

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.4.042

DOI: 10.15372/KZ20220306

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ СНЕГОВОГО ГЕНЕЗИСА
(НА ПРИМЕРЕ РЕКИ БАРСЕМДАРА, ТАДЖИКИСТАН)В.А. Юдина (Куrowsкая)¹, С.С. Черноморец¹, Т.А. Виноградова², И.Н. Крыленко^{1,3}¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; viktoriakurovskaia@gmail.com, devdorak@gmail.ru² ООО НПО "Гидротехпроект",
175400, Валдай, Новгородская обл., ул. Октябрьская, 55А, Россия; vinograd1950@mail.ru³ Институт водных проблем РАН,
119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия; krylenko_i@mail.ru

Одна из крупнейших селевых катастроф недавнего времени произошла в Таджикистане в 2015 г. в долине р. Барсемдара. Целью работы была оценка возможностей применения цепочки моделей для расчета характеристик селя 2015 г. Также данный подход был применен для оценки потенциальных зон затопления в случае последующих селей. Для расчета характеристик селя в очаге применялась транспортно-сдвиговая модель селеобразования, разработанная Ю.Б. Виноградовым. На ее основе получены гидрографы селевых волн, использовавшиеся в качестве входных данных для зонирования долины по глубинам и скоростям течения в модели FLO-2D. Так, для I сценария в качестве входного гидрографа использовались значения расхода передового вала (максимальный 1630 м³/с), для II сценария – расходы селя на выходе из очага (максимальный 650 м³/с). В качестве данных о рельефе применялась цифровая модель рельефа ALOS PALSAR (12.5 м). В связи с тем, что реологические данные для бассейна отсутствуют, моделирование проводилось по нескольким вариантам параметров. Смоделированные расходы селя в наиболее реалистичном варианте по I сценарию составили от 1494 до 2860 м³/с для отдельных волн. Дополнительно был проведен расчет с использованием цифровой модели рельефа, полученной авторами с беспилотного летательного аппарата во время обследования долины в 2019 г. Результаты показали, что рассматриваемый подход дает возможность оценивать границы как фактических, так и потенциальных зон затопления.

Ключевые слова: селевой поток, река Барсемдара, транспортно-сдвиговая модель селеобразования, модель FLO-2D, Памир.

MODELING OF DEBRIS FLOW TRIGGERED BY SNOW MELTING:
CASE STUDY OF THE BARSEMDARA RIVER, TAJIKISTANV.A. Iudina (Kurovskaia)¹, S.S. Chernomorets¹, T.S. Vinogradova², I.N. Krylenko^{1,3}¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia; viktoriakurovskaia@gmail.com² Research and Production Association Gidrotekhproekt LLC, Oktyabrskaya str. 55A, Valdai, Novgorod region, 175400, Russia³ Water Problems Institute, RAS, Gubkina str. 3, Moscow, 119333, Russia

The last catastrophic debris flow disaster took place in Tajikistan in the Barsemdara River valley in 2015. The aim of this study was to apply chain modeling to consider debris flow characteristics of 2015 year. This approach has also been applied to assess potential flood prone zones for future debris flows. To consider the characteristics of debris flow in the source, the transport-shift model, developed by Yu.B. Vinogradov was applied. Based on this model, debris flow hydrographs were obtained and used as input data for valley zoning based on the FLO-2D model. So, for scenario I, the debris flow discharge of the forward wave was used as the input hydrograph (maximum – 1630 m³/s), the II scenario – the debris flow discharge at the source outlet (maximum 650 m³/s). The digital elevation model ALOS PALSAR (12.5 m) was used as the relief data. Since there are no rheological data, the modeling was carried out using several sets of parameters. The simulated debris flow discharges based on the most realistic option for I scenario varied from 1494 to 2860 m³/s for individual waves. Additionally, the authors carried out modeling using digital elevation model from an unmanned aerial vehicle obtained during the survey in 2019. The results showed that the considered approach makes it possible to estimate the boundaries of both actual and potential flood prone zones.

Key words: debris flow, Barsemdara River, transport-shift debris flow formation model, FLO-2D model, Pamir Mountains.

ВВЕДЕНИЕ

С 1969 по 2015 г. на территории Таджикистана в пределах Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО) было зарегистрировано 8 селевых катастроф. Сведения об отдельных случаях проявлений селевых процессов с 2007 по 2010 г., вызванных главным образом ливневыми осадками, представлены в работе [Мальнева, Кононова, 2012]. В 2002 г. в результате прорыва озера образовался гляциальный селевой поток в долине р. Дашт. Оценка характеристик катастрофического селя с использованием моделей FLO-2D и RAMMS приведена в работе [Mergili et al., 2011]. Последний массовый сход селей наблюдался в июле 2015 г. в долине р. Барсемдара. Принято считать, что крупнейшие селевые потоки имеют гляциальный генезис, роль же снеготаяния как основного фактора часто недооценивается. На территории ГБАО сосредоточено 6650 ледников общей площадью 6785,6 км² [Каталог..., 1978а–в, 1979а,б, 1980; Тукеев, 2002], что составляет 5,4 % всего горного оледенения Евразийского континента [Гляциологический словарь, 1984]. Несмотря на наличие ледника в бассейне р. Барсемдара, именно таяние снега вызвало катастрофический сход селей [Докукин и др., 2019].

В ходе селевой катастрофы 2015 г. сформировался конус выноса, перегородивший р. Гунт, что привело к образованию подпрудного озера, названного Барсемкуль. В результате было затоплено около 70 хозяйств, более 2 км автодороги, соединяющей Таджикистан с Китаем и Киргизией, 5 мостов (из них 3 автомобильных и 2 пешеходных), медицинский пункт, школа, торговые точки, сады и плодородные земли, десятки километров оросительных сетей. Также была разрушена основная высоковольтная линия подачи электроэнергии от ГЭС Памир-1 [Черноморец и др., 2015].

Характеристики селевого потока определялись на основе визуального обследования и анализа спутниковых снимков [Черноморец и др., 2015; Докукин и др., 2019; Keiler et al., 2018]. Ранее авторами статьи были оценены расходы сошедшего селевого потока и значения плотности с использованием транспортно-сдвиговой модели и кадров видеосъемки [Куrowsкая и др., 2020]. Целью настоящей работы является применение цепочки моделей для учета приращения материала в очаге и зонирования долины для селевого потока 2015 г., а также оценка зон затопления на основе данного подхода. В задачи входили подготовка цифровой модели рельефа, усовершенствование транспортно-сдвиговой модели [Виноградов, 1980а,б], подбор необходимых параметров для моделирования в программном комплексе FLO-2D, проведение расчетов и оценка результатов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Река Барсемдара является правым притоком р. Гунт и относится к бассейну р. Пяндж. Длина реки составляет 8,6 км, площадь водосбора 28 км². Средняя и максимальная высота водосбора составляют 3912 и 4919 м соответственно. В период с 16 по 20 июля 2015 г. было зарегистрировано как минимум 14 серий селевых волн. Общее количество волн, по подсчетам М. Кеилера [Keiler et al., 2018], колеблется от 30 до 40. Сели зарождались на высоте около 4100 м в верховьях одного из истоков р. Барсемдара от уступа ледника Чирминтарман (рис. 1).

Площадь образовавшегося селевого вреза на моренном пьедестале составляет 72 тыс. м². Морфометрические характеристики селевого очага были оценены на основе анализа снимков со спутника Канопус-В № 1 от 06.10.2015 и 26.07.2016 г. По этим данным протяженность вреза, расположенного в интервале высот 3800–4150 м, составляет 800 м, средняя ширина 90 м, максимальная 400 м [Черноморец и др., 2015; Докукин и др., 2019], оценочная глубина достигает 50 м (рис. 2).

