



Оценка характеристик селевого потока 2015 года в долине ручья Барсемдара (Таджикистан)

В.А. Куровская¹, С.С. Черноморец¹, Т.А. Виноградова², К.С. Висхаджиева¹,
О.Н. Мавлоназаров³, Р.А. Бобов⁴

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва,
Россия, viktoriiakurovskaia@gmail.com

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан

⁴Организация Ага Хана по развитию, Душанбе, Таджикистан

Аннотация. В июле 2015 года в долине ручья Барсемдара (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) наблюдался массовый сход селевых потоков. В результате были разрушены и затоплены жилые зоны, социальные объекты и инфраструктура кишлака Барсем и соседних населенных пунктов. Кроме того, селевые отложения заблокировали реку Гунт с последующим образованием подпрудного озера максимальным объемом 4,0 млн. м³. В данной работе приводится количественная оценка характеристик селевого потока с помощью средств математического моделирования и кадров видеосъемки. Использовалась модель транспортно-сдвигового селеобразования, разработанная Ю.Б. Виноградовым для расчета приращения твердого материала, селевого расхода и плотности потока в зоне зарождения, а также трансформация расхода селея в долине. Кроме того, для оценки скорости селевого потока применялись данные видеосъемки. Для этого были выбраны видеозаписи прохождения одной из селевых волн в кишлаке Барсем, снятые очевидцами. Далее проводилась привязка местности к спутниковому снимку. Исходные данные о рельефе были получены с помощью цифровой модели рельефа ALOS, датируемой 8 августа 2007 г. (разрешение 12.5 м). Оценка характеристик селеформирующих грунтов проводилась, в частности, с использованием СП 425.1325800 2018 года и литературных источников. Моделирование осуществлялось для трех вариантов изначального увлажнения. Расход селевого потока в замыкающем створе составил 379 м³/с для варианта с изначально сухим рыхлообломочным материалом, 1358 м³/с для материала, увлажненного до предела текучести, и 3794 м³/с для заполненного водой. Скорость фронта волны по данным видеосъемки составила 16.6 м/с, расход в замыкающем створе — 1536 м³/с. Следует учитывать, что это были кадры одной из 40 селевых волн. В настоящее время результаты представляют собой первичную оценку характеристик сошедшего селевого потока.

Ключевые слова: сель, моделирование, Памир, озеро Барсемкуль, видеосъемка

Ссылка для цитирования: Куровская В.А., Черноморец С.С., Виноградова Т.А., Висхаджиева К.С., Мавлоназаров О.Н., Бобов Р.А. Оценка характеристик селевого потока 2015 года в долине ручья Барсемдара (Таджикистан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 251–264.

Assessment of debris-flow parameters for the 2015 debris flow event in Barsemdara stream valley (Tajikistan)

V.A. Kurovskaia¹, S.S. Chernomorets¹, T.A. Vinogradova², K.S. Viskhadzhieva¹,
O.N. Mavlonazarov³, R.A. Bobov⁴

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, viktoriakurovskaia@gmail.com

²Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

³Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

⁴Aga Khan Development Network, Dushanbe, Tajikistan

Abstract. In July 2015, in the valley of the Barsemdara stream (Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Tajikistan), plenty of debris flows were observed. As a result, residential areas, social facilities, and infrastructure in Barsem village and neighboring settlements were destroyed and flooded. Besides, debris flow deposits blocked the Gunt River with the subsequent formation of a dammed lake with a maximum volume of 4.0 million m³. In this study, authors provide quantitative assessment of debris flow characteristics based on mathematical modeling and video records. Mathematical model of transport-shear debris flow process developed by Professor Yu. B. Vinogradov was used in this paper for calculating the increment of solid material, debris flow discharge and flow density in the initiation zone, and transformation of the flow in the valley. Moreover, video filming data allowed us to estimate the debris flow velocity. For this, frames of the one debris flow wave passing through the Barsem village, taken by eyewitnesses, were selected. The location was linked to a satellite image. Initial information about relief was obtained using the ALOS digital elevation model dated August 8, 2007 (resolution 12.5 m). The assessment of the debris-forming soils characteristics was carried out, in particular, using the set of rules 425.1325800 of 2018 and literary sources. Modeling was carried out for three cases for the initial moisturizing of friable material. The debris flow discharge in the outlet section was 379 m³/s for case with initially absolutely dry friable material, 1358 m³/s for moistened to yield strength, and 3794 m³/s for the one filled with water. The velocity of the wave front according to video filming was 16.6 m/s, the debris flow discharge in the outlet was 1536 m³/s. It should be considered that these were shots of one of the 40 debris flow waves. Currently, the results are an initial assessment of the characteristics of this debris flow.

