22 м (рис. 4).

“Прямоугольно-сетчатая” гидросеть наряду с наличием озеровидных расширений и уходом стока внутрь рыхлой толщи указывают на существование внутри запрудного массива нижнего озера погребенных ледниковых трещин. Дальнейшая деградация запрудного тела может привести к обособлению внутри него отдельных блоков с ледово-мерзлым ядром и к последующим просадкам. Вполне устойчивая плотина озера с консолидированным ледовым ядром и мерзлым чехлом морены может стать ненадежной в условиях сохранения существующих климатических трендов [*Harrison et al., 2018*]. Увеличение продолжительности периода абляции, более высокие летние температуры будут способствовать повышению ледникового стока. Возрастание вероятности гидрометеорологических экстремальных событий (аномальное тепло, резкое снеготаяние, осадки) на фоне повышенного стока увеличивает и риск возможного прорыва нижнего озера.

Учитывая нестабильное состояние чаши и перемычки верхнего озера также весьма вероятным является сценарий каскадного прорыва, когда спусковым механизмом для прорыва нижнего озера послужит прорыв верхнего. Возможный прорыв оз. Бодомдара Нижнее приведет к быстрому размыву его перемычки и спуску до 200–400 млн м^3 воды. Формирование вреза, скорее всего, пойдет по старому пути стока из нижнего озера (см. рис. 4) с выходом в современный врез в 300–400 м ниже нынешнего истока. Рыхлый материал на низовом откосе ледниково-моренного комплекса, вероятно, будет смыт до чистого льда.

Устьевой конус р. Бодомдара и участок поймы р. Шахдара ниже впадения в Бодомдару в настоящее время освоены незначительно. В долине Шахдары под угрозой возможного прорывного паводка оказываются многочисленные фрагменты дороги Хорог-Памирский тракт, включая мосты через р. Шахдара, отдельные постройки и многочисленные сельскохозяйственные угодья ниже устья р. Бодомдара.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения потенциальных зон затопления в долинах рек Бодомдара и Шахдара был проведен следующий комплекс работ.

1. Полевые работы, включающие изучение и описание долины, батиметрическую съемку нижнего озера, съемки конуса выноса р. Бодомдара (Агентство Ага Хана по Хабитат – AKAH).

2. Камеральная обработка материалов: анализ разновременной информации по космическим снимкам, разработка сценариев прорыва, подготовка рельефа для моделирования.

3. Непосредственно моделирование включало три этапа:

3.1. Моделирование прорыва оз. Бодомдара Нижнее с использованием модели прорыва озера [*Виноградов, 1976*].

3.2. Расчет приращения твердого материала на участке потенциального селевого очага по транспортно-сдвиговой модели [*Vinogradova, Vinogradov, 2017*].

3.3. Зонирование долины по гидродинамической модели FLO-2D [*O’Brien et al., 1993*].

В настоящей работе использовались как архивные данные [*https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer; https://earthexplorer.usgs.gov/*], так и полученные недавно полевые материалы. Так, батиметрическая съемка оз. Бодомдара Нижнее выполнялась 31.07.2020 г. сотрудниками AKAH с моторной надувной лодки с помощью эхолота Lowrance Hook 5. Протяженность маршрутов по воде составила около 4 км. Большая часть территории озера охвачена промерами. Для коррекции береговой линии озера был использован космический снимок Sentinel-2 от 06.08.2020 г. [*https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/*]. Съемка конуса выноса долины р. Бодомдара также была выполнена сотрудниками AKAH, использовался беспилотный летательный аппарат (БПЛА) самолетного типа SenseFly eBee.

Для обработки материалов стереосъемки и создания ортофотоплана и цифровой модели рельефа использовался программный комплекс Agisoft Metashape Version 1.5.5. В устьевой области р. Бодомдара присутствовало большое количество деревьев, учет высоты которых приводил к возникновению своеобразного “вала”. Использование методов машинного обучения позволило в программе Agisoft Metashape автоматически подразделить плотное облако точек на различные классы. В данном случае проводилась автоматическая классификация для класса “высокая растительность”. При построении цифровой модели рельефа (ЦМР) использовались все классы.

Для обработки материалов и построения батиметрической карты применялись программные комплексы Reef Master v. 1.8.41 (просмотр и визуализация данных эхолокации, сохранение исходных данных эхограмм) и ArcGIS 10.8.5 (обработка и визуализация исходных и конечных данных).

Расчетные сценарии для моделирования. Рассматривалось два сценария развития прорывного паводка, для расчета использовался комплекс математических моделей (рис. 5). В сценарии I предполагается формирование прорывного паводка из оз. Бодомдара Нижнее при возможном объеме озера в современных условиях 328 тыс. м^3. В сценарии I для расчета гидрографа прорыва водоема использовалась модель прорыва озера, подпруженного ледником, предложенная Ю.Б. Виноградовым [*Виноградов, 1976, 1977*]. На втором этапе полученный гидрограф использовался в транспортно-сдвиговой модели селеобразования [*Виноградов, Виноградова, 2010*], модернизированной авторами [*Юдина (Куровская) и др., 2022*]. На этом этапе рассчитывалось приращение твердого материала в потенциальном селевом очаге. Рассчитанный таким образом гидрограф использовался для получения глубины и скорости селевого потока в долине по двумерной гидродинамической модели FLO-2D [*O’Brien et al., 1993*].

Сценарий II предполагает каскадный прорыв озер Бодомдара Верхнее и Нижнее, исходя из максимально возможного накопления воды 700 тыс. м^3 в случае перелива через плотину нижнего озера. Расход прорывного паводка для сценария II был получен по формуле из работы [*Huggel et al., 2004*] и составил 430 м^3/с. Этот расход использовался в качестве входных гидрологических данных в транспортно-сдвиговой модели. Рассчитанный в транспортно-сдвиговой модели гидрограф применялся для зонирования долины в модели FLO-2D.

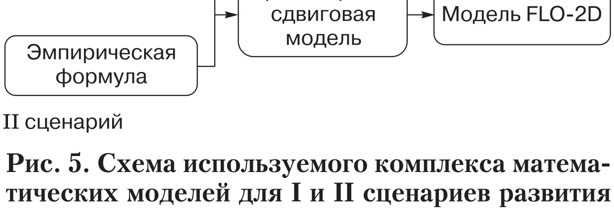

Рис. 5. Схема используемого комплекса математических моделей для I и II сценариев развития прорывного паводка.

