

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.4.042; 551.435.47

DOI: 10.15372/KZ20240106

EDN: TGD PJL

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ПРОРЫВНОГО ПАВОДКА В ДОЛИНЕ РЕКИ ДАШТ
(ПАМИР, ТАДЖИКИСТАН)В.А. Юдина^{1,*}, С.С. Черноморец¹, И.Н. Крыленко^{1,2}, И.В. Крыленко¹, Е.А. Савернюк¹,
Т.А. Виноградова³, А.Г. Гуломайдаров⁴, У.Р. Пирмамадов⁴, Ю.Х. Раимбеков⁴¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия² Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия³ НПО Гидротехпроект, 175400, Валдай, Новгородская обл., ул. Октябрьская, 55А, Россия⁴ Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан,
737450, Душанбе, ул. Мирзо Турсунзаде, 23, Таджикистан*Автор для контакта; e-mail: viktoriakurovskaia@gmail.com

Представлены результаты оценки последствий гипотетического прорывного паводка из озера Дашт (Республика Таджикистан, бассейн р. Шахдара). Расчеты были выполнены с использованием комплекса математических моделей, а именно FLO-2D и FLOVI. Оценка расхода прорывного паводка и селевого потока проводилась в программе FLOVI. В этой программе также оценивалось приращение твердого материала в селевом потоке. Моделирование движения и аккумуляции селевого потока в долине выполнялось в гидродинамической модели FLO-2D. Результаты показали, что внедрение в модель FLO-2D данных, полученных в программе FLOVI с блоком уравнений транспортно-сдвиговой модели, дает более корректные характеристики селя, включая значения расхода, скорости, глубины и площади затопления.

Ключевые слова: ледниковое озеро, прорыв, паводок, селевой поток, Памир, Таджикистан, Горно-Бадахшанская автономная область, FLOVI, FLO-2D.

Ссылка для цитирования: Юдина В.А., Черноморец С.С., Крыленко И.Н., Крыленко И.В., Савернюк Е.А., Виноградова Т.А., Гуломайдаров А.Г., Пирмамадов У.Р., Раимбеков Ю.Х. Оценка опасности прорывного паводка в долине реки Дашт (Памир, Таджикистан) // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 1, с. 62–74. DOI: 10.15372/KZ20240106. EDN: TGD PJL.

HAZARD ASSESSMENT OF LAKE OUTBURST FLOOD IN THE DASHT RIVER VALLEY
(PAMIR MOUNTAINS, TAJIKISTAN)V.A. Iudina^{1,*}, S.S. Chernomorets¹, I.N. Krylenko^{1,2}, I.V. Krylenko¹, E.A. Savernyuk¹,
T.A. Vinogradova³, A.G. Guloimaidarov⁴, U.R. Pirmamadov⁴, Y.Kh. Raimbekov⁴¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia² Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Gubkina St. 3, Moscow, 119333, Russia³ Research and Production Association Gidrotekhproekt LLC, Oktyabrskaya St. 55A, Valdai, Novgorod region, 175400, Russia⁴ Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Rudaki Ave. 34, Dushanbe, 737450 Tajikistan*Corresponding author; e-mail: viktoriakurovskaia@gmail.com

The paper presents the results of assessment the consequences of a hypothetical outburst flood from Lake Dasht (Republic of Tajikistan, Shakh dara River basin). The calculations were performed using a set of mathematical models such as FLO-2D and FLOVI. The discharges of the outburst flood and debris flow were obtained using the FLOVI program. This program was also used to estimate the increment of solid material in the debris flow. Modeling of the debris flow movement and accumulation in the valley was carried out using the FLO-2D hydrodynamic model. The results showed that using data from FLOVI program with transport-shift equation block in the FLO-2D model gives more correct characteristics of the debris flow, including values of flow discharge, velocity, depth, and flooding area.

Keywords: glacial lake, outburst, flood, debris flow, Pamir, Tajikistan, Gorno-Badakhshan Autonomous Region, FLOVI, FLO-2D.

ВВЕДЕНИЕ

Отступление ледников сопровождается интенсивным образованием ледниковых озер [Hartashya et al., 2009; Mergili, Schneider, 2011; Westoby et al., 2014; Buckel et al., 2018; Senese et al., 2018; Bajracharya et al., 2020; Luo et al., 2020; Motschmann et al., 2020; Shugar et al., 2020]. По оценкам [Мухабатов, 2016] в Таджикистане находится около 1449 озер с общей площадью зеркала 716 км² (0.5 % территории). В основном они имеют площадь не более 1 км², 78 % озер расположено в горных областях на высоте 3500–5000 м [Там же]. Только в долине р. Гунт насчитывается более 600 горных озер, часть из которых образовалась в последнее десятилетие [Кидяева и др., 2020]. Увеличение числа и площади ледниковых озер ведет к возрастанию вероятности возникновения опасных гидрологических явлений, таких как прорывные паводки и селевые потоки [Kumar et al., 2012; Aggarwal et al., 2017].

Одной из долин на Памире, в которых проходили катастрофические селевые потоки, является долина р. Дашт. Территория относится к Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана. Последний катастрофический гляциальный селевой поток в долине р. Дашт прошел 7 августа 2002 г. [Докукин и др., 2020]. Сель сформировался вследствие прорыва термокарстового озера, расположенного на массиве морены с ледяным ядром в верховьях р. Дашт. Площадь озера перед прорывом составляла 37 тыс. м² по данным [Mergili, Schneider, 2011] или 44.6 тыс. м² по данным [Докукин и др., 2020]. Согласно [Komatsu, Watanabe, 2013], площадь водоема с момента образования неизменно росла. Так, в 1968 г. она составляла 7 тыс. м², в 1973 г. – 15 тыс. м², в 1983–1984 гг. – 20 тыс. м², в 2002 г. – 32 тыс. м² [Komatsu, Watanabe, 2013]. Прорыв озера произошел, вероятнее всего, вследствие разблокировки каналов подземного стока, расположенных в теле каменного глетчера, т. е. подземным путем [Докукин и др., 2020; Mergili, Schneider, 2011]. Последствия селевого потока 2002 г. были катастрофическими. Погибли 24 человека, было разрушено 75 домов, уничтожено 2 моста, 4 км автомобильной дороги, 30 км линий электропередач [Докукин и др., 2020]. При этом основные разрушения наблюдались непосредственно на конусе выноса в пределах кишлака Дашт. Сведений о разрушениях ниже по долине р. Шахдара не имеется и это свидетельствует о том, что сформировавшееся на ней подпружное озеро спускалось медленно [Там же].

Оценка характеристик катастрофического селевого потока с использованием моделей FLO-2D и RAMMS приводится в работе [Mergili et al., 2011]. Параметры трения для модели RAMMS и реологические параметры селевого потока для FLO-2D были откалиброваны обратным путем

для долины р. Дашт. Исходные данные о рельефе были получены с использованием SRTM-4 (90 м), а также цифровых моделей рельефа (ЦМР) 10 и 20 м, полученных из изображений CORONA, и 5-метровых ЦМР на основе WorldView1 Imagery. Величина объема прорывного паводка по оценкам [Mergili et al., 2011] составила 320 тыс. м³, а последующего селевого потока 1.0–1.5 млн м³. В целом время прохождения, глубина потока и протяженность соответствовали данным полевых исследований [Там же].

Ранее авторами была проведена оценка характеристик прорывного паводка для долины р. Дашт при прорыве озера с современным объемом в 47 тыс. м³ с использованием модели FLO-2D. Входной пиковый расход паводка был оценен по эмпирической формуле [Черноморец и др., 2020]. Впоследствии в работе [Юдина (Куровская), 2022] было показано, что модель FLO-2D не учитывает набора рыхлообломочного материала в процессе формирования селевого потока и насыщения твердым материалом в селевом очаге. Значительное увеличение селевого потока при небольшом начальном объеме воды описано в литературе. Так, на Кавказе в 1958 г. при прорыве оз. Башкара из начального объема прорвавшейся воды около 60 тыс. м³ сформировался сель объемом около 1 млн м³ [Ковалев, 1961; Сейнова, Золотарев, 2001].