Причиной селевой катастрофы послужили период длительных положительных температур и вследствие этого интенсивное снеготаяние на леднике и в приледниковой зоне. На рис. 3 приведен график колебаний температуры воздуха для селевого очага, полученный в ходе обработки сеточных данных реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) ERA5 с пространственным разрешением около 30 км и часовым осреднением значений.

Наблюдался рост температур воздуха в течение двух недель до начала катастрофы, максимум был достигнут 16 июля 2015 г. и составил 20 °С. Средняя температура в очаге в июле 2014 г. равнялась 9 °С.

Протяженность пути селевого потока от очага до зоны разгрузки в районе слияния р. Барсемдара с рекой Гунт составила 7250 м при среднем угле наклона 13,5°. По оценкам М. Кеилера [Keiler et al., 2018], общий объем выноса селя составил 4,2 млн м³. Селевая масса заблокировала р. Гунт, в результате чего образовалось подпрудное озеро Барсемкуль площадью 378 тыс. м² и максимальным объемом около 4 млн м³ [Черноморец и др., 2015]. Впоследствии из-за прокладки канала площадь оз. Барсемкуль уменьшилась до 300 тыс. м² [Докукин и др., 2019].

К настоящему времени остается опасность потенциального прорыва оз. Барсемкуль. В 15 км ниже по течению р. Гунт располагается административный центр ГБАО – город Хорог. Ранее проводилась батиметрическая съемка озера [Черноморец и др., 2015]. Также были рассмотрены возможные сценарии прорыва озера как при незначи-

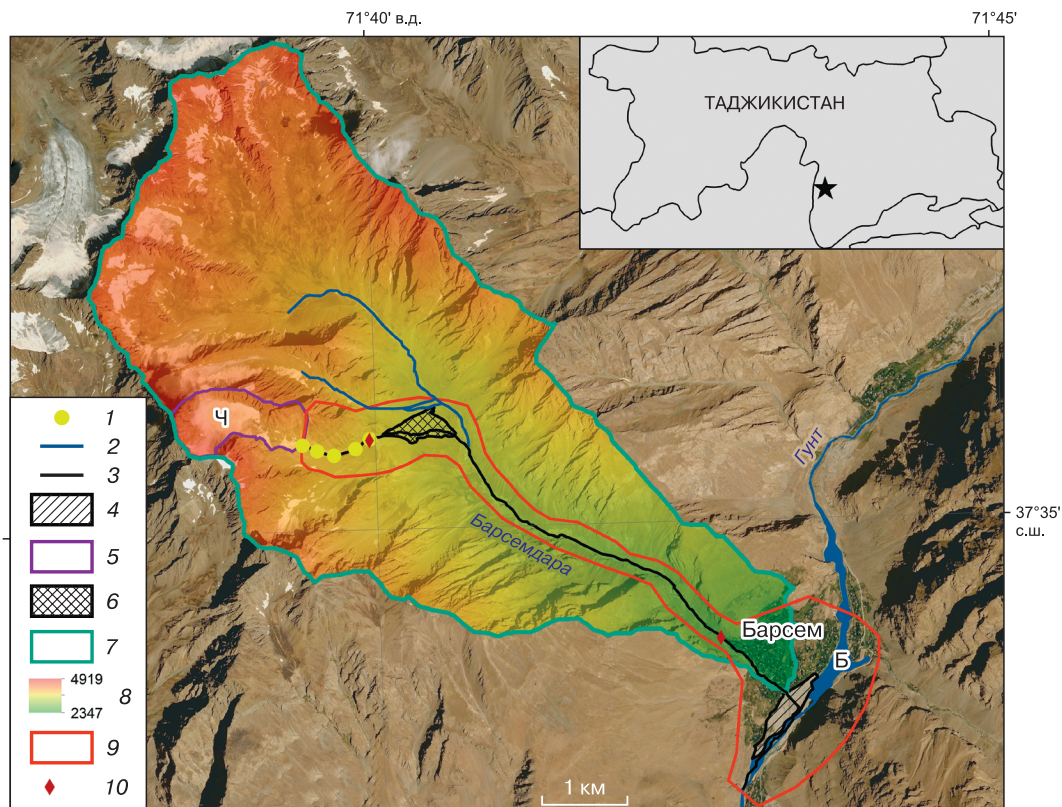


Рис. 1. Схема расположения бассейна р. Барсемдара.

1 — участки в селевом очаге для транспортно-сдвиговой модели; 2 — реки; 3 — зона движения селя 2015 г.; 4 — участок промежуточной аккумуляции селевых потоков 2015 г.; 5 — границы водосбора селевого очага; 6 — конус выноса селевых потоков 2015 г.; 7 — границы водосбора р. Барсемдара; 8 — абсолютная высота, м; 9 — границы моделирования по FLO-2D; 10 — участки моделирования по FLO-2D; Ч — ледник Чирминтарман; Б — озеро Барсемкуль.

тельном понижении отметки прорана, так и при повторном сходе селя из долины р. Барсемдара или же катастрофического потока, сформировав-

шегося в соседней долине р. Шарипдара в результате прорыва каскада ледниковых озер [Кидяева и др., 2018].



Рис. 2. Селевой очаг в долине р. Барсемдара.

Фото С.С. Черноморца, 2019 г.

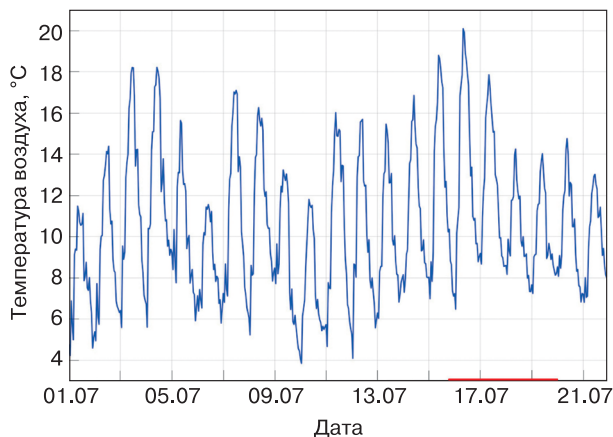


Рис. 3. Температура воздуха с часовым разрешением с 1 по 21 июля 2015 г. для селевого очага, полученная по данным реанализа ERA 5.

Красной линией обозначен период, когда сходили сели.

МЕТОДЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В работе использована цепочка математических моделей для расчета селевых потоков, включающая транспортно-сдвиговую модель селеобразования для расчета характеристик потока в очаге [Виноградов, 1980а,б] и гидродинамическую модель FLO-2D для зонирования долины [O'Brien et al., 1993].

Транспортно-сдвиговая модель селеобразования. Выбор транспортно-сдвиговой модели селеобразования обусловлен возможностью учитывать приращение материала в потоке по мере его формирования. Модель является одномерной и предназначена для расчета селевых потоков высокой плотности. Уравнения модели были разработаны Ю.Б. Виноградовым на основе серий экспериментов по воссозданию селевых потоков в бассейне р. Чемолган [Vinogradova, Vinogradov, 2017]. Ранее было проведено сравнение модельных характеристик с данными наблюдений Чемолганских экспериментов, и результаты были признаны удовлетворительными [Vinogradova, Vinogradov, 2017]. В настоящее время уравнения модели реализованы в компьютерной программе на языке программирования Python. В основе лежат уравнения для расчета расхода твердого материала, расхода селевого потока и плотности. В первую очередь находится значение расхода твердого материала, при этом в селевом очаге выделяются участки с приблизительно одинаковыми уклонами и морфометрическими показателями. Основное расчетное уравнение решается не относительно искомой функции G , а относительно аргумента l [Vinogradova, Vinogradov, 2017]:

$$l = \left[\frac{Q\rho_0}{\zeta\rho_0 + \rho} \ln \frac{Q\rho_0 + (\zeta\rho_0 + \rho)G}{Q\rho_0 + (\zeta\rho_0 + \rho)G_0} - \frac{Q}{\zeta - \theta_{\text{ин}}} \ln \frac{Q + (\zeta - \theta_{\text{ин}})G}{Q + (\zeta - \theta_{\text{ин}})G_0} \right] \times \\ \times \left[A \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\varphi} g \sin \alpha [Q\rho_0(\zeta - \theta_{\text{ин}}) + Q(\zeta\rho_0 + \rho)] \right]^{-1} + l_0, \quad (1)$$