В настоящей работе не рассматривается сценарий, при котором поток из р. Дармайдован заблокирует Бодомдару с образованием подпрудного озера. Этот сценарий маловероятен, но исключать его нельзя. Для его рассмотрения требуется провести дополнительное исследование.

Также при моделировании отдельно не рассматривается вероятность обвала в озеро, предпосылки для которого создает нестабильный блок горных пород в верхней части цирка ледника в центре. На космических снимках наблюдаются вывалы породы с двух сторон от конца висячего ледника, что указывает на возможный в будущем отрыв нестабильного блока породы, возможно, с некоторым количеством льда объемом порядка 1 млн м^3. При падении такого блока неизбежно возникнет ледово-каменная лавина, которая перекроет верхнее озеро, что в летнее время может привести к его выплеску и последующему каскадному процессу с вовлечением нижнего озера. Подобный случай произошел недавно в Перу и описан в статье [*Vilca et al., 2021*]. Этот сценарий здесь не рассматривается, так как основной целью была оценка потенциальных зон затопления в долинах рек Бодомдара и Шахдара с применением комплекса математических моделей при сценариях, учитывающих прорыв оз. Бодомдара Нижнее по подледниковым каналам стока и каскадный прорыв озер с размывом перемычки нижнего озера.

Модель прорыва озера. На основе анализа материалов по прорывам озер в различных регионах мира Ю.Б. Виноградов сделал вывод, что прорыв приледниковых озер осуществляется не только при разрушении ледовой перемычки, но и в результате возникновения и расширения внутриледникового канала [*Виноградов, 1977*]. Современные исследования показывают, что прорывы ледниковых озер также могут происходить в результате образования внутриледникового канала [*Huss et al., 2007; Hewitt, Jingshi, 2010; Erokhin et al., 2018; Bhambri et al., 2020; Che et al., 2022*]. Доказательством предположения о механизмах прорыва служили зарегистрированные наблюдениями гидрографы с отрицательной асимметрией [*Виноградов, 1977*]. Процессы опорожнения озер в таких случаях начинаются со сравнительно медленного нарастания стока излива воды, достигают максимума и в последующем происходит резкий спад [*Виноградов, Виноградова, 2008; Huss et al., 2007*].

Несмотря на то что в рассматриваемой долине оз. Бодомдара Нижнее подпружено не ледником, а мореной с ледниковым ядром, авторы считают, что наличие погребенных ледниковых трещин дает возможность использовать данную модель. Геоморфологический анализ долины р. Дармайдован позволяет сделать вывод, что, повидимому, прорыв оз. Бодомдара Нижнее пойдет сначала по каналам ледникового стока, а затем уже выйдет на поверхность. Схожая ситуация наблюдалась при прорывах оз. Тезтор (Киргизия) в 1953 и 2012 гг., когда изначально поток прокладывал путь по внутриледниковым каналам стока и только через 400 м вышел на поверхность [*Erokhin et al., 2018*].

В основе математической модели опорожнения озера Ю.Б. Виноградова лежат уравнения развития внутриледникового туннеля, связывающие в единый процесс падение уровня воды в озере, расход истечения, температуру воды, возникновение туннеля, его длину и перепад уровней [*Виноградов, 1976*]. В работах [*Виноградов, 1976; Виноградов, Виноградова, 2008*] представлено сравнение модельных и наблюденных значений на примерах прорывов крупных ледниковых озер Исландии (оз. Гримсветн, 1922, 1934, 1945 гг., оз. Греналоун, 1935, 1939 гг.), Британской Колумбии (оз. Тальсеква, 1958 г.), Таджикистана (оз. Медвежье, 1973 г.) и США (оз. Джордж, 1951 г.). В целом модель показала достаточное совпадение с зарегистрированными гидрографами.

Модель была адаптирована при расчетах предположительного прорыва оз. Башкара на Центральном Кавказе по данным исследования озера в 2003–2007 гг. [*Гнездилов и др., 2007*]. Модель использовалась также для расчета прорывов ледниковых и подледниковых водоемов Антарктиды [*Попов и др., 2019*]. В первом случае модель была написана на языке программирования Fortran, во втором – Delphi, но в открытом доступе опубликована не была.

В случае, если температура воды в озере, регулируемая наличием ледяной плотины и плавающих айсбергов, равна нулю, расход прорывного паводка находится по формуле

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

где ρ_0 – плотность воды, 1000 кг/м^3; ρ – плотность воды и льда, 850–910 кг/м^3; g – ускорение свободного падения, 9.81 м/с^2; r – удельная теплота плавления льда, 334 000 Дж/кг; l – длина тоннеля, м; h – превышение точки входа в тоннель над точкой выхода, м; W_0 – объем воды в озере перед началом прорыва, тыс. м^3; a, m – морфометрические параметры чаши озера, определяемые из уравнения $H = aW^m$; H – уровень воды в озере; W – объем воды в озере; δ – эмпирический коэффициент, зависящий от длины туннеля. Максимальный расход прорывного паводка будет при значении W, при котором выполняется равенство

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

В случае существенного отличия температуры воды в озере от нулевой следует использовать уравнения [*Виноградов, 1977*]:

$$Q=\delta\left\{\frac{\rho_0 g}{\rho r l}\left[\left(x+h\right)\left(W_0-W\right)+\frac{a}{m+1}\left(W_0^{m+1}-W^{m+1}\right)\right]\right\}^{5/4}\times \times\sqrt{aW^m}; \quad (3)$$

$$x=\frac{C_0}{g}t\left\{1-\exp\left[-\frac{400\delta^{0.3}l\left(aW^m\right)}{Q^{0.55}\rho_0 C_0}\right]^{0.15}\right\}, \quad (4)$$

где C_0 – удельная массовая теплоемкость воды, 4190 Дж/(кг·°C); t – температура воды в озере, °C.

Длина подледникового канала в случае прорыва оз. Бодомдара Нижнее, по нашим оценкам, составит 732 м. Температура воды в озере была оценена в 2.5 °C. Морфометрические параметры чаши озера a и m, полученные по результатам батиметрической съемки, составили 0.061 и 0.65 соответственно.

Решение уравнений модели (1)–(4) было реализовано на языке программирования Python и соединено с модернизированной транспортно-сдвиговой моделью селеобразования.

Транспортно-сдвиговая модель селеобразования. Уравнения модели были разработаны Ю.Б. Виноградовым на основе данных экспериментов по искусственному воспроизведению селевых потоков в долине р. Чемолган в 1971–1975 гг. Рассчитанные по модели расходы селевых потоков хорошо соотносятся с данными наблюдений [*Vinogradova, Vinogradov, 2017*].