В настоящей работе рассматривается ситуация, когда в долине имеется достаточное количество рыхлообломочного материала для формирования селевого потока. Для оценки возможных характеристик прорывного паводка применен комплекс математических моделей и программа FLOVI, опробованные авторами на других долинах, в том числе на Памире [Kurovskaya et al., 2012, 2022; Юдина (Куровская) и др., 2022a,б; Kurovskaya et al., 2022]. Гидрографы прорыва оз. Дашт получены с использованием модели прорыва озера [Виноградов, 1977]. Приращение материала в селевом очаге учтено с применением транспортно-сдвиговой модели [Виноградов, Виноградова, 2010]. Расчет значений скорости, глубины и расходов в долине проведен на основе модели FLO-2D [O'Brien et al., 1993].

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках совместного проекта по оценке прорывных паводков [Черноморец и др., 2020] в августе 2020 г. сотрудниками Филиала Агентства Ага Хана по Хабитат (АКАН) в Республике Таджикистан были выполнены полевые работы, включавшие батиметрическую съемку существующего озера и детальную съемку конуса выноса р. Дашт и нижележащего участка долины р. Шахдара с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самолетного типа SenseFly eBee Plus. Ре-

Таблица 1.

Использованные материалы

Материалы	Дата	Разрешение, м/пиксел	Источник, правообладатель
Ортофотоплан	28.08.2020	0.08	Гуломайдаров А. (АКАН)
Цифровая модель рельефа	14.10.2020	0.3	Юдина В.А.
Данные батиметрической съемки эхолотом и батиметрическая карта	28.08.2020	0.3	Раимбеков Ю., Пирмамадов У., Савернюк Е.А. [<i>Черноморец и др.</i> , 2020]
ALOS PALSAR AP_08193_FBD_F0730_RT1.dem	08.08.2007	12.5	Сайт ASF data search Vertex [https://search.asf.alaska.edu]
Полевые фотографии	28.08.2020		Гуломайдаров А., Раимбеков Ю., Пирмамадов У. (АКАН)

зультаты этих работ были взяты за основу для моделирования в рамках текущего исследования. В табл. 1 представлены исходные материалы, которые использованы в работе.

Для обработки материалов аэрофотосъемки, создания ортофотоплана и ЦМР использован программный комплекс Agisoft Metashape Version 1.5.5. Наземные опорные точки с геодезической привязкой не использовались в процессе съемки БПЛА участка конуса выноса. На всех участках съемки в устьевых областях присутствовало большое количество деревьев. При образовании и движении селевого потока дерева, стоящие на пути, не являются преградой, в отличие, например, от домов. Однако если учитывать высоту деревьев при построении ЦМР, может сложиться ложное представление о присутствии преграды или защитного сооружения, которых на самом деле нет. В связи с этим на всех участках проводилась дополнительная автоматическая классификация плотного облака точек по классу “высокая растительность”. После использования автоматической классификации облака точек была получена ЦМР с достаточно сглаженным рельефом в устьевой области. Оставшееся небольшое количество положительных форм рельефа относится к жилым зданиям и другим постройкам. Общая ошибка полученной ЦМР составила около 1 м. Ортофотоплан построен по исходным снимкам, а в качестве поверхности взята созданная на предыдущем шаге ЦМР. Полученная ЦМР использована для гидродинамического моделирования на участке конуса выноса.

Батиметрическая съемка производилась 28 августа 2020 г. сотрудниками АКАН. Измерения осуществлялись с применением двухлучевого эхолота Lowrance Hook 5 со встроенной высокочувствительной GPS-антенной с поддержкой GLONASS, WAAS, EGNOS, MSAS в режиме мелководья с точностью 0.1 м. Протяженность маршрута по воде составила более 2.8 км при скорости 2.0–3.5 км/ч. При проведении работ на озере получена одна эхограмма. Большая часть территории озера охвачена промерными галсами: один по контуру озера, два продольных и 18 поперечных. Расстояние между галсами преимущественно от

10 до 25 м, а между точками, конвертированными с эхограммы, 2 м. Контур озера проведен по космическому снимку Sentinel-2 от 26.08.2020 г. при сравнении со снимками высокого разрешения базового слоя ArcGIS Imagery и полевыми наземными фотографиями участников экспедиции. Поправка на глубину погружения эхолота составила +0.3 м. Обработка материалов батиметрической съемки проводилась в программах Reef Master v. 1.8.41 (просмотр и визуализация данных эхолотации, сохранение исходных данных эхограмм в нужном для дальнейшей обработки формате) и ArcGIS 10.8.5 (редактирование, обработка и визуализация исходных и конечных данных). Параметры озера приведены ниже. Изобаты проведены через 1 м, а итоговая карта была построена в масштабе 1:4000.

В настоящей статье используется компьютерная программа FLOVI, разработанная В.А. Юдиной [Юдина и др., 2022]. В основе программы лежат уравнения модели прорыва озера и транспортно-сдвиговой модели, предложенные Ю.Б. Виноградовым [Виноградов, 1977, 1980; Виноградов, Виноградова, 2008].

Программа FLOVI. Модель прорыва озера.

Для расчета гидрографа прорывного паводка использовалась математическая модель прорыва ледникового озера через внутриледниковый туннель [Виноградов, 1977; Виноградов, Виноградова, 2010]. В основе лежит положение о том, что достаточно тепла, выделяемого за счет превышения температуры воды над температурой тающего льда, и особенно диссипации энергии водного потока, движущегося через незначительный внутриледниковый или подледниковый канал, для выработки за относительно короткий промежуток времени туннеля, способного обеспечить катастрофический сброс воды из озера [Виноградов, Виноградова, 2008]. К отличительным особенностям данной модели можно отнести сочетание физических законов, а также возможность использования результатов экспедиционных исследований для вычисления необходимых параметров и характеристик на основе полевых данных.

Ранее модель использовалась для расчета прорывного паводка для озер в Исландии, Бри-

Таблица 2. Входные характеристики и параметры для моделирования в программах FLOVI и FLO-2D

Входные данные	Сценарий I	Сценарий II	Источник
Объем озера, м ³	47 000		[Черноморец и др., 2020]
Длина подледникового канала, м (участок 0–1)	930		ALOS PALSAR, 12.5 м
Средний уклон потенциального селевого очага (участок 1–2), град	19.5		
Длина потенциального селевого очага (участок 1–2), м	214		
Средний уклон участка подпитки в русле (участок 3–4), град	–	14	
Длина участка подпитки в русле (участок 3–4), м	–	408	
Температура воды в озере, °C	2.5		[Гнездилов, 2007]
Предел упругости, кПа	74		[Petrakov et al., 2012]
Динамическая вязкость, кПа·с	3.7		
Угол внутреннего трения, град	35		[Никулин, 2009; Виноградов, Виноградова, 2010]
Начальная влажность селеформирующего массива	0		
Базовый расход р. Дашт, м ³ /с	5		[Ресурсы..., 1971]
Базовый расход р. Шахдара, м ³ /с	30		

танской Колумбии, Таджикистане и США [Виноградов, 1977; Виноградов, Виноградова, 2008]. Также модель применялась для оценки максимального расхода при прорыве оз. Башкара [Гнездилов и др., 2007] и подледниковых водоемов Антарктиды [Попов и др., 2019].

Программа FLOVI. Транспортно-сдвиговая модель селеобразования. Модель была разработана Ю.Б. Виноградовым на основе данных, полученных в ходе воспроизведения искусственных селевых потоков в долине р. Чемолган в 1971–1975 гг. [Виноградова, Виноградов, 2017]. При этом принимается, что приращение расхода твердого вещества при движении по тальвегу селевого очага прямо пропорционально коэффициенту неустойчивости потенциального селевого массива, элементарной потенциальной мощности потока и показателю подвижности селевой массы [Виноградов, Виноградова, 2008]. Основные уравнения модели представлены в публикациях [Куrowsкая и др., 2020; Юдина (Куrowsкая) и др., 2022а].