где l – расстояние по тальвегу селевого очага, м; l_0 – расстояние до текущего участка, м; G – расход твердого вещества, м³/с; G_0 – начальное значение переменной G для определенного участка и результат расчета для ему предшествующего (для первого верхнего участка $G_0 = 0$), м³/с; α – угол наклона тальвега селевого очага, град; Q – расходы воды, м³/с; φ – статический угол внутреннего трения грунтов, град; $\theta_{\text{ин}}$ – отношение объема воды к объему твердого вещества, но на пределе текучести (неподвижности) смеси воды и селеформирующих грунтов; ζ – отношение объема воды к объему твердого вещества селеформирующих грунтов, безразмерная величина; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_0 – плотность воды, кг/м³; ρ – плотность селеформирующих грунтов в ПСМ (потенциальный селевой массив), кг/м³; A – коэффициент

пропорциональности, м/(с²·кг) [Виноградов, Виноградова, 2010]. На основе немногочисленных данных, полученных при искусственном воспроизведении селевых потоков в природных условиях, было определено, что коэффициент пропорциональности находится в диапазоне $A = (3-5) \cdot 10^{-6}$ м/(с²·кг), скорее всего, несколько ближе к $5 \cdot 10^{-6}$ [Vinogradova, Vinogradov, 2017]. Расход селевого потока в процессе его движения в селевом очаге (Q_c) может быть получен из следующего выражения:

$$Q_c = Q + (1 + \zeta)G. \quad (2)$$

В данном случае Q – расход воды, поступившей в селевой очаг, м³/с. Для оценки максимального расхода передового вала осуществлялось умножение расхода в замыкающем створе очага на коэффициент, в первом приближении близкий к 2.5 [Виноградов, Виноградова, 2010].

Плотность селевой массы потока (y) в процессе его движения в селевом очаге рассчитывается по уравнению [Виноградов, Виноградова, 2010]:

$$y = \frac{Q\rho_0 + (\zeta\rho_0 + \rho)G}{Q + (1 + \zeta)G}. \quad (3)$$

Результатами моделирования являются приращение селевой массы по длине очага, изменение плотности и селевого расхода для каждого участка отдельно. В связи с тем, что входными данными для гидродинамических моделей являются именно гидрографы, а не единичное значение расхода, авторы усовершенствовали транспортно-сдвиговую модель, включив в нее уравнения по расчету скорости и времени добегания волн.

Большинство формул для расчета скорости селевых потоков включают только такие характеристики, как плотность селевой массы, скорость потока и эмпирические коэффициенты. Эмпирические коэффициенты при этом могут быть выведены или на основе данных наблюдений в конкретном селевом бассейне [Голубцов, 1969; РД 52.30.238-90, 1990], или в лаборатории. При сравнении скорости селей по данным наблюдения Чемолганских экспериментов с расчетными значениями по формулам были выявлены большие различия [Соколова и др., 2018].

В настоящей работе для расчета скорости селея была выбрана формула, предложенная Ю.Б. Виноградовым [Виноградов, Виноградова, 2010]. Данную формулу отличает использование, помимо уклона и глубины потока, также значений угла внутреннего трения породы, плотности потока и различных коэффициентов. Для снижения громоздкости основной формулы Ю.Б. Виноградовым были введены три показателя:

$$M = \mu / (2\gamma\beta^2),$$

$$N = g(\sin \alpha - \text{tg}\varphi^* \cdot \cos \alpha) / \beta^2,$$

$$S = gh \sin \alpha / \beta^2,$$

где μ – коэффициент динамической вязкости потока, Па·с; γ – плотность селевой массы, кг/м³; β – коэффициент сопротивления перемешиванию, безразмерный; α – угол наклона тальвега селевого очага, град; ϕ^* – динамический угол внутреннего трения селеформирующих грунтов, град; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – глубина потока, м. Итоговое уравнение расчета максимальной скорости селя (V_m) записывается следующим образом [Виноградов, Виноградова, 2010]:

$$V_m = \left(\frac{1}{1.5Nh} \right) \left[\left(\frac{M^2}{h^2} + S + Nh \right)^{1.5} - \left(\frac{M^2}{h^2} + S \right)^{1.5} \right] - \frac{M}{h}. \quad (4)$$

При этом внутреннее трение селевой массы выражается через μ , β и ϕ^* . Коэффициент вязкости (μ) характеризует трение, возникающее при скольжении отдельных слоев и различных элементов друг по другу. С увеличением размера включений будет увеличиваться их взаимодействие, т. е. больше энергии будет рассеиваться. Для грязекаменных потоков коэффициент вязкости варьируется от 100 до 1000 Па·с. Коэффициент сопротивления перемешиванию (β) представляет собой среднее относительное расстояние, которое пройдут элементы селевой массы перпендикулярно продольной оси селевого потока, прежде чем вовлечется в общее продольное движение. Значения данного коэффициента меняются от 0.1 до 0.5 [Виноградов, Виноградова, 2010].

При расчете скорости селя изначально глубина потока на всех участках принималась равной 1 м. Зная расход селевого потока и скорость, можно получить примерную площадь поперечного сечения. Ширина потока оценивалась с помощью различных космоснимков разрешением от 15 до 30 м. Таким образом, происходил перерасчет глубины, получившиеся значения подставляли в расчет формулы скорости. Для оценки времени прохождения волны расстояние между границами участков было поделено на скорость.

Данные о рельефе территории были получены на основе цифровой модели рельефа ALOS PALSAR, датируемой 8 августа 2007 г. (разрешение 12.5 м) [https://search.asf.alaska.edu/#/]. Всего в селевом врезе было выделено четыре участка с приблизительно одинаковыми морфометрическими показателями (см. рис. 1).

Входной гидрограф для расчетов был построен для первых трех селевых волн на основе сведений, полученных у местных жителей. Первая селевая волна была зарегистрирована 16 июля приблизительно в 14:30. Наиболее мощной, по словам очевидцев, была третья волна селя, прошедшая в тот же день менее чем через час после первой и

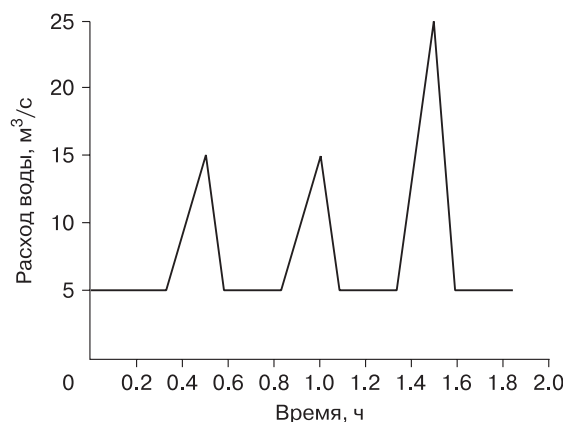


Рис. 4. Входной гидрограф для моделирования селевых потоков.

второй волн. По данным маршрутного обследования в августе 2019 г. совместно специалистами географического факультета МГУ и Агентства Ага Хана по Хабитат (АКАН), расход, поступивший в селевой врез во время третьей волны, был оценен в 25 м³/с. При этом базовый расход воды в верховьях был принят за 5 м³/с. В последующие дни по долине наблюдались паводки и небольшие селевые потоки, формировавшиеся за счет естественного таяния снега и не имевшие разрушительной силы [Черноморец и др., 2015]. На рис. 4 представлен входной гидрограф, при этом нуль соответствует времени 14:30 (16.07.2015 г.).