В качестве основы для моделирования данных о рельефе территории использовалась ЦМР PALSAR (размер ячейки 12.5 м). Характеристики селеформирующих грунтов, такие как угол внутреннего трения, отношение объема воды к объему твердого вещества, использовались одинаковые для обоих сценариев и оценивались на основе [*СП 425.1325800.2018, 2019*], материалов инженерно-геологических изысканий института Севкавгипроводхоз [*Никулин, 2009*] и работ Ю.Б. Виноградова [*Виноградов, Виноградова, 2010*]. В случае прорыва нижнего озера потенциальный селевой очаг располагался на морене в верховьях р. Дармайдован. Средний уклон составил 13° (рис. 6). Для сценария II предполагался каскадный прорыв озер Бодомдара в результате перелива/разрушения перемычки озера, в данном случае набор материала происходил на участке подпитки, расположенном выше конуса выноса левого притока, также расположенного на морене (см. рис. 6). Средний уклон составил 14.8°.

Гидродинамическая модель FLO-2D. Модель FLO-2D является двумерной и основывается на численном решении уравнения Сен-Венана на

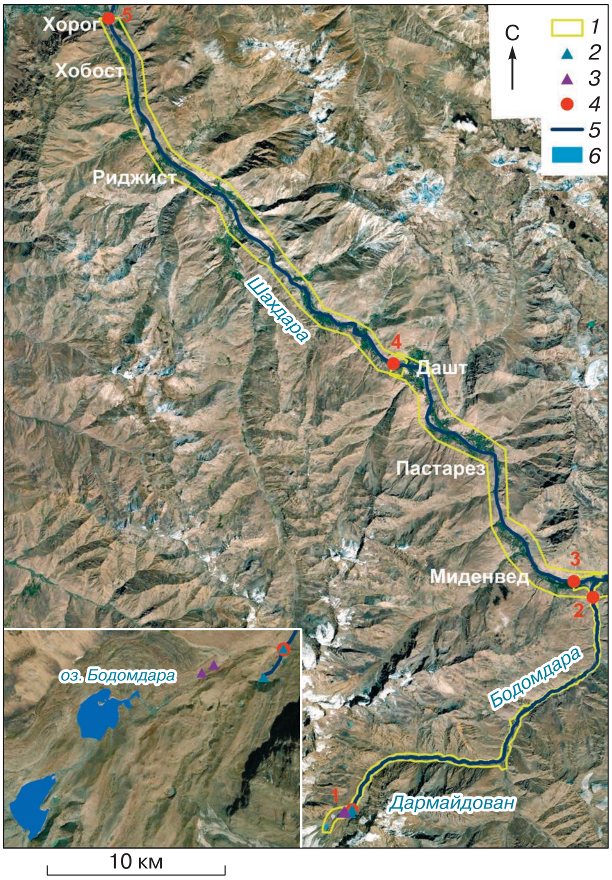

Рис. 6. Схема моделирования возможных прорывных паводков.

1 – границы моделирования по модели FLO-2D; *2* – границы потенциального селевого очага (I сценарий); *3* – границы зоны подпитки (II сценарий); *4* – створы и их номера для расчета гидрографов по FLO-2D; *5* – реки; *6* – озера.

основе регулярных прямоугольных расчетных сеток. При моделировании движения селевого потока в модели FLO-2D принимается, что сели движутся как жидкость Бингама (вязкопластичная жидкость) [*O'Brien et al., 1993*]. Базовое уравнение модели – уравнение для расчета уклона трения [*O'Brien et al., 1993*].

Для применения двумерных моделей требуется детальная информация о морфометрии речных долин, представленная в виде поля точек. В результате они позволяют получить плановую картину распределения скоростей течения, уровней водной поверхности и глубин воды в пределах расчетной области.

В качестве базовых данных о рельефе территории использовалась ЦМР PALSAR. Контуры русел уточнялись по данным космических снимков. Для р. Шахдара для задания рельефа привлекались данные топографических карт масштаба 1:50 000, это было обусловлено тем, что при работе с ЦМР PALSAR по Шахдаре были обнаружены серьезные ошибки, полученные при сканировании рельефа в наиболее узких местах речной долины с высокими скалистыми бортами. После корректировки все данные о рельефе были проинтерполированы в расчетную сетку модели с шагом 12.5 × 12.5 м. Данные съемки БПЛА позволили получить рельеф для конуса выноса р. Бодомдара с высокой детальностью. Разрешение исходной цифровой модели местности составило 1 м. Наиболее вероятные параметры селевых потоков были заданы на основе материалов предыдущих исследований [*Petrakov et al., 2012*]. Концентрация наносов принята равной 30–35 %.

Исследуемая область ниже озер для моделирования была разбита на пять участков (см. рис. 6): 1а) верхний участок потенциального селевого очага по сценарию I (длина участка 225 м); 1б) верхний участок подпитки рыхлообломочным материалом по сценарию II (84 м); 2) от потенциального селевого очага до вершины устьевого конуса р. Бодомдара. Поток рассматривался как селевой, базовый расход Бодомдары задавался равным 5 м^3/с (длина участка 27 км); 3) участок устьевого конуса р. Бодомдара по данным высокодетальной съемки БПЛА. Поток рассматривался как селевой по Бодомдаре и водный по Шахдаре. Базовый расход р. Шахдара задавался равным 30 м^3/с (длина участка 2.4 км); 4) река Шахдара ниже конуса Бодомдары до впадения р. Дашт. Базовый расход р. Шахдара задавался равным 30 м^3/с. Поток рассматривался как водный (длина участка 18.4 км); 5) река Шахдара от впадения р. Дашт до устья. Базовый расход р. Шахдара задавался равным 30 м^3/с. Поток рассматривался как водный (длина участка 27.2 км).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОРЫВНЫХ ПАВОДКОВ И СЕЛЕЙ

Согласно сценарию I, происходит прорыв оз. Бодомдара Нижнее объемом 328 тыс. м^3 (современный объем озера). Максимальный расход прорывного паводка, полученный с помощью модели прорыва озера [*Виноградов, 1977*], составит 167 м^3/с и будет наблюдаться через 57 мин после начала прорыва. Расход селевого потока на выходе из селевого очага, по результатам расчетов транспортно-сдвиговой модели, возрастет уже до 459 м^3/с (табл. 2). Плотность потока при этом увеличится до 1637 кг/м^3. Средняя скорость в очаге составит 6.1 м/с.