Морфометрические характеристики селевого очага, необходимые для транспортно-сдвиговой модели, были получены с использованием цифровой модели рельефа ALOS PALSAR (размер ячейки 12.5 м) (см. табл. 1). Характеристики селеформирующих грунтов взяты из работ [Никулин, 2009; Виноградов, Виноградова, 2010] и приведены в табл. 2.

Гидродинамическая модель FLO-2D. Для расчета характеристик селевого потока в долине использовалась двумерная гидродинамическая модель FLO-2D [O'Brien et al., 1993]. В основу модели положено решение уравнений Сен-Венана [Кюнж и др., 1985]. При моделировании движения селевого потока в модели FLO-2D принимается, что сели движутся как жидкость Бингама (вязкопластичная жидкость) [O'Brien et al., 1993].

Для гидродинамической модели FLO-2D в качестве базовых данных о рельефе территории

использовалась цифровая модель рельефа ALOS PALSAR. Контуры русел уточнялись по данным космических снимков. Данные беспилотной аэрофотосъемки позволили получить рельеф для конуса выноса р. Дашт с высокой детальностью с разрешением 0.3 м. Наиболее вероятные реологические параметры селевых потоков были получены на основе предыдущих исследований по моделированию прорывоопасных озер [Petrakov et al., 2012], которые заметно отличаются от параметров, приведенных в [Mergili, Schneider, 2011].

СОСТОЯНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Дашт является левым притоком р. Шахдара и впадает в нее на 29.9 км выше устья последней. Река Шахдара является левым притоком р. Гунт, которая, в свою очередь, является правым притоком крупной р. Пяндж. В приустьевой зоне р. Дашт на левом берегу расположены кишлаки Дашт и Тирбар, а напротив (на правом борту р. Шахдара) – кишлак Бародж. Максимальная высота бассейна р. Дашт составляет 5137 м (пик Вез). Исток реки находится у крайнего правого ледника на высоте 4450 м, после чего вода следует 2 км по подземным каналам и выходит на поверхность под каменным глетчером в районе отметки 4100 м, устье – в р. Шахдара на высоте 2590 м. Длина р. Дашт 10.2 км (от выхода потока из-под языка каменного глетчера), площадь водосбора (без учета конуса выноса) составляет 31.5 км² (рис. 1, а).

В верховьях главной реки находится обширный ледниковый цирк, в котором располагается карово-долинный ледник, распадающийся на три языка, разделенных скальными выступами (см. рис. 1, з). Ниже этого ледника находятся два активных каменных глетчера (см. рис. 1, б), на одном из которых (правом) ранее существовало термокарстовое озеро, прорвавшееся в 2002 г. (см. рис. 1, б, контур 9).

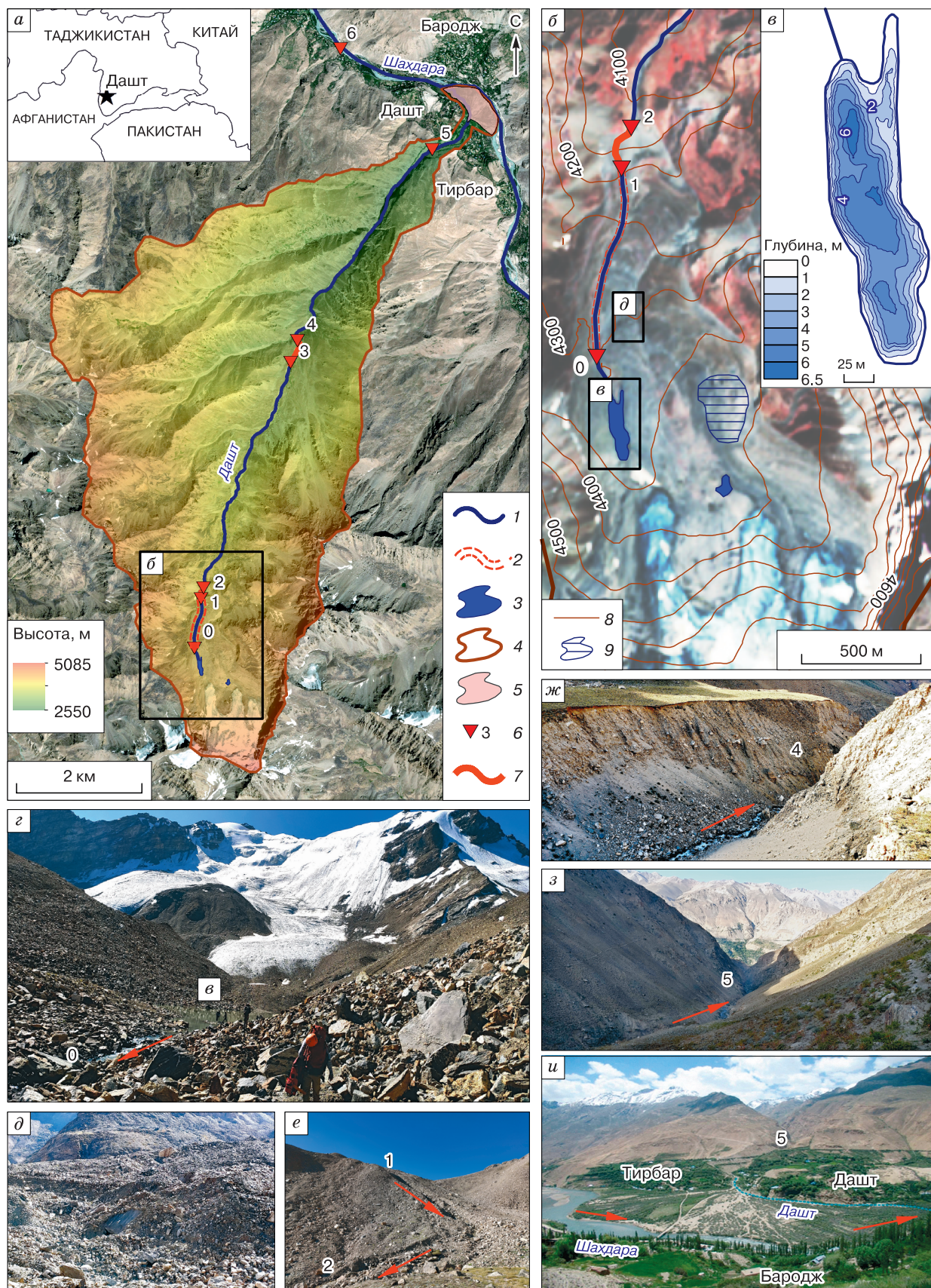


Рис. 1. Бассейн реки Дашт.

a – схема бассейна р. Дашт: 1 – реки, 2 – каналы подземного стока из озера Дашт, 3 – контуры современных озер, 4 – граница водосборного бассейна р. Дашт, 5 – конус выноса р. Дашт, 6 – створы и их номера для расчета гидрографов, 7 – селевой очаг и участок дополнительной подпитки потока твердым материалом (подложка – мозаика космических снимков World Imagery); *б* – схема верховьев долины р. Дашт: 8 – изогипсы (проведены через 50 м), 9 – максимальный контур озера, прорвавшегося в 2002 г. (подложка – космический снимок Sentinel-2 от 06.08.2022 г.); *в* – батиметрическая карта оз. Дашт по состоянию на 28.08.2020 г. (контур озера проведен по космическому снимку Sentinel-2 от 26.08.2020 г.); *г* – приледниковая зона и участок поверхностного стока с оз. Дашт (точка 0 на схемах *a* и *б*); *д* – выход погребенного льда на поверхность в районе изогипсы 4300 м; *е* – развивающаяся эрозионная борозда на уступе каменного глетчера (точки 1 и 2 на схемах *a* и *б*); *ж* – участок дополнительной подпитки потока твердым материалом (точка 4 на схеме *a*); *з* – сужение долины р. Дашт и расщелина перед выходом на конус выноса (точка 5 на схеме *a*); *и* – поросший растительностью конус выноса (контур 5 на схеме *a*), образовавшийся в результате селевого потока, сформировавшегося при прорыве озера 2002 г. Красными стрелками показано направление стока. Цифры на фотографиях соответствуют положениям створов для расчета гидрографов на схемах *a* и *б*. Автор полевых фото У.Р. Пирмамадов (архив АКАН).