Key words: debris flow, modelling, Pamir Mountains, Barsemkul lake, video records

Cite this article: Kurovskaia V.A., Chernomorets S.S., Vinogradova T.A., Viskhadzhieva K.S., Mavlonazarov O.N., Bobov R.A. Assessment of debris-flow parameters for the 2015 debris flow event in Barsemdara stream valley (Tajikistan). In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 251–264.

Введение

Территория Памира характеризуется наличием высоких поднятий, крутых склонов, глубоко расчленённого рельефа, а также снежного покрова и ледников, что приводит к интенсивному образованию селевых потоков. Активное освоение региона невозможно без всестороннего учета селей – одного из ведущих экзогенных факторов региона [Тулеев, 2002]. Целью данной работы является расчет характеристик селевого потока, сошедшего в долине ручья Барсемдара в июле 2015 года. Селевые отложения заблокировали реку Гунт с последующим образованием подпрудного озера

максимальным объемом 4,0 млн м³ [Черноморец и др., 2015]. Оценка количественных характеристик данного селя ранее не проводилась.

Использование математических моделей позволяет получить количественные характеристики селевого потока, что в дальнейшем может быть использовано при прогнозах и проведении превентивных мероприятий. Из-за сложности процессов формирования и движения селевых потоков было разработано большое количество математических моделей. В различных публикациях довольно часто для расчета селевых потоков используются модели, основывающиеся на уравнении движения вязкой жидкости Навье-Стокса в явном виде или в интегрированной по глубине гидравлической форме – уравнении движения Сен-Венана, например, FLO-2D [Petrakov et al., 2012], RAMMS [Bezjak et al., 2019], модель Т. Takahashi и Н. Tsujimoto [Takahashi, Tsumitomo, 1984]. Недостатком данных моделей является необходимая калибровка задаваемых параметров на основе исторических данных. Однако в большинстве случаев для рассчитываемых объектов отсутствуют сведения о предыдущих событиях, то есть калибровка производится путем экспертной оценки. Также существует такой тип моделей, как клеточные автоматы. В их основе лежит следующий принцип – закономерная смена состояний ячеек (мощность потока, максимальная глубина и т.д.) в направлении движения потока. Рассматриваемый тип моделей базируется на различных законах физики прежде всего на законах сохранения вещества, энергии и импульса [Михайлов, 2010]. Примером является модель CAMELOT [Dattilo, Spezzano, 2003]. В данном случае многое зависит от размеров клеток и уравнений, заложенный в основе. Кроме того, для расчета селевых потоков и оползней используются дискретные модели, где поток вещества состоит из структурных частиц – материальных точек или твердых тел. Уравнение движения задается из второго закона Ньютона [Михайлов, 2010]. В зависимости от поведения части в потоке модели могут быть одноэлементными (STONE, RocFall [Guzzetti et al., 2002]) и многоэлементными (DEBRIS [Михайлов, 2010; Михайлов, Черноморец, 2011]). Однако селевые потоки состоят не только из рыхлообломочного материала, большую роль играет водная составляющая. Рассмотрение селя в виде материальных точек приводит к упрощению процесса.

В данной работе использовалась транспортно-сдвиговая модель, разработанная Ю.Б. Виноградовым [Виноградов, 1980а]. В основе модели лежит уравнение увеличения расхода твердого материала, вовлекаемого в зарождающийся селевой поток по мере его продвижения по селевому очагу. Ранее было проведено сравнение модельных характеристик с данными наблюдений Чемолганских экспериментов, результаты были признаны удовлетворительными [Vinogradova, Vinogradov, 2017].

Объект исследования

Ручей Барсемдара расположен на территории Западного Памира и является правым притоком реки Гунт, относится к бассейну реки Пяндж. Он располагается в 15 км выше города Хорог, административного центра Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО) Таджикистана. В период с 16 по 20 июля было зарегистрировано как минимум 14 серий селевых волн в долине Барсемдара. Общее количество селевых волн по подсчетам [Keiler et al., 2018] колеблется от 30 до 40. Массовому сходу селевых потоков предшествовали период длительных положительных температур вкупе с интенсивным снеготаянием на леднике и в приледниковой зоне.

Площадь селевого вреза на моренном пьедестале Барсемдара который образовался в интервале высот 3800 – 4150 м у ледника Чирминтарман, составляет 72 тыс. м² [Докукин и др., 2019].