Сценарий II предполагает каскадный прорыв озер Бодомдара объемом 700 тыс. м^3. Максимальный расход прорывного паводка, согласно формуле из [*Huggel et al., 2004*], составит 430 м^3/с. Форма входного гидрографа принималась практически симметричной с максимумом через 24 мин от начала подъема и общей продолжительностью

0.8 ч. После прохождения потенциального селевого очага, по расчетам транспортно-сдвиговой модели, данный расход достигнет 840 м^3/с. Плотность потока составит 1489 кг/м^3, средняя скорость 7.2 м/с.

Гидродинамическая модель FLO-2D использовалась для получения глубин затопления, скоростей течения и времени добегания в долине для обоих сценариев прорывного паводка. В качестве входных гидрологических данных использовались гидрографы, полученные по транспортно-сдвиговой модели селеобразования. По данным моделирования, время добегания пика селевого паводка от потенциального селевого очага до вершины устьевого конуса составит 1.67 ч при сценарии I и 1.37 ч при сценарии II (рис. 7). Максимальный расход воды в вершине устьевого конуса р. Бодомдара составит 143 м^3/с при входном расходе 459 м^3/с и 348 м^3/с при входном расходе 840 м^3/с.

В долине Бодомдары при прохождении прорывного паводка будут наблюдаться наибольшие глубины и скорости потока. При обоих сценариях скорости течения на максимальном протяжении русла будут составлять 1.5–5.0 м/с, а на отдельных участках и более. Глубины в русле могут достигать 0.5–7.7 м. Однако в этой долине нет объектов инфраструктуры и населенных пунктов, поэтому опасность прохождения потока является только потенциальной угрозой.

На конусе поток будет равномерно растекаться по поверхности. При сценарии I, соответствующем объему озера в 2020 г., глубины в русле Бодомдары, по результатам моделирования, будут достигать 2 м, в русле Шахдары 4.6 м (рис. 8, *а*).

Таблица 2. **Результаты моделирования прорывного паводка по моделям прорыва озера и транспортно-сдвиговой модели**

Сценарий	Объем прорыва, тыс. м^3	Максимальный расход, м^3/с		Время добегания, ч
		прорывного паводка	селевой волны	
I	328	167	459	0.96
II	700	430	840	0.40

Скорости течения на конусе выноса в основном не превысят 1.6 м/с. В руслах рек Бодомдара и Шахдара скорости будут варьироваться от 3 до 5 м/с.

Ниже конуса в Шахдаре гидрограф будет иметь пологую форму за счет распластывания, пик паводка будет наблюдаться через 5.2 ч от момента прорыва, максимальный суммарный расход с учетом входного расхода р. Шахдара 30 м^3/с составит 86 м^3/с, что значительно ниже расхода, полученного по сценарию II (188 м^3/с). В связи с этим движение прорывного паводка по сценарию I ниже по долине Шахдары не рассматривалось.

При гипотетическом сценарии II с учетом прорывного паводка большего объема глубины затопления на отдельных участках конуса могут достигать более 4 м, будут формироваться участки с

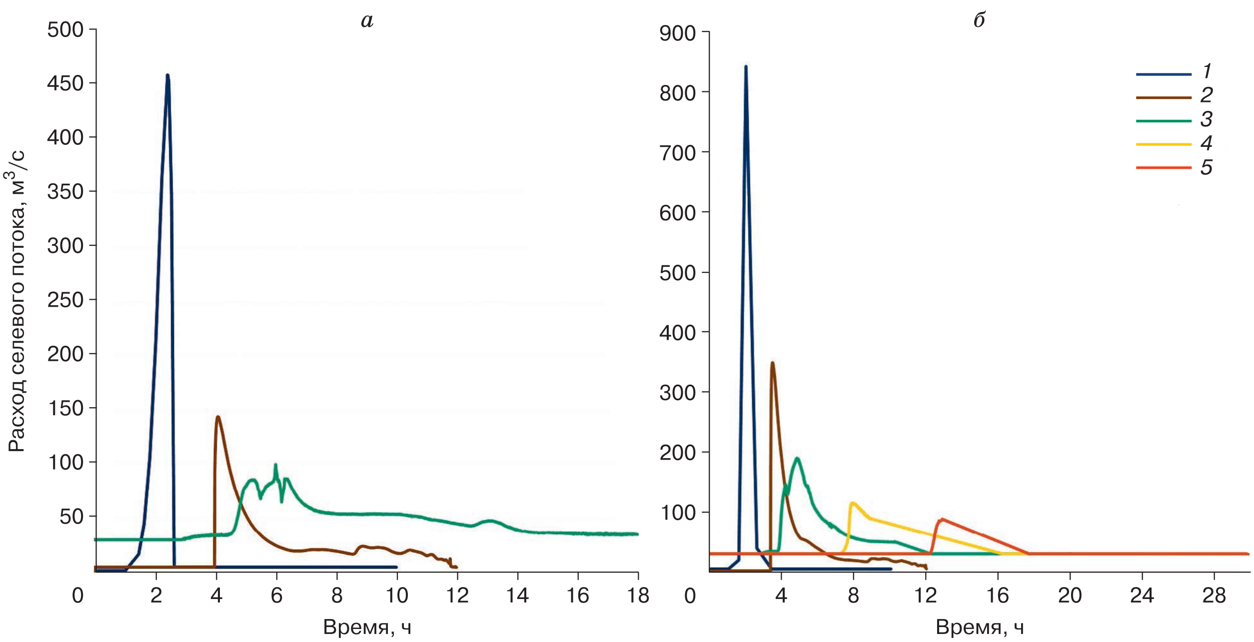

Рис. 7. Гидрографы прорывного паводка, полученные по результатам моделирования по сценарию I при объеме прорыва 328 тыс. м^3 (*а*) и сценарию II при объеме прорыва 700 тыс. м^3 (*б*).

1 – на выходе из потенциального очага; *2* – вершина конуса р. Бодомдара; *3* – р. Шахдара ниже конуса р. Бодомдара; *4* – р. Шахдара ниже конуса р. Дашт; *5* – р. Шахдара у впадения в р. Гунт.