В теле второго (левого) каменного глетчера в настоящее время существует термокарстовое озеро, которое начало образовываться в 1976 г. после отступления ледника. При сравнении разновременных космических снимков установлено, что озеро не меняется в размерах уже в течение 17 лет, а максимальную площадь имеет после схода снежного покрова (в конце июля – первой декаде августа). Из этого озера на протяжении 250 м происходит поверхностный сток, который затем исчезает и переходит в подземный, выклиниваясь у подножия каменного глетчера.

По результатам полевых работ и батиметрической съемки 28.08.2020 г. получены следующие морфометрические характеристики озера Дашт: его длина 250 м, максимальная ширина 55 м, максимальная глубина 6.5 м, средняя глубина 3.25 м, площадь 14 тыс. м² (см. рис. 1, *в*).

Озеро подпружено мореносодержащим льдом. Питание озера осуществляется в основном за счет стока с левого языка ледника, расположенного в верховьях р. Дашт (см. рис. 1, *г*), а также за счет таяния погребенных льдов, расположенных в окружающих данное озеро моренах.

Наличие на поверхности левого каменного глетчера термокарстовых западин, выходов погребенных льдов на поверхность и трещин в них (см. рис. 1, *д*), а также эрозионных борозд и следов оплывин на крутом уступе свидетельствует о том, что идут активные термокарстовые процессы. В теле каменного глетчера происходят выбросы воды по подземным каналам стока, которые иногда выходят на поверхность и оставляют следы на его поверхности. Подобные выбросы сопровождаются небольшими паводками ниже по течению, но не приводят к формированию селей из-за небольших объемов воды и, соответственно, недостаточной мощности потока для вовлечения твердого материала. Свежих следов селепроявлений ниже каменного глетчера при сравнении доступных космических снимков с 2008 по 2020 г. не выявлено. Тем не менее вероятность повторения событий

2002 г. остается довольно высокой, так как основной сток из оз. Дашт осуществляется подземным путем, а окружающие его морены содержат большое количество погребенного льда. Река Дашт имеет в целом прямолинейный продольный профиль без заметных ступеней и перегибов. В верхнем течении и верхней половине среднего течения (до отметки 5.5 км от устья) долина реки типичная троговая, ниже и до самого конуса выноса она сильно сужается и становится U-образной, а на некоторых участках даже V-образной (см. рис. 1, *з*).

Устье основного русла р. Дашт в настоящее время в соответствии с данными наземной и аэросъемки с БПЛА, выполненной в 2020 г., находится в левой части обширного селевого конуса выноса (см. рис. 1, *a*, *и*).

Конус выноса сложен рыхлым обломочным материалом, вынесенным из бассейна реки. Значительная часть отложений (1.0–1.5 млн м³) поступила сюда в результате катастрофического селя, прошедшего 7 августа 2002 г. по р. Дашт [Докучкин и др., 2020; Mergili, Schneider, 2011]. Площадь конуса выноса, измеренная по ортофотоплану, составляет 357 тыс. м².

После селевого потока 2002 г. на конусе выноса в русле р. Дашт было установлено несколько селенаправляющих стенок. Три стенки расположены вдоль направления потока по левому берегу в 200 м выше конуса выноса; одна стенка по правому берегу начинается в 30 м выше конуса выноса и переходит в крупные глыбы, расположенные непосредственно в вершине конуса выноса, к которым примыкает следующая стенка. Здесь же перед выходом на конус размещен автомобильный мост. Указанные стенки по правому борту и мост в текущем варианте искусственно сужают канал стока почти в 3 раза и полностью расположены поперек русла и на пути следования селевого потока 2002 г. Сведения о последующих селепроявлениях после 2002 г. в долине р. Дашт отсутствуют, как и соответствующие следы в долине и на конусе выноса.

СЦЕНАРИИ И ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Авторами рассматриваются возможные последствия прорыва озера Дашт (см. рис. 1, в) с современным объемом 47 тыс. м³ с использованием комплекса математических моделей. Исследуемая область ниже озера была разбита на несколько участков (см. рис. 1).

Гипотетический прорыв озера в верховьях р. Дашт, скорее всего, произойдет по сценарию, близкому к событиям 2002 г., т. е. вследствие закупорки каналов подземного стока, переполнения озера и последующего его прорыва подземным путем при раскупорке каналов. Условия для трансформации водного потока в селевой сохраняются: уклоны русла ниже языка каменного глетчера довольно значительные (150 ‰); в верхней и средней частях долины (т. е. на протяжении 5–6 км) в ее днище к руслу выходят рыхлые моренные отложения, которые выступают в роли потенциально селевого массива; в нижней части среднего течения и в верхней части нижнего (5–2 км от устья) сформировалась зона транзита с отвесными коренными бортами и уклонами около 160–170 ‰. В днище долины р. Дашт с левого и правого бортов на участке 7.5–9.5 км от устья подходят языки каменных глетчеров, что создает угрозу формирования временной подпруды и, соответственно, появления “каскадного эффекта”, что предполагалось и в 2002 г. [Mergili et al., 2011].

Моделирование выполнялось по двум сценариям. На первом этапе для I и II сценариев для участков зарождения прорывного паводка (см. рис. 1, з) и селевого потока на уступе левого ка-

менного глетчера (см. рис. 1, е) применялась программа FLOVI [Юдина (Куровская) и др., 2022б; Юдина и др., 2022]. Полученный на данном этапе селевой гидрограф являлся входными гидрологическими данными при зонировании долины с применением гидродинамической модели FLO-2D [O'Brien et al., 1993]. В сценарии II был также выделен участок возможной дополнительной подпитки рыхлым обломочным материалом движущегося потока в долине (см. рис. 1, ж). Моделирование селя на данном участке выполнено в программе FLOVI. В качестве входного использовался гидрограф, полученный на предыдущем этапе моделирования по модели FLO-2D. Рассчитанный гидрограф селевого потока в программе FLOVI после участка дополнительной подпитки твердым материалом использовался в качестве входного в модели FLO-2D. Таким образом, была продемонстрирована возможность поэтапного использования программы FLOVI и модели FLO-2D. В табл. 2 приведены данные для моделирования по сценариям I и II. Результаты моделирования по обоим сценариям ниже сравниваются с результатами моделирования с использованием только модели FLO-2D [Черноморец и др., 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

По результатам моделирования по сценарию I в случае прорыва оз. Дашт современного объема максимальный расход прорывного паводка составит 18 м³/с и будет наблюдаться через 1 ч после начала, при этом длина канала составит 930 м.

Длина подледникового туннеля является одной из важных характеристик при моделировании прорывного паводка. В связи с этим дополнительно были проведены численные эксперименты с различной длиной подледникового канала (рис. 2), которые показали, что при увеличении длины канала максимальный расход уменьшается. В целом сокращение канала примерно на 600 м приведет к увеличению пикового расхода паводка на 10 %. Также надо отметить, что разница во времени добегания максимального расхода между вариантом с наибольшей и наименьшей длиной канала составляет около 4 ч. Разница в расходах для данных вариантов расчета составит около 29 %.

Таким образом, в случае если точка выхода подледникового канала будет выше отмеченной, например, из-за влияния трещин в погребенном льду морены, разница в максимальных расходах не будет значительной.