Плотность селеформирующих грунтов $\rho = 2600$ кг/м³, плотность воды $\rho_0 = 1000$ кг/м³. Средний угол наклона русла α составил 13.5°. Углы внутреннего трения породы – статический ϕ и динамический ϕ^* – оценивались на основе [СП 425.1325800, 2019], материалов изысканий Севкавгипроводхоза [Никитин, 2009] и работ Ю.Б. Виноградова [Виноградов, Виноградова, 2010] и составили 40° и 22° соответственно. Ранее в работе [Куровская и др., 2020] были проведены расчеты данного селевого потока для трех вариантов начального увлажнения селеформирующих грунтов: абсолютно сухих, увлажненных до предела текучести и затопленных водой. Также было проведено сравнение модельных характеристик со значениями скорости и расхода селя на замыкающем створе, оцененными по кадрам видеосъемки. Выявлено, что наиболее приближенные результаты были получены для варианта увлажнения грунтов до предела текучести. В связи с этим в настоящей работе расчет проводился только для этого варианта.

Гидродинамическая модель FLO-2D. Для оценки планового распределения скоростей и глубин потока в долине использовалась гидродинамическая двумерная модель FLO-2D [O'Brien et al., 1993], широко применяющаяся в научных ис-

следованиях, связанных с оценкой динамики движения водных и селевых потоков [Михайлов, Черноморец, 2011; Cesca, d'Agostino, 2008; Petrakov et al., 2012; Wu et al., 2013]. В основу модели положено решение уравнений Сен-Венана, в котором характеристики потока по глубине осредняются (так называемые уравнения “мелкой воды”) [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]. Модель ориентирована на следующую исходную информацию: топографические карты, данные промеров и топографической съемки участков долин, синтезированные в цифровые модели рельефа (ЦМР), “фоновые” расходы и уровни воды в основных руслах и притоках, входной гидрограф и его форма. На выходе модель выдает в виде плановой картины глубины, скорости, уровни водной или селевой поверхности, а также другие параметры потока.

В качестве входной гидрологической информации использовались гидрографы, полученные по транспортно-сдвиговой модели. Так, для I сценария в качестве входного гидрографа использовались значения расхода передового вала, для II сценария – расходы селя на выходе из очага. Базовый расход р. Гунт был задан $100 \text{ м}^3/\text{с}$, что равняется среднему расходу за период наблюдений и расходу 50%-й обеспеченности.

В качестве базовых данных о рельефе территории использовалась цифровая модель рельефа PALSAR (с разрешением 12.5 м), датируемая 8 августа 2007 г. [<https://search.asf.alaska.edu/#/>]. После корректировки все данные о рельефе для моделирования были проинтерполированы на расчетную сетку модели с шагом $12.5 \times 12.5 \text{ м}$. Также проведены дополнительные расчеты с использованием данных беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на участке конуса выноса, полученных авторами в ходе маршрутного обследования долины в августе 2019 г. Данные беспилотной съемки интерполировались на расчетную сетку с шагом

$5 \times 5 \text{ м}$. Кроме того, использовались данные батиметрической съемки оз. Барсемкуль от 2017 г.

Входными параметрами для модели FLO-2D также являются объемная концентрация наносов, напряжение пластического трения и вязкости потока. Концентрация наносов принята равной 45 %, что соответствует несвязному селевому потоку с интенсивным перемешиванием [O'Brien et al., 1993]. В случае, если нет возможности провести подробный реологический анализ селевых отложений, для расчета напряжения пластического трения и вязкости потока в модели применяются следующие эмпирические формулы:

$$\eta = \alpha_1 \exp(\beta_1 C_v); \quad (5)$$

$$\tau_y = \alpha_2 \exp(\beta_2 C_v), \quad (6)$$

где τ_y – напряжение пластического трения; η – вязкость потока; C_v – объемная концентрация наносов; $\alpha_{1,2}$, $\beta_{1,2}$ – эмпирические коэффициенты, определенные в лабораторных условиях [O'Brien, Julien, 1988]. Как следует из формул (5), (6), η и τ_y являются функциями объемной концентрации наносов, которая учитывает лишь объем илов, глин и в некоторых случаях песков. Однако в формулы (5), (6) не включен крупный обломочный материал. Вязкость жидкости тоже является функцией объемной концентрации. Авторами модели проводилась оценка параметров данных уравнений с использованием образцов селевой массы, отобранных в Скалистых горах, штат Колорадо, возле городов Аспен и Гленвуд-Спрингс. Значения эмпирических коэффициентов α_i и β_i были получены с помощью регрессионного анализа для каждого образца и представлены в табл. 1 [O'Brien, Julien, 1988].

В общем случае для моделирования движения более вязкого потока рекомендуется использовать параметры e , параметры a рекомендованы для менее вязких потоков, в том числе для наносовых паводков [O'Brien, Julien, 1988]. В связи с тем, что натурные данные для исследуемого бассейна отсутствуют, моделирование проводилось по нескольким наборам параметров, представленным в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С использованием уравнений (1), (2) были получены величины расходов потока для каждого из четырех участков в селевом очаге. Для построения гидрографов селя необходимо определить значения скорости потока. В табл. 2 представлены результаты расчета скорости по формуле (4) для каждого участка, а также передового вала.

Расчет выполнялся отдельно для первых двух волн и для третьей волны. Это связано с тем, что значение расхода воды, поступающего в селевой врез для первых двух волн, было принято одинаковым и равным $15 \text{ м}^3/\text{с}$. Значения плотности по-

Таблица 1. Параметры для расчета напряжения пластического течения и вязкости как функции от концентрации наносов [O'Brien, Julien, 1988]

Вариант параметров	Образец селевых отложений	Параметры для расчета напряжения пластического трения		Параметры для расчета вязкости потока	
		α_2	β_2	α_1	β_1
a	Аспен Натурал Соил	0.1520	18.7	0.001 36	28.4
b	Гленвуд 1	0.0345	20.1	0.002 83	23.0
c	Гленвуд 2	0.0765	16.9	0.064 80	6.2
d	Гленвуд 3	0.000 707	29.8	0.006 32	19.9
e	Гленвуд 4	0.001 72	29.5	0.000 602	33.1

Таблица 2. Скорости движения селевого потока

Номер участка	Уклон, град	Глубина потока для 1-й и 2-й волн, м	Скорость 1-й и 2-й волн, м/с	Глубина потока для 3-й волны, м	Скорость 3-й волны, м/с
1	28.2	2.2	14.6	2.0	15.0
2	26.6	2.0	13.9	2.1	14.3
3	24.6	2.1	13.1	2.3	13.1
4	20.4	2.8	11.2	2.3	11.2
5 (передовой вал)	20.4	4.0	8.3	6.2	7.2
По всему очагу	25.2	2.7	12.4	3.0	11.9

тока, полученные по уравнению (3), использовались для расчета скорости. Из данных табл. 2 следует, что скорости потока различаются на участках. Средняя скорость для первых двух волн без учета передового вала составила 13.4 м/с, для третьей волны 13.2 м/с.

На рис. 5 представлены гидрографы селевых волн для четырех участков в селевом очаге, а также максимальные значения расхода передового вала. Видно, что происходит постепенное увеличение расхода от участка к участку.

Во время прохождения 1-й и 2-й волн значение расходов селя увеличилось с 145 до 391 м³/с на всем протяжении очага, расход передового вала по приблизительным оценкам составил 978 м³/с. Для 3-й волны расход селя возрастал с 255 до 652 м³/с от 1-го по 4-й участок, расход передового вала был оценен в 1630 м³/с. Минимальное время прохождения расхода селя наблюдалось на 1-м и 4-м участках и составило 13 с, максимальное на 3-м участке равно 22 с. Время добегания передового вала на 4-м участке варьировалось от 18 до 20 с.