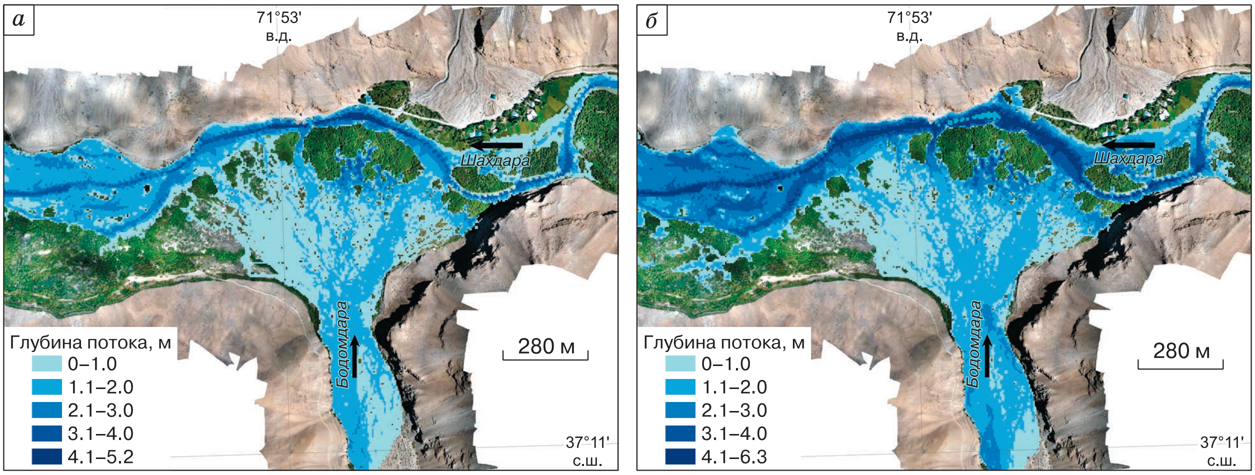

Рис. 8. Глубины затопления в устье р. Бодомдара при сценарии прорыва озера I (*а*) и при сценарии II по результатам моделирования FLO-2D по высокодетальным данным о рельефе на основе съемки БПЛА (*б*).

движением потока со скоростями до 5 м/с в центральной и верхней частях конуса (см. рис. 8, *б*).

Максимальный расход Шахдары ниже конуса р. Бодомдара будет наблюдаться через 4.8 ч от момента прорыва и составит 188 м^3/с. Устьевой конус р. Бодомдара и участок поймы р. Шахдара ниже впадения Бодомдары в настоящее время освоены незначительно, строений в зоне затопления не находится. Выше конуса р. Бодомдара на правом берегу Шахдары расположены строения села Отжага, которые в случае значительного подпруживания Шахдары селевым потоком могут быть подтоплены.

При движении по долине Шахдары, согласно сценарию II, на протяжении 50 км до устья реки паводок будет существенно распластываться, максимальный расход в середине участка у конуса р. Дашт и одноименного поселка составит 114 м^3/с, время добегания волны паводка до этого створа 7.92 ч. В устьевом створе Шахдары волна прорывного паводка достигнет максимума через 13 ч от момента прорыва озера. Максимальный расход в устье Шахдары составит 89 м^3/с (с учетом базового расхода р. Шахдара 30 м^3/с), что превысит максимальный наблюденный расход половодья для гидрологического поста на р. Шахдара в районе кишлака Хабост в устье реки (48.6 м^3/с по данным [*Ресурсы..., 1971*]). Следует отметить, что большинство населенных пунктов вдоль Шахдары в нижнем течении расположены на достаточно высоких отметках относительно уреза воды, однако могут наблюдаться подтопления домов и прочих хозяйственных построек, расположенных в непосредственной близости к реке, где глубина потока будет варьироваться от 0.3 до 1.0 м. Для получения более точных результатов необходимо использовать детальные данные рельефа для каждого населенного пункта. Однако любая хозяйственная деятельность на прирусловых участках (пастбища, луга и пр.) находится в зоне затопления на всех рассматриваемых участках.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены возможные причины и последствия формирования прорывного паводка в долине р. Бодомдара с использованием данных детальных полевых исследований. При сравнении местоположения краев языков активных льдов на космических снимках 2008 и 2020 гг. было установлено, что за 12 лет они отступили на 50–120 м (т. е. до 10 м/год). Край ледниково-моренного комплекса стабилен, но ледовая стенка в выемке над истоком также заметно отступила – за 12 лет на 35–40 м (3 м/год). Деградация оледенения приводит к изменению динамики ледниковых озер и их запруд. Так, оз. Бодомдара Верхнее возникло в последние десятилетия, наледниковое положение озера предполагает дальнейший прорыв в результате отступания ледника, что, в свою очередь, может являться спусковым механизмом для прорыва нижнего озера (каскадного прорывного паводка). Несмотря на то что чаша оз. Бодомдара Нижнее относительно стабильна, его прорыв возможен и без каскадного паводка при аномально высоких температурах, снеготаянии и экстремальных дождевых осадках.

Для моделирования и движения прорывных паводков впервые использовался комплекс трех математических моделей: модели опорожнения озера через ледниковый туннель Ю.Б. Виноградова, транспортно-сдвиговой модели Ю.Б. Виноградова и гидродинамической модели FLO-2D.

Рассмотрено два сценария прорывного паводка: I – прорыв озера Бодомдара Нижнее объемом 328 тыс. м^3, II – каскадный прорыв озер с суммарным объемом 700 тыс. м^3. Для сценария I максимальный расход прорывного паводка был получен с использованием данных батиметрической съемки и модели прорыва озера, предложенной Ю.Б. Виноградовым, и составил 167 м^3/с. Дальнейший учет приращения материала в потенциальном селевом очаге осуществлялся с помощью транспортно-сдвиговой модели селеобразования, расход селевого потока при этом достигал 460 м^3/с. На участке движения прорывных паводков по рекам Дармайдован, Бодомдара и Шахдара суммарной протяженностью 75 км была адаптирована двумерная гидродинамическая модель FLO-2D с селевым блоком, позволившая оценить глубины затопления, скорости течения, потенциальную опасность и время добегания прорывных паводков. По результатам гидродинамического моделирования, на вершине устьевого конуса выноса р. Бодомдара максимальный расход составит 143 м^3/с, время добегания составит 4.07 ч. Максимальный расход в р. Шахдара ниже конуса выноса равен 86 м^3/с.