В ходе маршрутного обследования в августе 2019 г. совместно специалистами географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова и Агентства Ага Хана по Хабитат было установлено, что уступ ледника Чирминтарман, как минимум, имеет две ступени, на нижнюю из которых наложен лавинный снежник. Таяние снежника, по всей видимости, совместно со стоком с ледника и послужил импульсом к формированию селя. Авторы предполагают, что до схода селевого потока 2015 г. из выполаживания у

нижнего края ледника под правым бортом существовал сток. Сохранилась ложбина стока и конус выноса ниже по моренному пьедесталу. В процессе схода селевого потока сформировался новый каньон, расположенный под левым краем моренного пьедестала.

Протяженность селевого вреза (каньона) равняется 800 м, средняя ширина – 90 м, максимальная же – 400 м [Черноморец и др., 2015; Докукин и др., 2019], оценочная глубина составляет 50 м (рис.2).



Рис. 1. Очаг зарождения селя 2015 г. в верхней части долины р. Барсемдара ниже ледника Чирминтарман, 10.08.2019. Фото с квадрокоптера: С.С. Черноморец

Fig. 1. Origination site of the 2015 debris flow in the upper part of the Barsemdara River valley below the Chirmintarman Glacier, 10 August 2019. Photo from a quadcopter: S.S. Chernomorets

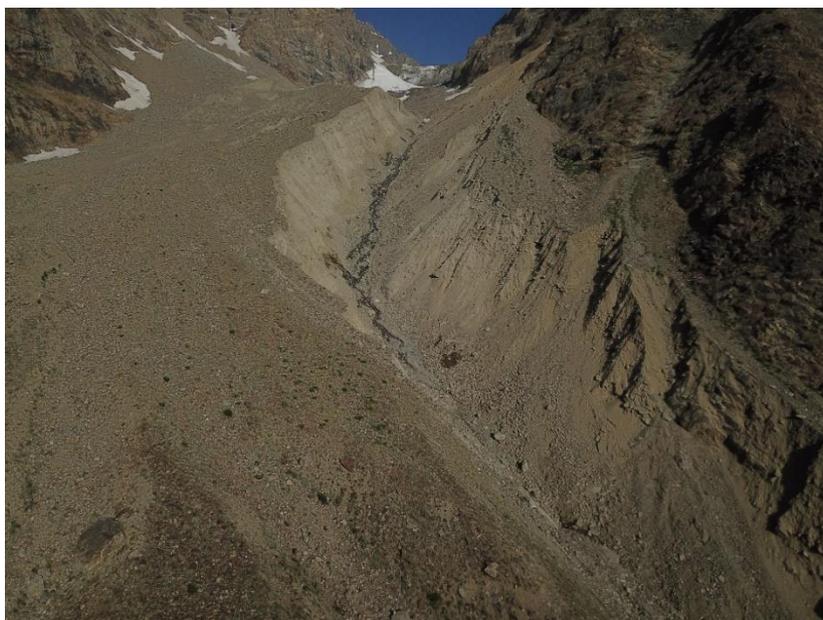


Рис. 2. Селевой врез, образовавшийся после катастрофы 2015 г., 10.08.2019. Фото с квадрокоптера: С.С. Черноморец

Fig. 2. Debris flow cut after the 2015 disaster, 10 August 2019. Photo from a quadcopter: S.S. Chernomorets

Протяженность пути селевого потока от очага до зоны разгрузки в районе слияния ручья Барсемдара с рекой Гунт составила 7250 м при среднем угле наклона 13,5°. По оценкам [Keiler et al., 2018] общий объем выноса селя составил 4,2 млн м³. Сформировавшийся конус вынос блокировал реку Гунт на высоте около 2 400 м. Общая площадь зоны аккумуляции составила 400 тыс. м². В результате образовалось подпрудное озеро площадью 378 тыс. м² и с максимальным объемом 4,0 млн м³ [Черноморец и др., 2015]. После прокладки канала площадь озера уменьшилась до 300 тыс. м² [Докукин и др., 2019].

Образовавшимся озером были затоплены 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].