Далее на участке селевого очага применялась программа FLOVI, а именно второй блок уравнений, который включает транспортно-сдвиговую модель. На выходе из селевого очага в транспортно-сдвиговой модели селеобразования расход потока увеличивается в 4 раза и достигает 79 м³/с (рис. 3). Средняя скорость составит 11 м/с, а плотность потока равна 1773 кг/м³.

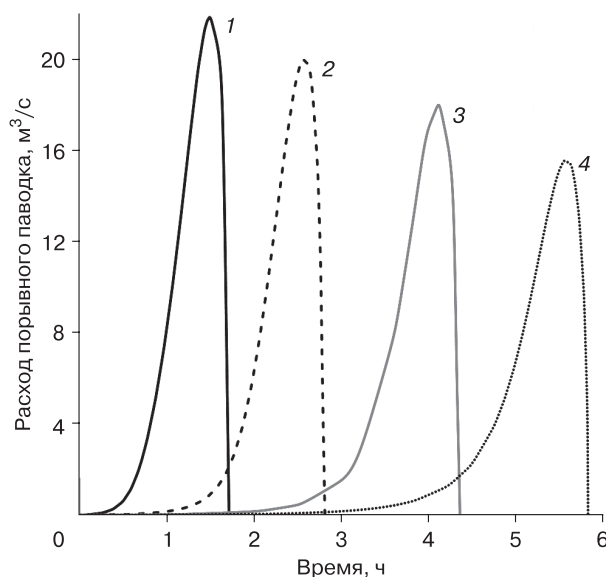


Рис. 2. Гидрографы прорывного паводка с разной длиной канала:

1 – 300 м; 2 – 600 м; 3 – 930 м; 4 – 1200 м.

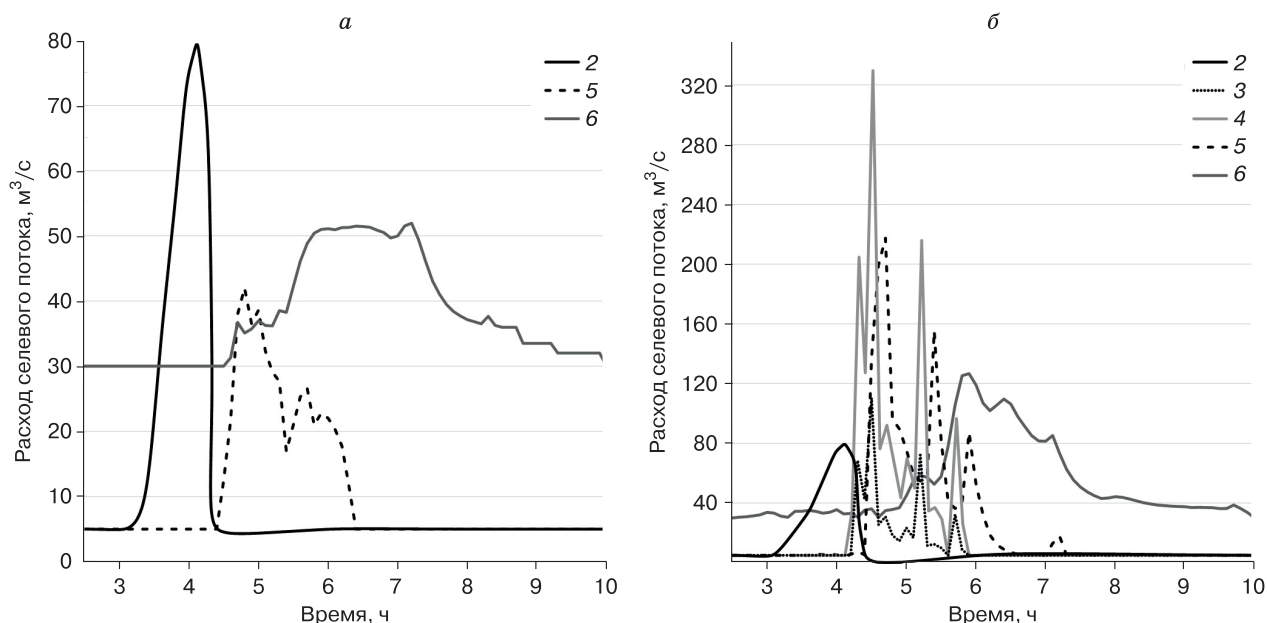


Рис. 3. Гидрографы прорывного паводка, полученные по результатам моделирования на основе программного комплекса FLO-2D.

а – сценарий I: 2 – верховья долины р. Дашт на выходе из селевого очага, 5 – долина р. Дашт и конус выноса, 6 – р. Шахдара ниже конуса; *б* – сценарий II: 2 – верховья долины р. Дашт на выходе из селевого очага, 3 – долина р. Дашт перед участком подпитки, 4 – долина р. Дашт на выходе из участка подпитки, 5 – р. Дашт на конусе выноса, 6 – р. Шахдара ниже конуса.

В табл. 3 приведены результаты моделирования максимального селевого расхода и времени добега для пяти участков в долине р. Дашт.

При сравнении данных моделирования можно видеть, что без применения транспортно-сдвиговой модели расход на вершине конуса выноса будет занижен более чем в 2 раза. Разница в расходах для р. Шахдара ниже конуса составит более 44 %.

Глубина потока в долине р. Дашт по результатам моделирования при сценарии I может составлять в среднем 1.0–2.5 м, на участках сужений русла достигает 7.4 м. Средняя скорость потока в рус-

ле составит 5.0–7.5 м/с. Максимальная скорость потока будет наблюдаться на участках сужений, в частности на участке дополнительной подпитки материалом, и будет составлять 11.4 м/с. Такие гидравлические характеристики потока обуславливают высокий балл опасности во всей долине р. Дашт.

По сценарию II до участка подпитки средняя скорость потока в русле будет составлять от 4.0 до 6.5 м/с. На самом участке подпитки по результатам моделирования в транспортно-сдвиговой модели средняя скорость составит 7.5 м/с. Далее до вершины конуса выноса средняя скорость потока

Таблица 3. Максимальные расходы и время добега на пяти участках по результатам моделирования с использованием модели FLO-2D [Черноморец и др., 2020] и комплекса моделей FLOVI и FLO-2D для двух сценариев расчетов

Номер створа	Описание створа	Модель FLO-2D		Модели FLOVI и FLO-2D	
		Макс. расход, м³/с	Время добега, ч	Макс. расход, м³/с	Время добега, ч
0	Расход прорывного паводка	62.5	2	18	4.0
2	Верховья долины р. Дашт на выходе из селевого очага	–	–	79	4.11
3	Долина р. Дашт перед участком подпитки	–	–	–/110	–/4.5
4	На выходе из участка подпитки	–	–	–/330	–/4.52
5	Река Дашт на вершине конуса выноса	20	2.8	42/317	4.8/4.7
6	Река Шахдара ниже конуса	36	4.5	52/127	7.2/5.9

Примечание. Значения параметров в створах (согласно рис. 1, *а*) по сценариям I и II в числителе и знаменателе соответственно.