Максимальный расход прорывного паводка по сценарию II с использованием формулы из [*Huggel et al., 2004*] составит 430 м^3/с. После участков подпитки в селевом очаге расход потока уже будет достигать 840 м^3/с. На вершине устьевого конуса Бодомдары расход составит 348 м^3/с, время добегания составит 3.47 ч от начала прорыва. При этом скорости потока будут достигать 3 м/с, а глубина доходить до 4 м. Максимальный расход в Шахдаре ниже конуса выноса составит 188 м^3/с, а в устье реки в 50 км ниже по течению равен 89 м^3/с. Таким образом, полученные расходы воды с учетом прорывного паводка в нижнем течении р. Шахдара в 3 раза превышают максимальные зафиксированные расходы воды половодья. Несмотря на то что большинство населенных пунктов в долине Шахдары расположены на достаточно высоких отметках, опасности подвержены мосты автодороги Хорог-Памирский тракт через р. Шахдара, в зоне затопления оказываются луга и пастбища, хозяйственные постройки в их пределах, отдельные дома, расположенные на берегу. Наибольший ущерб можно ожидать в районе кишлаков Бидизи Боло, Анбаз/Вездара, Цордж, Миденвед. Возможен ущерб постройкам и угодьям кишлака Отжага на правом берегу Шахдары (напротив и сразу выше устья р. Бодомдара) в результате размыва берегов и подтопления.

Учитывая неблагоприятную динамику ледниково-моренного комплекса, дальнейший рост верхнего озера и возможное нарушение устойчивости плотины нижнего озера, необходим регулярный дистанционный мониторинг ситуации в верховьях р. Дармайдован. Планирование хозяйственной деятельности в долинах рек Бодомдара и Шахдара ниже устья Бодомдары следует выполнять с учетом возможности прохождения здесь волны прорывного паводка.

Благодарности. *Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-35-90006) и темы госзадания МГУ им. М.В. Ломоносова, разделы I.7 (ЦИТИС 121051300175-4), I.10 (ЦИТИС 121051400038-1), ИВП РАН 0147-2019-0001 (ЦИТИС АААА-А18-118022090056-0).*

Авторы выражают благодарность сотрудникам Филиала Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан Р.А. Бобову, Т.З. Сабзалиеву, Н.С. Абдуласанову, А. Акимбекову, М. Гуломносирову, М. Мародмамадову, Ф. Фидолиеву за помощь в организации полевых работ.

Литература

Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // Селевые потоки / Под ред. Ю.Б. Виноградова, Т.Л. Киренской. М., Гидрометеоиздат, 1976, № 1, с. 138–153.

Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л., Гидрометеоиздат, 1977, 154 с.

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л., Гидрометеоиздат, 1980, 160 с.

Виноградов Ю.Б. Современные проблемы гидрологии / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. М., Академия, 2008, 320 с.

Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование в гидрологии / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. М., Академия, 2010, 304 с.

Гнездилов Ю.А., Иващенко Е.Н., Красных Н.Ю. Оценка гипотетического прорыва озера Башкара // Сб. науч. тр. ОАО Севкавгипроводхоз. Пятигорск, 2007, вып. 17, с. 122–145.

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х. и др. Каменные глетчеры – очаги формирования катастрофических селей // ГеоРиск, 2020, т. XIV, № 2, с. 52–65.

Кидяева В.М., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. и др. Прорывоопасные озера бассейна реки Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан): оценка опасности и моделирование прорывов // Снежные лавины, сели и оценка риска. М., Перо, 2020, с. 18–43.

Лукницкий П.Н. Путешествия по Памиру. М., Мол. гвардия, 1955, 502 с.

Михайлов В.О. Классификация численных математических моделей селевых и склоновых процессов // Инж. геология, 2011, вып. 3, с. 26–33.

Михайлов В.О. Математическое моделирование селей, обвалов и оползней / В.О. Михайлов, С.С. Черноморец. М., Ламберт, 2011, 131 с.

Никулин А.С. Опыт определения углов внутреннего трения селевых грунтов // Сб. науч. тр. ОАО Севкавгипроводхоз. Пятигорск, 2009, вып. 18, с. 30–33.

Попов С.В., Пряхина Г.В., Боронина А.С. Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоемов // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 3, с. 25–32.

Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 14. Бассейны рек Средней Азии. Вып. 3. Бассейн р. Амударьи. Л., Гидрометеоиздат, 1967, 322 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Бассейн р. Амударьи. Л., Гидрометеоиздат, 1971, 472 с.

Рошткала: J-42-108: топограф. карта масштаба 1:100 000 / Генштаб. М., 1988. – http://mapj42.narod.ru/map1/index108.html

СП 425.1325800.2018. Инженерная защита территорий от эрозионных процессов. Правила проектирования. М., Стандартинформ, 2019, 36 с.

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. XXVI, № 3, с. 51–63.

Bhambri R., Watson C.S., Hewitt K. et al. The hazardous 2017–2019 surge and river damming by Shispare Glacier, Karakoram // Scientific Rep., 2020, vol. 10, No. 4685.

Cesca M., D'Agostino V. Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites // WIT Trans. on Eng. Sciences, 2008, vol. LX, p. 197–206.

Che Y., Wang S., Wei Y. et al. Rapid changes to glaciers increased the outburst flood risk in Guangxieco Proglacial Lake in the Kangri Karpo Mountains, Southeast Qinghai-Tibetan Plateau // Natural Hazards, 2022, vol. CX, p. 2163–2184.

Erokhin S.A., Zaginaev V.V., Meleshko A.A. et al. Debris flows triggered from non-stationary glacier lake outbursts: the case of the Teztor Lake complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan) // Landslides, 2018, vol. XV, p. 83–98.

Glazyrin G., Braun L.N., Shchettinnikov A.S. Sensitivity of mountain glacierization to climate changes in central Asia // Zeitschrift fuer Gletxcherkunde und Glazialgeologie, 2018, vol. XXXIX, p. 71–76.

Harrison S., Kargel J.S., Huggel C. et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods // The Cryosphere, 2018, vol. XII, No. 4, p. 1195–1209.

Hewitt K., Jingshi L. Ice-dammed lakes and outburst floods, Karakoram Himalaya: Historical perspectives on emerging threats // Phys. Geography, 2010, vol. XXXI, No. 6, p. 528–551.

Huggel C., Haeberli W., Kääb A. et al. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps // Can. Geotech. J., 2004, vol. XLI, p. 1068–1083.

Huss M., Bauder A., Werder M. et al. Glacier-dammed lake outburst events of Gornersee, Switzerland // J. Glaciology, 2007, vol. 53, No. 181, p. 189–200.