Далее проводилось зонирование долины с помощью модели FLO-2D. Как было сказано ранее, расчет осуществлялся по двум сценариям. При расчете гидрографа передового вала (I сценарий) расход потока значительно изменялся в зависимости от заданных значений параметров для расчета

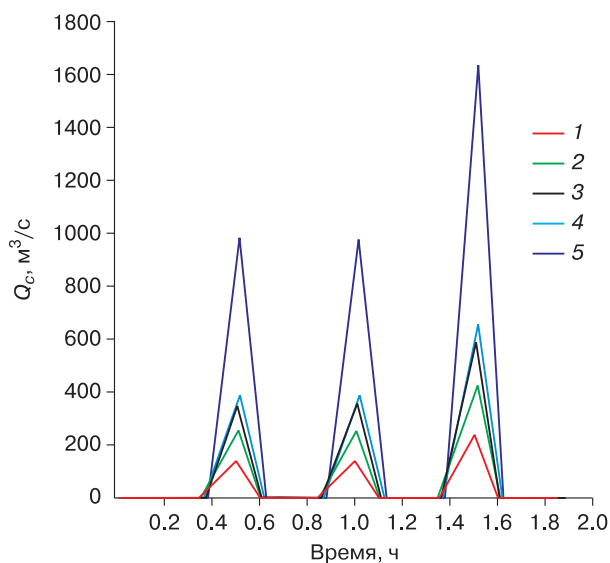


Рис. 5. Гидрографы селевых волн в очаге по четырем участкам (линии 1–4) и для передового вала (линия 5), полученные по транспортно-сдвиговой модели.

напряжения пластического трения и вязкости потока (табл. 3).

Наиболее реалистичные результаты, близкие к предшествующей оценке по натурным данным, были получены по варианту Ib. Расчеты по остальным вариантам параметров селевых грунтов приведены для сопоставления, чтобы показать, как применение различных параметров селевых потоков в модели FLO-2D влияет на результаты. Так, значения расходов по варианту Ib составили для отдельных волн от 1494 до 2860 м³/с. В то время как расход, оцененный по материалам видеосъемки, равнялся 1536 м³/с, скорость составила 16.6 м/с [Куrowsкая и др., 2020]. Следует учитывать, что использовались кадры по одной из 40 селевых волн, предположительно третьей, наиболее разрушительной, и полученные данные также носят оценочный характер.

Таблица 3. Результаты гидродинамического моделирования по I и II сценариям

Вариант расчета	Макс. расход, м ³ /с (1-я волна)	Время прохождения, мин	Макс. расход, м ³ /с (2-я волна)	Время прохождения, мин	Макс. расход, м ³ /с (3-я волна)	Время прохождения, мин
Ia	855	15.6	1477	5.4	2513	12.0
Ib	1494	12.6	1639	12.0	2860	9.6
Ic	1433	9.0	1378	7.8	3297	3.0
Id	977	11.4	1744	12.0	2993	9.0
Ie	430	21.0	1134	4.8	1939	3.0
IIa	164	18.2	674	9.1	1322	6.7
IIb	295	21.1	554	9.1	648	15.1
IIc	777	9.7	1153	11.5	1045	8.5
IId	412	18.7	404	13.9	683	15.1
IIe	30	21.1	394	10.9	580	8.5

Наибольшее значение расхода передового вала на вершине конуса выноса было получено по варианту Ic и составило $3297 \text{ м}^3/\text{с}$ для 3-й волны. Расходы селя для 1-й и 2-й волн получились несколько ниже, чем они были оценены по видеоматериалам. Минимальные значения расходов на вершине конуса выноса были получены для варианта Ie (наиболее вязкий поток). Расход для 1-й волны составил $430 \text{ м}^3/\text{с}$, для 2-й волны $1134 \text{ м}^3/\text{с}$. Расход селя для 3-й волны оказался выше оцененного по видеосъемке на $403 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом параметры варианта e рекомендуется использовать для селей, ведущих себя как жидкий цемент, что не было характерно для наблюдавшегося селя. Немного большие значения расходов были получены по параметрам варианта Ia, которые характерны для селевого потока низкой плотности. Расход во время 1-й волны составил $855 \text{ м}^3/\text{с}$. Расход селя для 2-й волны оказался на $60 \text{ м}^3/\text{с}$ меньше оцененного по видеосъемке. Расход селя для 3-й волны превысил данное значение в 1.6 раза. Расход по варианту Id для 1-й волны составил $977 \text{ м}^3/\text{с}$. Для 2-й и 3-й волн расход больше оцененного по видеосъемке в 1.1–1.9 раза.

Далее проводился расчет по II сценарию (расход селя, полученный на выходе из очага) с использованием того же набора параметров.

Так, наибольшее значение для 3-й волны на вершине конуса выноса было получено для варианта Pa и составило $1321 \text{ м}^3/\text{с}$. Для 1-й и 2-й волн расходы равнялись 164 и $674 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. Большие расходы по 1-й и 2-й волнам были рассчитаны для варианта Pc – от 777 до $1153 \text{ м}^3/\text{с}$. Минимальное значение расхода селя было получено с использованием параметров варианта Pe и составило $30 \text{ м}^3/\text{с}$ для 1-й волны. Для 2-й и 3-й волн расход селя менялся от 394 и $560 \text{ м}^3/\text{с}$. Варианты Pb и Pd в целом схожи, расходы потока менялись от 295 до $683 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для расчета характеристик селя непосредственно на конусе выноса авторы использовали вариант параметров b как наиболее реалистичный. Полученный в данном случае расход является наиболее приближенным к оцененному ранее по кадрам видеосъемки [Куrowsкая и др., 2020]. Для того чтобы оценить максимально возможные значения на конусе, был проведен расчет по набору параметров c.

На участке конуса выноса по I сценарию расходы, полученные по варианту Ib, варьировались для селевых волн от 556 до $2181 \text{ м}^3/\text{с}$. Участок конуса выноса поток проходит за время 1.8–4.8 мин. Скорость потока в русле р. Барсемдара составляет более 5 м/с, на прилегающей территории до 3.2 м/с (рис. 6, б). При этом в зоне затопления находится значительное число зданий на левом берегу р. Барсемдара. Плановое распределение глубин представлено на рис. 6, а.

По II сценарию расходы менялись от 101 до $543 \text{ м}^3/\text{с}$ на участке конуса. При этом наблюдалось распыливание первой волны. Время прохождения потоком участка конуса выноса составило от 6 до 7.8 мин. Глубина потока на конусе выноса в среднем составила 4.8 м, иногда доходила до 9.5 м. Скорость селя в руслах рек Барсемдара и Гунт более 5 м/с, на участке конуса выноса также достигала 5 м/с.

При моделировании прохождения передового вала расходы селя по варианту с на конусе выноса оказались значительно выше и составили от 1580 до $3351 \text{ м}^3/\text{с}$ для третьей волны. Время добегания будет меняться от 0.6 до 1.2 мин. Максимальные скорости селя в русле р. Барсемдара составили 19.4 м/с, на прилегающей территории 10.8 м/с. Глубина потока на конусе выноса варьировалась от 5 до 1 м, в русле р. Барсемдара – до 15 м.

Для варианта с по II сценарию были получены расходы селевых волн от 534 до $840 \text{ м}^3/\text{с}$. Время добегания волн будет меняться в пределах 0.6–1.8 мин. На участке конуса выноса максимальная скорость в русле р. Барсемдара составила 15.1 м/с, на прилегающей территории достигала 6.7 м/с, в русле р. Гунт до 11.8 м/с (рис. 7).

Сравнение модельных результатов с данными наблюдений показало, что при прохождении селя в 2015 г. в реальности не наблюдалось растекания потока по конусу выноса с уходом влево. Волны проходили исключительно в русле р. Барсемдара, несмотря на пониженный левый берег (рис. 8), при этом поток врезался в поверхность конуса.

Одной из причин несоответствия контуров зоны затопления на участке конуса могло являться то, что в модели FLO-2D эрозионные процессы не учитываются в ходе расчета, а только при задании исходной морфометрии. При этом моделирование проводилось по спутниковому снимку с разрешением 12.5 м, что не позволяет учитывать местные особенности рельефа, однако это единственная цифровая модель, которая отражает рельеф долины перед селом 2015 г.