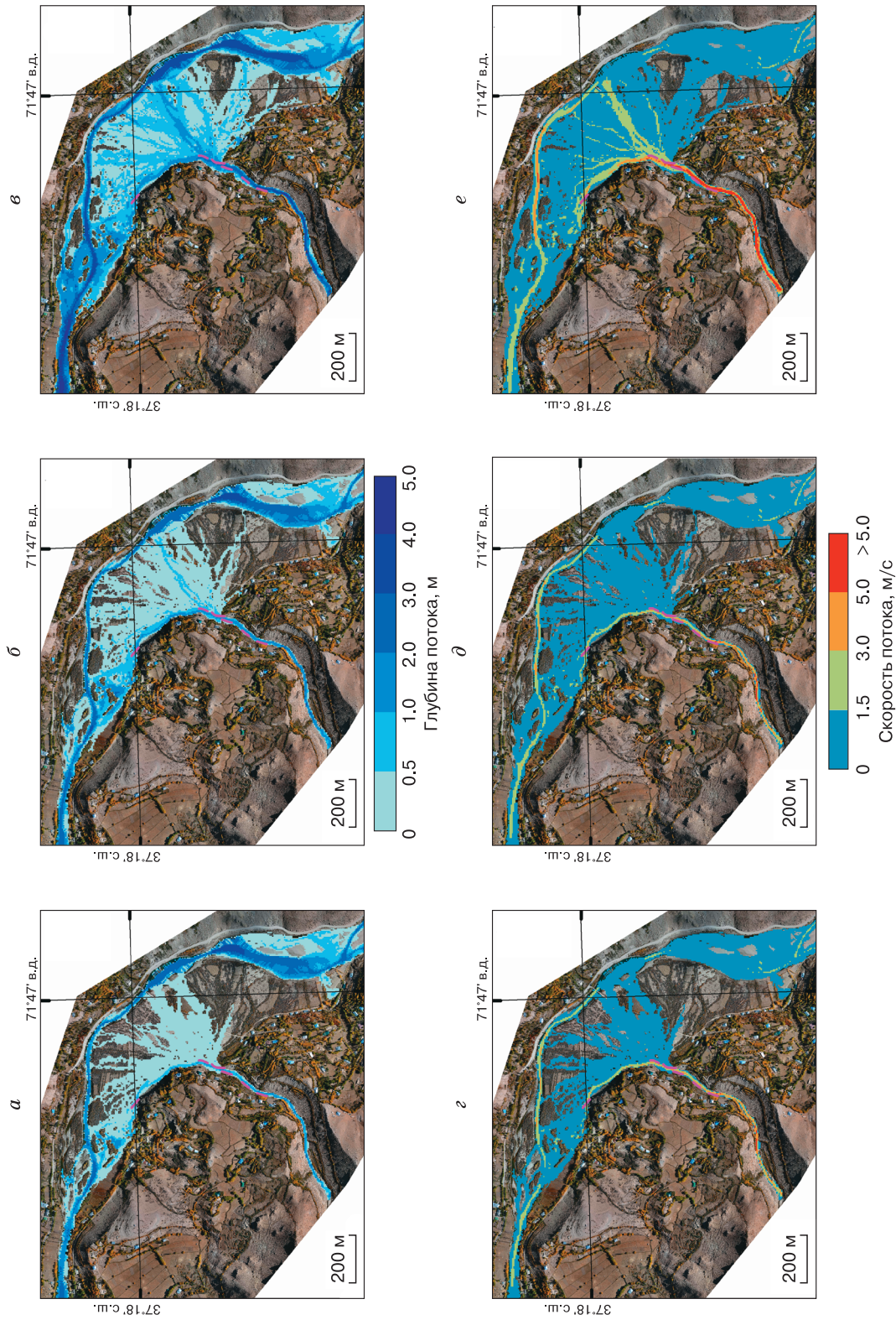


Рис. 4. Результаты моделирования в устье реки Дашт при прорыве озера Дашт с применением комплекса математических моделей FLO-2D и FLOVI.

а, г – глубины затопления и скорости потока без учета дополнительных участков подпитки твердым материалом по сценарию из [Черноморец и др., 2020]; *б, д* – то же при сценарии I; *в, е* – то же при сценарии II. Розовыми линиями показано положение защитных стенок на левом и правом берегах р. Дашт. Подложка – ортофотоплан с БПЛА SenseFly eBee Plus от 28.08.2020 г.

в русле будет составлять от 7 до 11.5 м/с, максимальная составит 17.3 м/с. Максимальная глубина потока от верховий до участка подпитки будет составлять 2.2 м. После участка подпитки средняя глубина в русле будет приблизительно 5 м, наибольшая 13 м в месте сужения русла в 1 км от вершины конуса выноса.

Максимальные глубины, полученные по расчетам только с моделью FLO-2D, составили более 2–3 м (рис. 4, а), скорости изменяются от 3 до 5 м/с [Черноморец и др., 2020], что значительно ниже величин по I и II сценариям.

На конусе выноса р. Дашт, согласно сценарию I, поток будет существенно растекаться с глубинами преимущественно до 1 м, в русле р. Дашт глубина будет достигать 3.5 м (см. рис. 4, б). Также наибольшая скорость течения (выше 5 м/с) будут наблюдаться в действующем русле рек Дашт и Шахдара (см. рис. 4, в). Произойдет перелив потока через селезащитные стенки, глубина в местах перелива варьирует от 0.5 до 1.0 м. Следует отметить, что селезащитные стенки установлены фрагментарно, поэтому поток может растекаться и в промежутках между стенками.

По сценарию II помимо действующего русла на конусе выноса выделяется еще несколько русел с высокими значениям скорости и глубины потока. Зона затопления на самом конусе существенно увеличивается. Как можно видеть, при реализации данного сценария в зону затопления попадают дома, расположенные в 30–40 м от действующего русла, а также дома, расположенные на левой части конуса выноса (см. рис. 4, в). Глубина потока при этом может изменяться от 0.5 до 2 м. На большей части конуса выноса глубина потока также будет составлять 2 м, максимальная глубина потока в руслах рек Дашт и Шахдара будет достигать 6 м (см. рис. 4, в). Скорость потока на значительной части конуса выноса будет достигать 1.5 м/с, в отдельных рукавах до 3 м/с (см. рис. 4, е). В руслах рек Дашт и Шахдара наблюдаются скорости течения выше 5 м/с.

Согласно [Черноморец и др., 2020], при использовании только модели FLO-2D на конусе р. Дашт поток будет существенно растекаться с глубинами преимущественно до 1 м и скоростями до 1.5 м/с, при этом в западной части конуса выделяется часть потока со скоростями 1.5–3.0 м/с (см. рис. 4, з). Площадь затопления оказывается на 26 % ниже, чем для сценария I, и на 48 % для сценария II.

По результатам моделирования для всех вариантов расчетов видно, что берегозащитные стенки не будут препятствовать растеканию потока на конусе. В зоне затопления окажутся автомобильный мост в вершине конуса выноса через р. Дашт, автомобильные дороги, проходящие по конусу выноса р. Дашт и по правому борту р. Шахдара, мост

через Шахдару, некоторые дома, дворы, объекты инфраструктуры и сельскохозяйственные земли одноименного кишлака.

Нужно отметить, что время добегания расходов потоков на вершине конуса выноса р. Дашт практически совпадает со временем добегания потока при моделировании прорыва оз. Дашт в 2002 г. [Mergili et al., 2011]. Однако отсутствие в указанной публикации данных о концентрации потока, а также значений эмпирических коэффициентов, необходимых для расчета реологических параметров модели FLO-2D, не позволяет провести сравнительные расчеты. При сравнении значений, приведенных в [Mergili et al., 2011], и данных, полученных с помощью эмпирических коэффициентов в лабораторных условиях и рекомендуемых авторами модели для расчета [O'Brien, Julien, 1988], также были выявлены большие различия.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В рамках исследований была выполнена оценка последствий возможных прорывных паводков в долине р. Дашт с использованием данных полевых исследований и комплекса математических моделей. Для расчета характеристик прорывного паводка использовалась модель прорыва озера, реализованная в программе FLOVI. Численные эксперименты показали, что уменьшение длины подледникового канала на 600 м приведет к росту максимального расхода на 10 %. Таким образом, в случае если точка выхода подледникового канала будет выше отмеченной, например, из-за влияния трещин в погребенном льду морены, разница в максимальных расходах не будет значительной.

В модели FLO-2D не учитываются эрозионные процессы, происходящие в русле, а именно увеличение расхода при формировании селевого потока за счет приращения твердого материала. В связи с этим для участка селевого очага применялась транспортно-сдвиговая модель в программе FLOVI. По результатам моделирования, на выходе из селевого очага расход селевого потока увеличился примерно на 77 %. При сравнении результатов моделирования с использованием комплекса моделей (FLOVI и FLO-2D) и только модели FLO-2D можно видеть, что расход на вершине конуса выноса занижается более чем в 2 раза. Для реки Шахдара ниже конуса выноса разница в расходах составит более 44 %.