Hutter K., Svendsen B., Rickenmann D. Debris flow modeling. A review // Continuum Mech. Thermodin, 1994, vol. IIX, p. 1–35.

Jan C.D., Shen H.W. Review dynamic modeling of debris flows // Recent Developments on Debris Flows. Lecture Notes in Earth Sciences / A. Armanini, M. Michiue (Eds.). Berlin, Springer, Heidelberg, 1997, vol. LXIV.

Jansky B., Engel Z., Sobr M. et al. The evolution of Petrov lake and moraine dam rupture risk (Tien-Shan, Kyrgyzstan) // Natural Hazards, 2009, vol. L, No. 1, p. 83–96.

Kääb A., Huggel C., Fische L. et al. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview // Natural Hazards and Earth System Sci., 2005, vol. V, p. 527–554.

Khromova T.E., Osipov G.B., Tsvetkov D.G. et al. Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery // Remote Sens. Environ., 2006, vol. CII, No. 1–2, p. 24–32.

Khromova T., Nosenko G., Kutuzov S. et al. Glacier area changes in Northern Eurasia // Environ. Res. Lett., 2014, vol. IX, No. 1, p. 015003.

Komatsu T., Watanabe T. Glacier-related hazards and their assessment in the Tajik Pamir: A short review // Geograph. Studies, 2014, vol. 88, No. 2, p. 117–131.

Kotlyakov V.M., Dyakova A.M., Koryakin V.S. et al. Glaciers of the former Soviet Union // Glaciers of Asia, U.S. Geological Survey Professional Paper 1386–F, 2011, p. 349.

Mergili M., Müller J.P., Schneider J.F. Spatio-temporal development of high-mountain lakes in the headwaters of the Amu Darya River (Central Asia) // Global and Planetary Change, 2013, vol. CVII, p. 13–24.

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 Sci., 2011, vol. XI, p. 1447–1462.

Mergili M., Schneider D., Worni R. et al. Glacial lake outburst floods in the Pamir of Tajikistan: Challenges in prediction and modeling // Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Debris-Flow Haz. Mitigation: Mech. Predic. and Assessment, Proceedings (Padua, June 14–17, 2011). Padua, Italy, 2011, p. 973–982.

O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood, mudflow simulation // J. Hydraulic Eng., ASCE, 1993, vol. CXIX, No. 2, p. 244–259.

Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A. et al. Monitoring of Bashkara glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst // Natural Hazards, 2012, vol. LXI, No. 3, p. 1293–1316.

Quincey D.J., Richardson S.D., Luckman A. et al. Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets // Glasser, 2007, vol. LXI, No. 1–2, p. 0–152.

Vilca O., Mergili M., Emmer A. et al. The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Peru) // Landslides, 2021, vol. XVIII, p. 2211–2223.

Vinogradova T.A., Vinogradov A.Yu. The experimental debris flows in the Chemolgan River basin // Natural Hazards, 2017, vol. LXXXVIII, No. 1, p. 189–198.

Voellmy A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen, Schweiz // Bauzeitung, 1995, vol. LXXIII, No. 12, p. 159–162.

Wang X., Ding Y., Liu S. et al. Changes of glacial lakes and implications in Tian Shan, central Asia, based on remote sensing data from 1990 to 2010 // Environ. Res. Lett., 2013, vol. VIII, No. 4, p. 044052.

Wu Y.H., Liu K.F., Chen Y.C. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study // J. Mountain Sci., 2013, vol. X, No. 2, p. 293–304.

URL: https://earthexplorer.usgs.gov/ (дата обращения: 08.09.2021).

URL: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/ (дата обращения: 15.09.2021).

URL: https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer (дата обращения: 01.09.2021).

References

Vinogradov Yu.B. Method for calculating flood hydrograph in case of breakthrough of a glacier-dammed lake. In: Collection of articles Debris Flows. Moscow, Gidrometeoizdat, 1976, iss. 1, p. 138–153 (in Russian).

Vinogradov Yu.B. Glyatsial'nyye proryvnyye pavodki i selevyye potoki [Glacial outburst floods and mudflows]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977, 154 p. (in Russian).

Vinogradov Yu.B. Etyudy o selevyh potokah [Etudes about mudflows]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, 160 p. (in Russian).

Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. Sovremennyye problemy gidrologii [Modern problems of hydrology]. Moscow, Academy, 2008, 320 p. (in Russian).

Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii [Mathematical modeling in hydrology]. Moscow, Academy, 2010, 304 p. (in Russian).

Gnezdilov Yu.A., Ivaschenko E.N., Krasnykh N.Yu. Assessment of the hypothetical outburst of Lake Bashkara. In: Collection of Scientific Works of JSC Sevkavgiprovodkhoz. Pyatigorsk, 2007, iss. 17, p. 122–145 (in Russian).

Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh. et al. Rock glaciers as origination sites of the catastrophic debris flows. Georisk [Georisk], 2020, vol. XIV, No. 2, p. 52–65 (in Russian).

Kidyaeva V.M., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A. et al. Outburst-hazardous lakes in the Gunt river basin (Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Tajikistan): hazard assessment and outburst modeling. In: Snezhnye laviny, seli i otsenka riska [Avalanches, Mudflows and Risk Assessment]. Moscow, Pero, 2020, No. 4, p. 18–43 (in Russian).

Luknitsky P.N. Puteshestviya po Pamiru [Travels in the Pamirs]. Moscow, Molodaya Gvardiya, 1955, 502 p. (in Russian).

Mikhailov V.O. Classification of numerical mathematical models of mudflow and slope processes. Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology], 2011, No. 3, p. 26–33 (in Russian).

Mikhailov V.O., Chernomorets S.S. Matematicheskoe modelirovanie seley, obvalov i opolzney [Mathematical modeling of mudflows, collapses and landslides]. Moscow, Lambert, 2011, 131 p. (in Russian).

Nikulin A.S. Experience in determining the angles of internal friction of mudflow clay. In: Collection of Scientific Works of JSC Sevkavgiprovodkhoz. Pyatigorsk, 2009, iss. 18, p. 30–33 (in Russian).

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

Surface water resources of the USSR: Hydrological study. Vol. XIV. Basins of the rivers of Central Asia. Issue 3. Amu Darya watershed. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1967, 322 p. (in Russian).

Surface water resources of the USSR. Vol. XVI. Central Asia. Issue 3. Amu Darya watershed. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1971, 472 p. (in Russian).