Для оценки характеристик потенциальных современных селей в долине р. Барсемдара были проведены расчеты на основе цифровой модели 2019 г., полученной по данным БПЛА на участке конуса выноса, с использованием гидрографов по I сценарию в модели FLO-2D с набором параметров b, как наиболее реалистичным, и набором c для оценки максимальных значений. Эти расчеты отражают зоны потенциального затопления в случае повторения катастрофического события 2015 г. при современном состоянии рельефа селевого конуса.

При моделировании на основе группы параметров b поток практически полностью концентрируется в русле р. Барсемдара выше конуса, при этом конус выноса оказывается затопленным

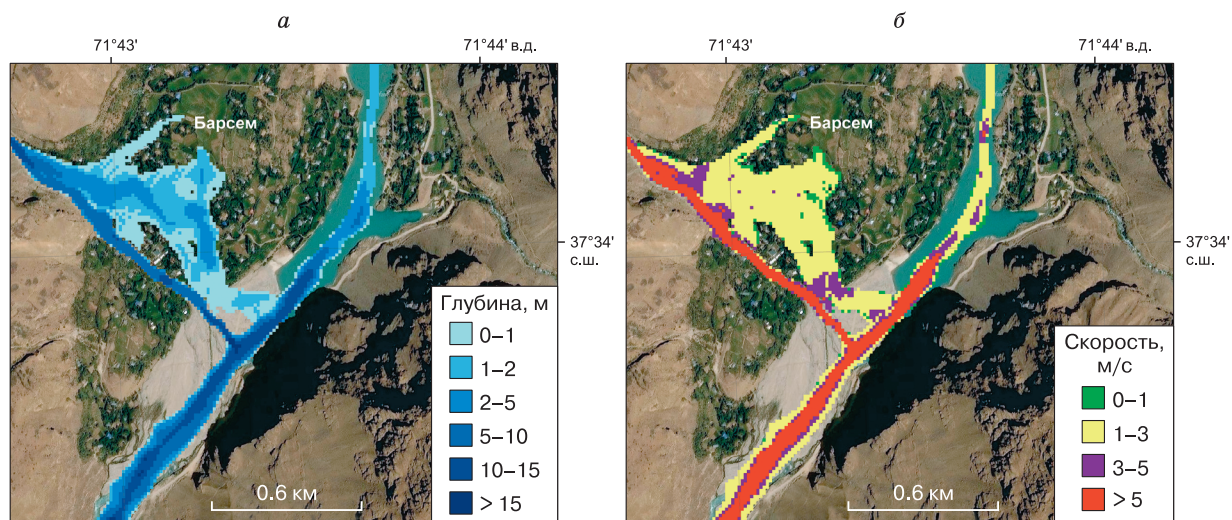


Рис. 6. Плановое распределение параметров потока для села 2015 г. по сценарию I для варианта б на основе программного комплекса FLO-2D.

а – глубина потока; б – скорость потока.

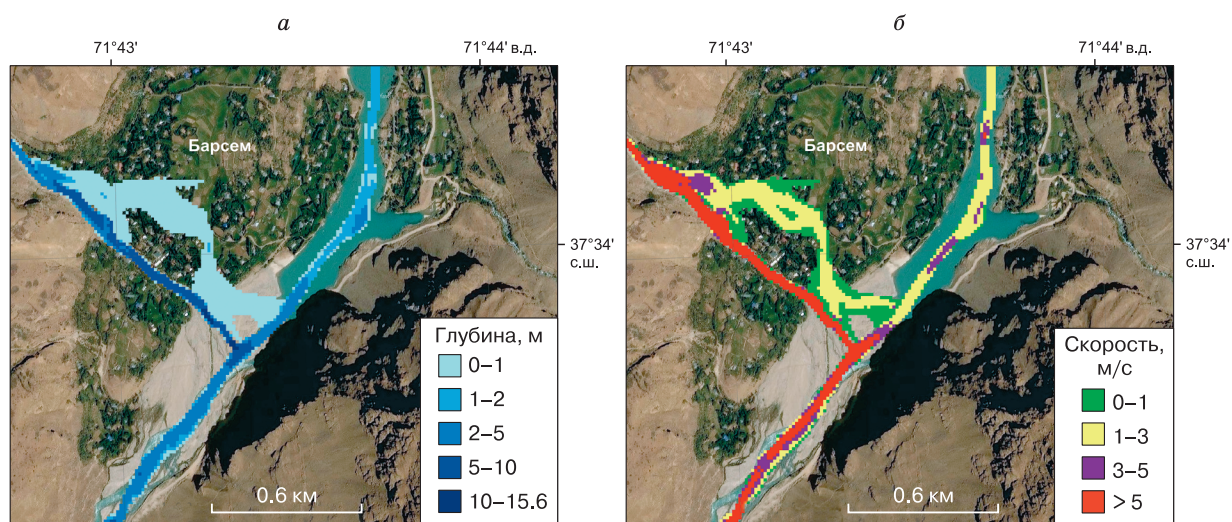


Рис. 7. Плановое распределение параметров потока для села 2015 г. по сценарию II для варианта с на основе программного комплекса FLO-2D.

а – глубина потока; б – скорость потока.



Рис. 8. Русло реки Барсемдара.
Фото С.С. Черноморца, 2019 г.

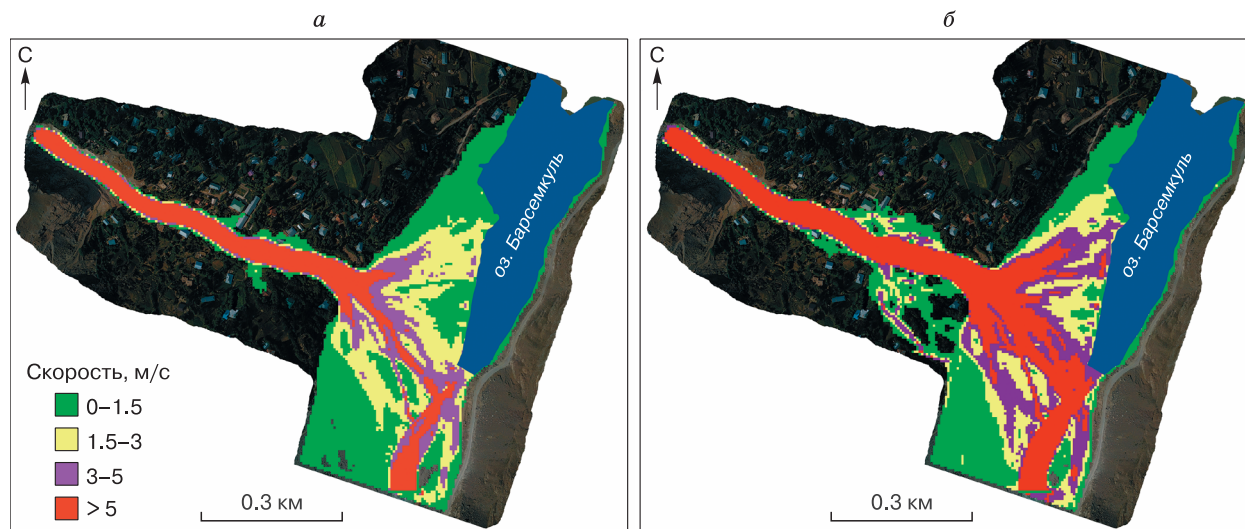


Рис. 9. Плановое распределение скоростей первой волны по результатам моделирования I сценария на основе программного комплекса FLO-2D и данных БПЛА.

а – по сценарию Ib; *б* – по сценарию Ic.