Материалы и методы

Расчет характеристик селевого потока был выполнен с использованием модели транспортно-сдвигового селеобразования. Данная модель была разработана Ю.Б. Виноградовым по результатам экспериментов по воссозданию селевых потоков, проводившихся на территории Заилийского Алатау в верховьях реки Чемолган в 50 км от Алма-Аты в 1972-1975 гг. [Виноградов, 1980а,б]. Выбор модели был также обусловлен расчетом двух критических углов наклона, которые делят долину на три части с точки зрения возможности развития на них селевых процессов различного типа [Виноградов, Виноградова, 2010]. Первый критический уклон определяется выражением:

$$tg\alpha_1 = \frac{(p-p_0)(1-\varepsilon)}{p(1-\varepsilon)+p_0\varepsilon} tg\varphi. \quad (1)$$

Второй критический уклон определяется аналогично, за исключением замены величины статического угла внутреннего трения (φ) на динамический (φ^*). Здесь использованы следующие обозначения: ρ - плотность селеформирующих грунтов, кг/м³; ρ_0 - плотность воды, кг/м³; ε - пористость селеформирующих грунтов в их естественном залегании, безразмерная величина; φ - статический угол внутреннего трения селеформирующих грунтов, °; φ^* - динамический угол внутреннего трения, °. В рассматриваемом случае плотность породы составила 2500 кг/м³, пористость –0.131, φ – 40 ° [СП 425.1325800.2018], φ^* – 22 ° [Никулин, 2009]. Средний угол наклона в долине ручья Барсемдара составляет 13.5 °, и попадает в диапазон первого и второго критических углов, что соответствует транспортно-сдвиговой модели селеобразования [Виноградов, Виноградова, 2010].

Данная модель была разработана для расчета селевых потоков высокой плотности. При ее создании были приняты следующие положения:

1. Коэффициент неустойчивости ПСМ (потенциальный селевой массив [Виноградов, 1980а]) задавался, как обратная величина известного в механике грунтов и инженерной геологии коэффициента устойчивости склонов массивов рыхлообломочных грунтов [Маслов, 1977].

$$K = tg\alpha/tg\varphi, \quad (2)$$

где α – угол наклона тальвега селевого очага, °; φ – статический угол внутреннего трения селеформирующих грунтов, °.

2. Элементарная потенциальная мощность потока (способность произвести работу на единице пути за единицу времени, Вт / м = кг · м/с³):

$$U = g[Qp_0 + (\zeta p_0 + p)G]sin\alpha, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; Q – расходы воды, м³/с; ρ_0 – плотность воды, кг/м³; ζ – отношение объема воды к объему твердого вещества в ПСМ, безразмерная величина; ρ – плотности селеформирующих грунтов (в ПСМ), кг/м³; G – расход твердого вещества, м³/с; α – угол наклона тальвега селевого очага, градусы.

3. Показатель подвижности селевой массы.

$$R = \frac{Q}{G} + \zeta - \theta_{nn}, \quad (4)$$

где Q/G – соотношение расходов воды и твердого вещества селеформирующих грунтов в движущемся по тальвегу селевого очага зарождающегося грязекаменного потока; θ_{nn} – отношение объема воды к объему твердого вещества, но на пределе текучести (неподвижности) смеси воды и селеформирующих грунтов [Виноградов, Виноградова, 2010]. Если принять следующее положение: приращение расхода твердого материала, вовлекаемого в зарождающийся селевой поток по мере его продвижения по тальвегу селевого очага, прямо пропорционально перечисленным выше трем аргументам, то получается:

$$dG/dl = A \cdot KUR = A \left(\frac{tg\alpha}{tg\varphi} \right) g \sin\alpha \times [Q \rho_0 + (\zeta \rho_0 + \rho)G] \left(\frac{Q}{G} + \zeta - \theta_{nn} \right). \quad (5)$$

Здесь A – коэффициент пропорциональности (м · с²/кг); l – расстояние по тальвегу селевого очага, м. На основании немногочисленных данных, полученных при искусственном воспроизведении селевых потоков в природных условиях, было определено, что коэффициент пропорциональности находится где-то в диапазоне $A=(3\div 5) \cdot 10^{-6}$ м · с²/кг, скорее всего несколько ближе ко второму значению, приведенному в скобках [Vinogradova, Vinogradov, 2017]. При дальнейшем преобразовании уравнение приобретает следующий вид:

$$l = \frac{\left[\frac{Q\rho_0}{\zeta\rho_0+\rho} \ln \frac{Q\rho_0+(\zeta\rho_0+\rho)G}{Q\rho_0+(\zeta\rho_0+\rho)G_0} - \frac{Q}{\zeta-\theta_{nn}} \ln \frac{Q+(\zeta-\theta_{nn})G}{Q+(\zeta-\theta_{nn})G_0} \right]}{A \frac{tg\alpha}{tg\varphi} g \sin\alpha [Q\rho_0(\zeta-\theta_{nn})+Q(\zeta\rho_0+\rho)]} + l_0, \quad (6)$$

где l_0 – расстояние до текущего участка, м; G_0 – начальное значение переменной G для определенного участка и результат расчета для ему предшествующего (для первого верхнего участка $G_0 = 0$).