Roshtkala: J-42-108: topographer. 1:100,000 scale map. General Staff. Moscow, 1988. –
http://mapj42.narod.ru/map1/index108.html

SP 425.1325800.2018 Inzhenernaya zashchita territorij ot erozionnyh processov. Pravila proektirovaniya [Engineering protection of territories from erosion processes. Design rules]. Moscow, Standartinform, 2019, 36 p. (in Russian).

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 [Earth's Cryosphere], 2022, vol. XXVI, No. 3, p. 51–63 (in Russian).

Bhambri R., Watson C.S., Hewitt K. et al. The hazardous 2017–2019 surge and river damming by Shispare Glacier, Karakoram. Scientific Reports, 2020, vol. 10, No. 4685. –
https://doi.org/10.1038/s41598-020-61277-8

Cesca M., D'Agostino V. Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites. WIT Transactions on Eng. Sciences, 2008, vol. LX, p. 197–206.

Che Y., Wang S., Wei Y. et al. Rapid changes to glaciers increased the outburst flood risk in Guangxieco Proglacial Lake in the Kangri Karpo Mountains, Southeast Qinghai-Tibetan Plateau. Natural Hazards, 2022, vol. CX, p. 2163–2184. – https://doi.org/10.1007/s11069-021-05029-5

Erokhin S.A., Zaginaev V.V., Meleshko A.A. et al. Debris flows triggered from non-stationary glacier lake outbursts: the case of the Teztor Lake complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan). Landslides, 2018, vol. XV, p. 83–98. –
https://doi.org/10.1007/s10346-017-0862-3

Glazyrin G., Braun L.N., Shchettinnikov A.S. Sensitivity of mountain glacierization to climate changes in central Asia. Zeitschrift fuer Gletxcherkunde und. Glazialgeologie, 2018, vol. XXXIX, p. 71–76.

Harrison S., Kargel J.S., Huggel C. et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. The Cryosphere, 2018, vol. XII, No. 4, p. 1195–1209. – https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018

Hewitt K., Jingshi L. Ice-dammed lakes and outburst floods, Karakoram Himalaya: Historical perspectives on emerging threats. Physical Geography, 2010, vol. XXXI, No. 6, p. 528–551.

Huggel C., Haeberli W., Kääb A. et al. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. Can. Geotech. J., 2004, vol. XLI, p. 1068–1083.

Huss M., Bauder A., Werder M. et al. Glacier-dammed lake outburst events of Gornersee, Switzerland. J. Glaciology, 2007, vol. 53, No. 181, p. 189–200. –
https://doi.org/10.3189/172756507782202784

Hutter K., Svendsen B., Rickenmann D. Debris flow modeling. A review. Continuum Mech. Thermodin, 1994, vol. IIX, p. 1–35.

Jan C.D., Shen H.W. Review dynamic modeling of debris flows // Recent Developments on Debris Flows. Lecture Notes in Earth Sciences / A. Armanini, M. Michiue (Eds.). Berlin, Springer, Heidelberg, 1997, vol. LXIV.

Jansky B., Engel Z., Sobr M. et al. The evolution of Petrov lake and moraine dam rupture risk (Tien-Shan, Kyrgyzstan). Natural Hazards, 2009, vol. L, No. 1, p. 83–96.

Kääb A., Huggel C., Fische L. et al. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. Natural Hazards and Earth System Sci., 2005, vol. V, p. 527–554. – https://doi.org/10.5194/nhess-5-527-2005

Khromova T.E., Osipov G.B., Tsvetkov D.G. et al. Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery. Remote Sensing of Environment, 2006, vol. CII, No. 1–2, p. 24–32.

Khromova T., Nosenko G., Kutuzov S. et al. Glacier area changes in Northern Eurasia. Environmental Res. Letters, 2014, vol. IX, No. 1, p. 015003.

Komatsu T., Watanabe T. Glacier-related hazards and their assessment in the Tajik Pamir: A short review. Geographical Studies, 2014, vol. 88, No. 2, p. 117–131.

Kotlyakov V.M., Dyakova A.M., Koryakin V.S. et al. Glaciers of the former Soviet Union. Glaciers of Asia, U.S. Geological Survey Professional Paper 1386–F, 2011, p. 349.

Mergili M., Müller J.P., Schneider J.F. Spatio-temporal development of high-mountain lakes in the headwaters of the Amu Darya River (Central Asia). Global and Planetary Change, 2013, vol. CVII, p. 13–24.

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, vol. XI, p. 1447–1462.

Mergili M., Schneider D., Worni R. et al. Glacial lake outburst floods in the Pamir of Tajikistan: Challenges in prediction and modeling. In: Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Debris-Flow Haz. Mitigation: Mech. Predic. and Assessment, Proceedings (Padua, June 14–17, 2011). Padua, Italy, 2011, p. 973–982.

O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood, mudflow simulation. J. Hydraulic Engineering, ASCE, 1993, vol. CXIX, No. 2, p. 244–259.

Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A. et al. Monitoring of Bashkara glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst. Natural Hazards, 2012, vol. LXI, No. 3, p. 1293–1316, DOI: 10.1007/s11069-011-9983-5.

Quincey D.J., Richardson S.D., Luckman A. et al. Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets. Glasser, 2007, vol. LXI, No. 1–2, p. 0–152.

Vilca O., Mergili M., Emmer A. et al. The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Peru). Landslides, 2021, vol. XVIII, p. 2211–2223. – https://doi.org/10.1007/s10346-021-01670-0

Vinogradova T.A., Vinogradov A.Yu. The experimental debris flows in the Chemolgan River basin. Natural Hazards, 2017, vol. LXXXVIII, No. 1, p. 189–198.

Voellmy A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen, Schweiz. Bauzeitung, 1995, vol. LXXIII, No. 12, p. 159–162.

Wang X., Ding Y., Liu S. et al. Changes of glacial lakes and implications in Tian Shan, central Asia, based on remote sensing data from 1990 to 2010. Environmental Res. Letters, 2013, vol. VIII, No. 4, p. 044052.

Wu Y.H., Liu K.F., Chen Y.C. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study. J. Mountain Science, 2013, vol. X, No. 2, p. 293–304.

URL: https://earthexplorer.usgs.gov/ (last visited: 08.09.2021).

URL: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/ (last visited: 15.09.2021).

URL:https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer (last visited: 01.09.2021).

Поступила в редакцию 4 декабря 2021 г.,
после доработки – 10 июля 2022 г.,
принята к публикации 20 сентября 2022 г.