(рис. 9). Во время селевого потока 2015 г. конус выноса не был затоплен. Согласно данным рельефа по съемке с БПЛА 2019 г., на конусе выноса наблюдается резкий перепад высот с 2541 до 2519 м, что может привести к затоплению в будущем при прохождении такого же по мощности селя.

Результаты по варианту с свидетельствуют о том, что в случае прохождения селя схожей мощности в зоне затопления окажутся не только конус выноса, но и дома около русла р. Барсемдара выше конуса. Глубина потока для двух наборов параметров будет варьироваться от 8 м на конусе выноса до 15 м в русле р. Барсемдара.

До 2015 г. в долине р. Барсемдара топография русла практически не менялась. После катастрофы топография снова стабилизировалась, на данный момент изменений нет. В случае использования ЦМР с высоким разрешением стоит учитывать, что селевые конусы являются нестабильными формами рельефа, детальная топография их меняется после прохождения каждого паводка. Мощный водный или селевой поток может образовать новое русло на территории кишлака за пределами нынешнего русла. В модели FLO-2D не учитываются эрозионные процессы, поэтому в случае прохождения катастрофического паводка картина зоны затопления может значительно поменяться. При этом изначально такая территория может не выделяться как потенциально опасная при моделировании с использованием имеющейся ЦМР по данным БПЛА. В связи с этим ЦМР с высоким разрешением быстро устаревают. При детальном моделировании с использованием ЦМР, отображающей текущие топогра-

фические условия, будут получены более точные результаты на данный момент времени, поэтому расчеты зон затопления лучше выполнять регулярно. Тогда как общедоступная ЦМР с разрешением 12.5 м больше подходит для получения быстрой обобщенной оценки потенциально опасных территорий, а также для расчета селевых потоков, прошедших в прошлом.

ВЫВОДЫ

В работе оценена возможность применения цепочки математических моделей для расчета селевого потока 2015 г. в долине р. Барсемдара, включающей модели для расчета характеристик селя в зоне зарождения и при движении по долине. Для расчетов характеристик селя в зоне зарождения использовалась транспортно-сдвиговая модель селеобразования. Отличительной чертой данной модели является возможность оценки приращения твердого материала при формировании селевого потока и относительная простота исходной информации, что особенно важно в условиях недостаточности данных.

В работе также проводилась модернизация модели: был добавлен расчет скорости потока по формуле, предложенной Ю.Б. Виноградовым, и расчет времени прохождения волны. Внесенные изменения позволили получить физически обоснованные гидрографы расходов для первых и самых разрушительных трех волн селя. Далее проводилось зонирование долины с помощью гидродинамической модели FLO-2D. В качестве входных гидрографов использовались расходы передового вала (I сценарий) и значения расходов на

выходе из очага (II сценарий), полученные ранее по транспортно-сдвиговой модели. В связи с невозможностью проведения лабораторных экспериментов для уточнения параметров в формулах для расчета напряжения пластического трения и вязкости потока, нами были проведены экспериментальные расчеты с пятью вариантами наборов параметров. Так, значения расходов по набору параметров b (см. табл. 3) на вершине конуса выноса по I сценарию равнялись от 1494 до 2860 м³/с для 1-й и 3-й волн. Наибольшее значение расхода передового вала было получено по параметрам c и составило 3297 м³/с для 3-й волны. Расходы для 1-й и 2-й волн были несколько ниже и равнялись 1433 и 1378 м³/с. На участке конуса выноса значения расходов по I сценарию по варианту b составили от 556 до 2181 м³/с. Несмотря на то что расходы, полученные по варианту b , завышают значение расхода, полученное ранее по видеоматериалам, авторы считают, что данный набор параметров b более вероятен для конкретного селевого потока.

В связи с тем, что расчеты на конусе выноса проводились с использованием спутниковых данных разрешением 12,5 м, зона затопления оказалась намного больше, чем наблюдавшаяся в 2015 г., так как космический снимок такого разрешения не учитывает местные особенности рельефа. Поэтому было проведено дополнительное моделирование с использованием снимков с БПЛА, полученных авторами в 2019 г. Результаты расчетов иллюстрируют зону затопления при прохождении схожего по мощности селевого потока по современному рельефу. Так, для набора параметров b селевой поток полностью концентрируется в русле до вершины конуса выноса с последующим растеканием. При расчете по варианту c в зоне затопления окажется не только конус выноса, но и дома, непосредственно прилегающие к руслу р. Барсемдара. В целом полученные результаты показали, что рассматриваемая цепочка математических моделей может быть использована для оценки зон затопления.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам АКАН Ф.О. Мародасейнову, А. Акдодову и сотрудникам МГУ И.В. Крыленко, К.С. Висхаджиевой за помощь в сборе полевых данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-35-90006) и филиала Агентства Ага Хана по Хабитат (АКАН) в Республике Таджикистан, а также по теме 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).

Литература

- Виноградов Ю.Б.** Транспортный и транспортно-сдвиговый селевые процессы // Селевые потоки. Алматы, КазНИГМИ, 1980а, вып. 4, с. 3–18.
- Виноградов Ю.Б.** Этюды о селевых потоках. Л., Гидрометеиздат, 1980б, 160 с.
- Виноградов Ю.Б.** Математическое моделирование в гидрологии / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. М., Академия, 2010, 304 с.
- Гляциологический словарь** / Под ред. В.М. Котлякова. Л., Гидрометеиздат, 1984, 528 с.
- Голубцов В.В.** О гидравлическом сопротивлении и формуле для расчета средней скорости течения горных рек // Тр. КазНИГМИ, 1969, вып. 33, с. 30–41.
- Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. и др.** Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе // Геориск, 2019, т. XIII, № 1, с. 26–36.
- Каталог ледников СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Амударья. Ч. 9. Бассейн р. Обихингоу** / Г.М. Варнакова, О.В. Роттаева. Л., ГИМИЗ, 1978а, 110 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Амударья. Ч. 10. Бассейны правых притоков р. Пянджа от устья Вахша до устья Ванча** / З. Мусоев. Ч. 19. Бассейн р. Восточный Кызылсу / Л.И. Атлас. Л., ГИМИЗ, 1980, 56 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Амударья. Ч. 11. Бассейн р. Ванча; Ч. 12. Бассейн р. Язгулема** / Г.Б. Осипова. Л., ГИМИЗ, 1978б, 84 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Амударья. Ч. 13. Бассейн р. Бартанга** / А.С. Шетинников, Л.Д. Подкопаева. Л., ГИМИЗ, 1978в, 107 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Амударья. Ч. 14. Бассейн р. Мургаба** / А.С. Шетинников. Л., ГИМИЗ, 1979а, 91 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 3. Амударья. Ч. 15. Бассейн р. Гунта** / Г.М. Варнакова, О.В. Роттаева. Л., ГИМИЗ, 1979б, 126 с.
- Кидяева В.М., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. и др.** Моделирование прорывов горных озер и селевых потоков в Горно-Бадахшанской автономной области, Таджикистан // Междунар. науч. конф. Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии (Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г.): сб. докл. СПб., С.-Петерб. гос. ун-т, 2018, с. 897–902.
- Куровская 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. XIV, № 3, с. 12–22.
- Кюнж Ж.** Численные методы в задачах речной гидравлики / Ж. Кюнж, Ф. Холли, Ф. Вервей. М., Энергоатомиздат, 1985, 255 с.
- Мальнева И.В., Кононова Н.К.** Активность селей на территории России и ближнего зарубежья в XXI веке // Геориск, 2012, т. IV, № 4, с. 48–54.
- 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, 2009, вып. 18, с. 30–33.
- РД 52.30.238-90.** Руководство селестокосным станциям и гидрографическим партиям. Организация и проведение работ по изучению селей. Вып. 1. М., Гидрометеиздат, 1990, 199 с.

Соколова Д.П., Виноградова Т.А., Осташов А.А. Сравнение различных методов расчета скорости селевого потока // Геориск, 2018, т. VIII, № 4, с. 76–86.