В работе продемонстрирована возможность использования транспортно-сдвиговой модели не только для селевого очага, но и на участке дополнительной подпитки твердым материалом в русле. На выходе из данного участка расход селевого потока увеличится на 67 %, а на вершине конуса выноса – примерно на 81 %. Ниже конуса выноса в русле р. Шахдара расходы по сценариям с учетом

участка дополнительной подпитки и без учета отличаются примерно на 59 %. Время добегания максимального расхода для сценария без учета данного участка оказывается на 1.3 ч больше вследствие распада волны.

Сравнение результатов моделирования показало, что при прочих равных условиях учет приращения рыхлого обломочного материала как в селевом очаге, так и на участке дополнительной подпитки в долине приводит к увеличению глубин, расходов и площадей затопления на конусе выноса. Таким образом, использование программы FLOVI, а именно, блока с уравнениями транспортно-сдвиговой модели, учитывающей набор материала селевым потоком в процессе движения, позволяет получать более корректные характеристики селя, включая значения расхода, скорости, глубины и площади затопления.

По результатам моделирования гипотетического прорыва современного озера Дашт были получены карты пространственного распределения глубины и скорости потока, расходы на различных участках и время добегания. Показано, что береговые стенки, расположенные вдоль русла р. Дашт на конусе выноса, не будут выполнять свою защитную функцию. Поток будет растекаться на конусе, а в зоне затопления могут оказаться автомобильные дороги, мосты, дома и объекты инфраструктуры. Полученные результаты необходимо учитывать при планировании развития речных долин Дашт и Шахдара.

Благодарности. Авторы благодарят Ш. Гуломносирова, С. Доробекова, А. Муминшоева, Л. Улугбекова, И. Элнзарова (Агентство Ага Хана по Хабитат) за участие в сборе полевых данных, Р.А. Бобова (Организация Ага Хана по Развитию), Т. Сабзалиева (Агентство Ага Хана по Хабитат) за логистическую поддержку.

Работа выполнена при финансовой поддержке Агентства Ага Хана по Хабитат при частичном финансировании РФФИ (проект 20-35-90006) и тем госзадания МГУ им. М.В. Ломоносова (разделы I.7 – ЦИТИС 121051300175–4, I.10 – ЦИТИС 121051400038–1) и Института водных проблем РАН (FMWZ-2022-0001).

Литература

- Виноградов Ю.Б.** Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л., Гидрометеоиздат, 1977, 154 с.
- Виноградов Ю.Б.** Этюды о селевых потоках. Л., Гидрометеоиздат, 1980, 144 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. 14, № 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.
- Ковалев П.В.** Современное оледенение бассейна р. Баксан // Материалы Кавказской экспедиции (по программе МГТ). Харьков, Харьк. ун-т, 1961, т. II, с. 1–306.
- Куrowsкая В.А., Черноморец С.С., Виноградова Т.А. и др.** Оценка количественных характеристик селевого потока 2015 г. в долине р. Барсемдара (Таджикистан) по видеоматериалам и результатам моделирования // Геориск, 2020, т. 14, № 3, с. 12–22.
- Кюнж Ж., Холли Ф., Вервей А.** Численные методы в задачах речной гидравлики: Пер. с англ. Ю.В. Абрамова, Е.И. Масса. М., Энергоатомиздат, 1985, 255 с.
- Мухаббатов Х.М.** Водные ресурсы Таджикистана и проблемы водопользования в Центральной Азии // Пробл. постсоветского пространства, 2016, № 3, с. 29–45.
- 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. XXXI, № 3, с. 25–32.
- Ресурсы поверхностных вод СССР.** Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Бассейн р. Амударья. Л., Гидрометеоиздат, 1971, 472 с.
- Сейнова И.Б.** Ледники и сели Приэльбрусья (Эволюция оледенения и селевой активности) / И.Б. Сейнова, Е.А. Золотарев. М., Науч. мир, 2001, 204 с.
- Черноморец С.С., Висхаджиева К.С., Кидяева В.М. и др.** Батиметрическая съемка озера Сарез (1 этап): Отчет. М., МГУ, 2020, т. 1, 200 с.
- Юдина (Куrowsкая) В.А.** Оценка характеристик гляциального селевого потока с использованием цепочки математических моделей // Геогр. вестн., 2022, т. 4, № 63, с. 67–79.
- Юдина (Куrowsкая) В.А., Черноморец С.С., Виноградова Т.А., Крыленко И.Н.** Моделирование селевых потоков снегового генезиса (на примере реки Барсемдара, Таджикистан) // Криосфера Земли, 2022а, т. XXVI, № 3, с. 51–63.
- Юдина (Куrowsкая) В.А., Черноморец С.С., Крыленко И.Н. и др.** Оценка возможных последствий прорывных паводков на примере долины реки Бодомдара (Таджикистан) // Криосфера Земли, 2022б, т. XXVI, № 5, с. 14–28.
- Юдина В.А., Юдин Н.Е., Виноградова Т.А.** Программа для расчета прорывного паводка и селевого потока (FLOVI). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022683748; приоритет от 24.10.2022; зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ РФ 08.12.2022.
- Aggarwal S., Rai S.C., Thakur P.K., Emmer A.** Inventory and recently increasing GLOF susceptibility of glacial lakes in Sikkim, Eastern Himalaya // Geomorphology, 2017, vol. 295, p. 39–54.
- Bajracharya S.R., Maharjan S.B., Shrestha F. et al.** 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 // *Int. Centre for Integr. Mountain Develop.* GPO Box. 2020, p. 54.

Buckel J., Otto J.C., Prasicek G., Keuschnig M. Glacial lakes in Austria –distribution and formation since the Little Ice Age // *Glob. Planet. Change*, 2018, vol. 164, p. 39–51.

Haritashya U.K., Bishop M.P., Shroder J.F. et al. Space-based assessment of glacier fluctuations in the Wakhan Pamir, Afghanistan // *Clim. Change*, 2009, vol. 94, p. 5–18.

Komatsu T., Watanabe T. Glacier-Related Hazards and their assessment in the Tajik Pamir: a short review // *Geogr. Studies*, 2013, vol. 88, No. 2, p. 117–131.

Kumar B., Murugesh Prabhu T.S. Impacts of climate change: Glacial Lake outburst floods (GLOFs) // *Climate Change in Sikkim Patterns, Impacts and Initiatives. Inform. and Public Relat. Departm., Gover. Sikkim, Gangtok, India*, 2012, p. 81–102.

Kurovskaia V.A., Chernomorets S.S., Vinogradova T.A. et al. Scenarios calculations of outburst flood and debris flows // *IOP Conference Ser.: Earth and Environ. Sci.*, 2021, vol. 834, 012009.

Kurovskaia V.A., Chernomorets S.S., Krylenko I.N. et al. Buzulgan rockslide: simulation of debris flows along Gerkhozhan-Su River and scenarios of their impact on Tyryauz Town after changes in 2020 // *Water Res.*, 2022, vol. 49, No. 1, p. 58–68.

Luo W., Zhang G., Chen W., Xu F. Response of glacial lakes to glacier and climate changes in the western Nyainqentanglha range // *Sci. Total Environ.*, 2020, vol. 735, 139607.

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, vol. 11, p. 1447–1462.

Mergili M., Schneider D., Worni R., Schneider J. Glacial Lake outburst floods in the Pamir of Tajikistan: Challenges in prediction and modelling // *Proc. of the 5th Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment (Padova, Italy, 14–7 June 2011)*. Padova, 2011, p. 973–982.

Motschmann A., Huggel C., Carey M. et al. Losses and damages connected to glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru // *Clim. Change*, 2020, vol. 162, p. 837–858.

O'Brien J.S., Julien P.Y. laboratory analysis of mudflow properties // *J. Hydraul. Eng.*, 1988, vol. 114, No. 3, p. 877–887.