СП 425.1325800. Свод правил. Инженерная защита территории от эрозионных процессов. М., Стандартинформ, 2019, 36 с.

Тукеев О.В. Селевые явления Памира: катастрофы, закономерности, прогноз. М., ВНИИ ГОЧС, 2002, 176 с.

Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Бобов Р. и др. Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) // Междунар. науч. конф. Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии (Санкт-Петербург, 18–22 нояб. 2015 г.): сб. докл. СПб., С.-Петерб. гос. ун-т, 2015, с. 261–264.

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. Sci., 2008, vol. LX, p. 197–206.

Keiler M., Zimmermann M., Bigler S., Fuchs S. Assessing a large-scale debris flow in Barsem, Tajikistan: exceptional size, duration and process chain // Proc. of the European Geosciences Union General Assembly Conf. (Vienna, April 8–13, 2018). Vienna, Austria, 2018, p. 5405.

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 Intern. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings (Padua, June 14–17, 2011). Padua, Italy, 2011, p. 973–982.

O'Brien J.S., Julien P.Y. Laboratory analysis of mudflow properties // J. Hydraulic Eng., 1988, vol. CXIV, No. 8, p. 877–887.

O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // J. Hydraulic Eng., 1993, vol. CXIX, No. 2, p. 244–261.

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.

Vinogradova T.A., Vinogradov A.Y. The experimental debris flows in the Chemolgan river basin // Natural Hazards, 2017, vol. LXXXVIII, p. 189–198.

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://search.asf.alaska.edu/#/> (дата обращения: 28.10.2020).

References

Vinogradov Yu.B. Transport and transport-shift mudflow processes. In: Selevue potoki [Collection of articles Debris Flows]. Almaty, KazNIGMI, 1980a, iss. 4, p. 3–18 (in Russian).
 Vinogradov Yu.B. Etudy o selevyh potokah [Etudes about Mudflows]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980b, 160 p. (in Russian).
 Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii [Mathematical Modeling in Hydrology]. Moscow, Academy, 2010, 304 p. (in Russian).
 Glaciological Dictionary. V.M. Kotliakov (Ed.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 528 p. (in Russian).
 Golubtsov V.V. On hydraulic resistance and the formula for calculating the average flow rate of mountain rivers. In: Proc. of KazNIGMI, 1969, iss. 33, p. 30–41 (in Russian).

Dokukin M.D., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A. et al. Barsem mudflow disaster in the Pamirs in 2015 and its analogues in the Central Caucasus. Georisk [Georisk], 2019, vol. XIII, No. 1, p. 26–36 (in Russian).

Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 14. Middle Asia. Issue 3. Amu Darya. Ch. 9. River basin Obihingou. G.M. Varnakova, O.V. Rototaeva (Eds.). Leningrad, GIMIZ, 1978a, 110 p. (in Russian).

Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 14. Central Asia. Issue 3. Amu Darya. Ch. 10. Basins of the right tributaries of the river Panj from the mouth of the Vakhsh to the mouth of the Vanj. Z. Musoev (Ed.). Ch. 19. River basin. Eastern Kyzylsu. L.I. Atlas (Ed.). Leningrad, GIMIZ, 1980, 56 p. (in Russian).

Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 14. Central Asia. Issue 3. Amu Darya. Ch. 11. The river basin Vanj; Ch. 12. The basin of the river Yazgulem. G.B. Osipova (Ed.). Leningrad, GIMIZ, 1978b, 84 p. (in Russian).

Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 14. Central Asia. Issue 3. Amu Darya. Ch. 13. The basin of the river Bartang. A.S. Shchettinnikov, L.D. Podkopaeva (Eds.). Leningrad, GIMIZ, 1978c, 107 p. (in Russian).

Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 14. Central Asia. Issue 3. Amu Darya. Ch. 14. The basin of the river Marghab. A.S. Shchettinnikov (Ed.). Leningrad, GIMIZ, 1979a, 91 p. (in Russian).

Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 14. Central Asia. Issue 3. Amu Darya. Ch. 15. The basin of the river Gunt. G.M. Varnakova, O.V. Rototaeva (Eds.). Leningrad, GIMIZ, 1979b, 126 p. (in Russian).

Kidyayeva V.M., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A. et al. Modeling of breakthroughs of mountain lakes and mudflows in the Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Tajikistan. In: Proc. of the Third Intern. Conf. on Vinogradov Readings. Facets of Hydrology (St. Petersburg, March 28–30, 2018). St. Petersburg, Saint-Petersburg State University, 2018, p. 897–902 (in Russian).

Kurovskaya V.A., Chernomorets S.S., Vinogradova T.A. et al. Assessment of the quantitative characteristics of the mudflow in 2015 in the valley of the river Barsemdera (Tajikistan) based on video materials and modeling results. Georisk [Georisk], 2020, vol. XIV, No. 3, p. 12–22 (in Russian).

Cunge F., Holly M., Verwey A. Practical aspects of computational river hydraulics. Translated from English. Yu.V. Abramova, E.I. Massa (Eds.). Moscow, Energoatomizdat, 1985, 255 p. (in Russian).

Mal'neva I.V., Kononova N.K. Mudflow activity in Russia and neighboring countries in the XXI century. Georisk [Georisk], 2012, vol. IV, No. 4, p. 48–54 (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 undercoats. In: Collection of Scientific Works of JSC Sevkavgirovodkhoz, 2009, iss. 18, p. 30–33 (in Russian).

RD 52.30.238-90. Rukovodstvo selestokovym stanciiam i gidrograficheskimi partiiam [Management of mudflow stations and hydrographic parties]. Vol. I. Moscow, Gidrometeoizdat, 1990, 199 p. (in Russian).

Sokolova D.P., Vinogradova T.A., Ostashov A.A. Comparison of various methods for calculating the rate of mudflow. Georisk [Georisk], 2018, vol. VIII, No. 4, p. 76–86 (in Russian).

SP 425.1325800. Svod pravil Inzhenernaya zashchita territorii ot erozionnykh processov [Code of Practice Engineering protection of the territory from erosion processes]. Moscow, Standartinform, 2019, 36 p. (in Russian).

- Tukeev O.V. Selevye iavleniia Pamira: katastrofy, zakonomernosti, prognoz [Mudflows in the Pamirs: disasters, patterns, forecast]. Moscow, 2002, 176 p. (in Russian).
- Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Bobov R. et al. Mudflows in the valley of the Barsemdara River in July 2015 and the dammed lake Barsemkul on the Gunt River (Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Tajikistan). In: Proc. of the Second Intern. Conf. on Vinogradov Readings. The Art of Hydrology (St. Petersburg, Nov. 18–22, 2015). St. Petersburg, Saint-Petersburg State University, 2015, p. 261–264 (in Russian).
- 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.
- Keiler M., Zimmermann M., Bigler S., Fuchs S. Assessing a large-scale debris flow in Barsem, Tajikistan: exceptional size, duration and process chain. In: Proc. of the European Geosciences Union General Assembly Conference (Vienna, April 8–13, 2018), Vienna, Austria, 2018, p. 5405.
- 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 Fifth Intern. Conf. on Debris-Flow Haz. Mitigation: Mech., Predic. and Assessment (Padua, June 14–17, 2011). Padua, Italy, 2011, p. 973–982.
- O'Brien J.S., Julien P.Y. Laboratory analysis of mudflow properties. J. Hydraulic Engineering, 1988, vol. CXIV, No. 8, p. 877–887.
- O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. J. Hydraulic Engineering, 1993, vol. CXIX, No. 2, p. 244–261.
- 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.
- Vinogradova T.A., Vinogradov A.Y. The experimental debris flows in the Chemolgan River Basin. Natural Hazards, 2017, vol. LXXXVIII, p. 189–198.
- 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://search.asf.alaska.edu/#/> (last visited: 28.10.2020).

*Поступила в редакцию 15 июля 2021 г.,
после доработки – 28 января 2022 г.,
принята к публикации 3 апреля 2022 г.*