O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood, mudflow simulation // *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 1993, vol. 119, 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 // *Nat. Hazards*, 2012, vol. 61, No. 3, p. 1293–1316.

Senese A., Maragno D., Fugazza D. et al. Inventory of glaciers and glacial lakes of the Central Karakoram National Park (CKNP – Pakistan) // *J. Maps*, 2018, vol. 14, No. 2, p. 189–198.

Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K. et al. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990 // *Nat. Clim. Chang.*, 2020, vol. 10, p. 939–945.

Vinogradova T.A., Vinogradov A.Yu. The experimental debris flows in the Chemolgan River basin // *Nat. Hazards*, 2017, vol. 88, No. 1, p. 189–198.

Westoby M.J., Glasser N.F., Brasington J. et al. Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes // *Earth Sci. Rev.*, 2014, vol. 134, p. 137–159.

URL: <https://search.asf.alaska.edu/> Cairn ASF Data Search Vertex (last visited: 27.04.2023).

References

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 selevykh potokakh [Etudes about Debris flows]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, 144 p. (in Russian).

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

Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii [Mathematical modeling in hydrology]. Moscow, Academia, 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 Sevkavgioprovdokhoz*. 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. *GoRisk [GeoRisk World]*, 2020, vol. 14, 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).

Kovalev P.V. Modern glaciation of the Baksan River basin. In: *Proceedings of the Caucasian Expedition (under the MGG program)*. Kharkov, Kharkov Univ., 1961, vol. II, p. 1–306 (in Russian).

Kurovskaia V.A., Chernomorets S.S., Vinogradova T.A. et al. Assessment of debris flow parameters for the 2015 debris flow event in Barsemdara River valley (Tajikistan) using video records and modelling results. *GeoRisk [GeoRisk World]*, 2020, vol. 16, No. 3, p. 12–22 (in Russian).

Kunge J., Holly F., Verwey A. Chislennyye metody v zadachakh rechnoy gidravliki [Numerical methods in problems of river hydraulics]. Translated from English by Yu.V. Abramov, E.I. Mass. Moscow, Energoatomizdat, 1985, 255 p. (in Russian).

Mukhabbatov H.M. Water resources of Tajikistan and water use issues in Central Asia. In: *Problemy postsovetskogo prostranstva [Post-Soviet Issues.]*, 2016, No. 3, p. 29–45 (in Russian).

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

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

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

Seinova I.B., Zolotarev E.A. Ledniki i seli Prielbrusya (Evolyutsiya oledeneniya i selevoy aktivnosti). [Glaciers and debris flows in the Elbrus region (Evolution of glaciation and debris flow activity)]. Moscow, Nauchniy Mir, 2001, 204 p. (in Russian).

Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S., Kidyaeva V.M. et al. Bathymetric Survey of Lake Sarez (1st stage): Report. Moscow, Moscow State University, 2020, vol. 1. 200 p. (in Russian).

Iudina (Kurovskaia) V.A. Estimation of glacial debris flow characteristics using a chain of mathematical models. *Geogra-*

- ficheskiy vestnik [Geographical Bulletin], 2022, vol. 4, No. 63, p. 67–79 (in Russian).
- Iudina (Kurovskaya) V.A., Chernomorets S.S., Vinogradova T.S., Krylenko I.N. Modeling of debris flow triggered by snow melting: case study of the Barsemdara River, Tajikistan. *Earth's Cryosphere*, 2022a, vol. XXVI, No. 3, p. 43–53.
- Iudina (Kurovskaya) V.A., Chernomorets S.S., Krylenko I.N. et al. Assessment of possible consequences of outburst floods: case study of the Bodomdara River valley (Tajikistan). *Earth's Cryosphere*, 2020b, vol. XXVI, No. 5, p. 12–24.
- Iudina V.A., Iudin N.E., Vinogradova T.A. Programma dlya rascheta proryvnoy pavodka i selevogo potoka (FLOVI). Svidetel'stvo o gos. registracii programmy dlya EVM No. 2022683748; prioritets ot 24.10.2022; zaregist. v Reestre programm dlya EVM RF 08.12.2022.
- Aggarwal S., Rai S.C., Thakur P.K., Emmer A. Inventory and recently increasing GLOF susceptibility of glacial lakes in Sikkim, Eastern Himalaya. *Geomorphology*, 2017, vol. 295, p. 39–54.
- Bajracharya S.R., Maharjan S.B., Shrestha F. et al. 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. *Int. Centre for Integr. Mountain Develop.* GPO Box. 2020, p. 54.
- Buckel J., Otto J.C., Prasicek G., Keuschnig M. Glacial lakes in Austria – distribution and formation since the Little Ice Age. *Glob. Planet. Change*, 2018, vol. 164, p. 39–51.
- Haritashya U.K., Bishop M.P., Shroder J.F. et al. Space-based assessment of glacier fluctuations in the Wakhan Pamir, Afghanistan. *Clim. Change*, 2009, vol. 94, p. 5–18.
- Komatsu T., Watanabe T. Glacier-Related Hazards and their assessment in the Tajik Pamir: a short review. *Geogr. Studies*, 2013, vol. 88, No. 2, p. 117–131.
- Kumar B., Murugesu Prabhu T.S. Impacts of climate change: Glacial Lake outburst floods (GLOFs). In: *Climate Change in Sikkim Patterns, Impacts and Initiatives*. Information and Public Relations Department, Government of Sikkim, Gangtok, India, 2012, p. 81–102.
- Kurovskaya V.A., Chernomorets S.S., Vinogradova T.A. et al. Scenarios calculations of outburst flood and debris flows. In: *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.*, 2021, vol. 834, 012009.
- Kurovskaya V.A., Chernomorets S.S., Krylenko I.N. et al. Buzulgan rockslide: simulation of debris flows along Gerkhozhan-Su River and scenarios of their impact on Tyrnauz Town after changes in 2020. *Water Res.*, 2022, vol. 49, No. 1, p. 58–68.
- Luo W., Zhang G., Chen W., Xu F. Response of glacial lakes to glacier and climate changes in the western Nyainqentanglha range. *Sci. Total Environ.*, 2020, vol. 735, 139607.
- 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, vol. 11, p. 1447–1462.
- Mergili M., Schneider D., Worni R., Schneider J. Glacial Lake outburst floods in the Pamir of Tajikistan: Challenges in prediction and modelling. In: *Proc. of the 5th Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment* (Padova, Italy, 14–17 June 2011). Padova, 2011, p. 973–982.
- Motschmann A., Huggel C., Carey M. et al. Losses and damages connected to glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru. *Clim. Change*, 2020, vol. 162, p. 837–858.
- O'Brien J.S., Julien P.Y. laboratory analysis of mudflow properties. *J. Hydraul. Eng.*, 1988, vol. 114, No. 3, p. 877–887.
- O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood, mudflow simulation. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 1993, vol. 119, 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. *Nat. Hazards*, 2012, vol. 61, No. 3, p. 1293–1316.
- Senese A., Maragno D., Fugazza D. et al. Inventory of glaciers and glacial lakes of the Central Karakoram National Park (CKNP – Pakistan). *J. Maps*, 2018, vol. 14, No. 2, p. 189–198.
- Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K. et al. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nat. Clim. Chang.*, 2020, vol. 10, p. 939–945.
- Vinogradova T.A., Vinogradov A.Yu. The experimental debris flows in the Chemolgan River basin. *Nat. Hazards*, 2017, vol. 88, No. 1, p. 189–198.
- Westoby M.J., Glasser N.F., Brasington J. et al. Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes. *Earth Sci. Rev.*, 2014, vol. 134, p. 137–159.
- URL: [https://search.asf.alaska.edu/ASF Data Search Vertex](https://search.asf.alaska.edu/ASF%20Data%20Search%20Vertex) (last visited: 27.04.2023).

*Поступила в редакцию 2 мая 2023 г.,
после доработки – 1 декабря 2023 г.,
принята к публикации 18 декабря 2023 г.*