Основное расчетное уравнение решается не относительно искомой функции G , а относительно аргумента l , что, естественно, приносит некоторые неудобства. Зато само решение уравнения (4) представляется элементарной вычислительной процедурой [Vinogradova, Vinogradov, 2017]. Расход селевого потока (Q_c) в процессе его движения в селевом очаге может быть получен из следующего выражения:

$$Q_c = Q + (1 + \zeta) * G. \quad (7)$$

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

Плотность селевой массы потока в процессе его движения в селевом очаге определяется следующим образом [Виноградов, Виноградова, 2010]:

$$y = \frac{Q * \rho_0 + (\zeta * \rho_0 + \rho) * G}{Q + (1 + \zeta) * G}. \quad (8)$$

Движение селевого потока по долине неизбежно приводит к трансформации потока вследствие перегруженности речной долины рыхлыми отложениями.

Трансформация потока зависит от множества факторов: морфометрических и гидравлических характеристик селевого русла, мощности потока, его плотности, а также от состава и свойств селевой массы. Ю.Б. Виноградовым было предложено следующее: долина от очага до замыкающего створа разбивается на участки с приблизительно одинаковыми шириной и уклоном. Максимальный расход в конце каждого участка определяется по формуле [Виноградов, 1985]:

$$[Q_{cmax}]_k = [Q_{cmax}]_{k-1} * \exp \left[-c_2 * \frac{B_k * (l_k - l_{k-1})}{\cos \alpha * (tg \alpha - tg \varphi)} \right], \quad (9)$$

где $[Q_{c_m}]_{k-1}$ – максимальный расход (m^3/c) селевого потока в конце предшествующего участка; $c_2 = (1 \dots 4) 10^{-7} m^{-2}$ – коэффициент пропорциональности; B_k – ширина долины на расчетном участке, м; l_{k-1} , l_k – верхняя и нижняя точка, ограничивающая расчетный участок по длине селевого русла, м; φ – динамический угол внутреннего трения селевой массы, градусы; α^* – угол наклона расчетного участка селевого русла, градусы. В данной работе $c_2 = 0.000005$.

На основе имеющихся уравнений была реализована программа на языке программирования Python. Входными данными при моделировании являлись данные о рельефе и параметрах селеформирующих грунтов, а также расход воды в ручье: $Q = 25 m^3/c$; $\rho = 2600 kg/m^3$; $\rho_0 = 1000 kg/m^3$; $\alpha = 13.5^\circ$; $\varphi = 40^\circ$; $\varphi^* = 22^\circ$; $\zeta_1 = 0$; $\zeta_2 = 0.133$; $\zeta_3 = 0.2$. По данным маршрутного обследования в августе 2019 г., проведенного совместно специалистами географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова и Агентства Ага Хана Хабитат, расход в ручье Барсемдара был оценен в $15 m^3/c$. Расход воды, поступивший в селевой врез, составлял по оценкам $25 m^3/c$. В данной работе характеристики селеформирующих грунтов оценивались на основе СП 425.1325800 2018 года, материалов изысканий «Севкавгипроводхоза» [Никулин, 2009] и работ Ю.Б. Виноградова [Виноградов, Виноградова, 2010]. В качестве основных данных о рельефе территории использовалась цифровая модель рельефа ALOS датируемая 8 августа 2007 г. (разрешение 12.5 м). При моделировании селевого потока в долине ручья Барсемдара было выделено 4 участка в селевом врезе и 20 в долине с приблизительно одинаковыми уклонами и морфометрическими показателями.

Для оценки реальной скорости селевого потока были использованы данные видеосъемки, выполненной местными жителями в процессе схода селевых волн. Ранее данная методика применялась в работах [Arattano, Marchi, 2000; Berti et al., 2000; Соколова и др., 2019]. Для определения скорости селе по видеосъемке нужно знать расстояние и продолжительность прохождения волны. Необходимо использовать кадры, местоположение волны на которых можно определить на спутниковом снимке. С этой целью были выбраны две контрольные точки: одна – на повороте русла (рис. 4), а вторая – уже непосредственно перед выходом на конус выноса (рис. 5).

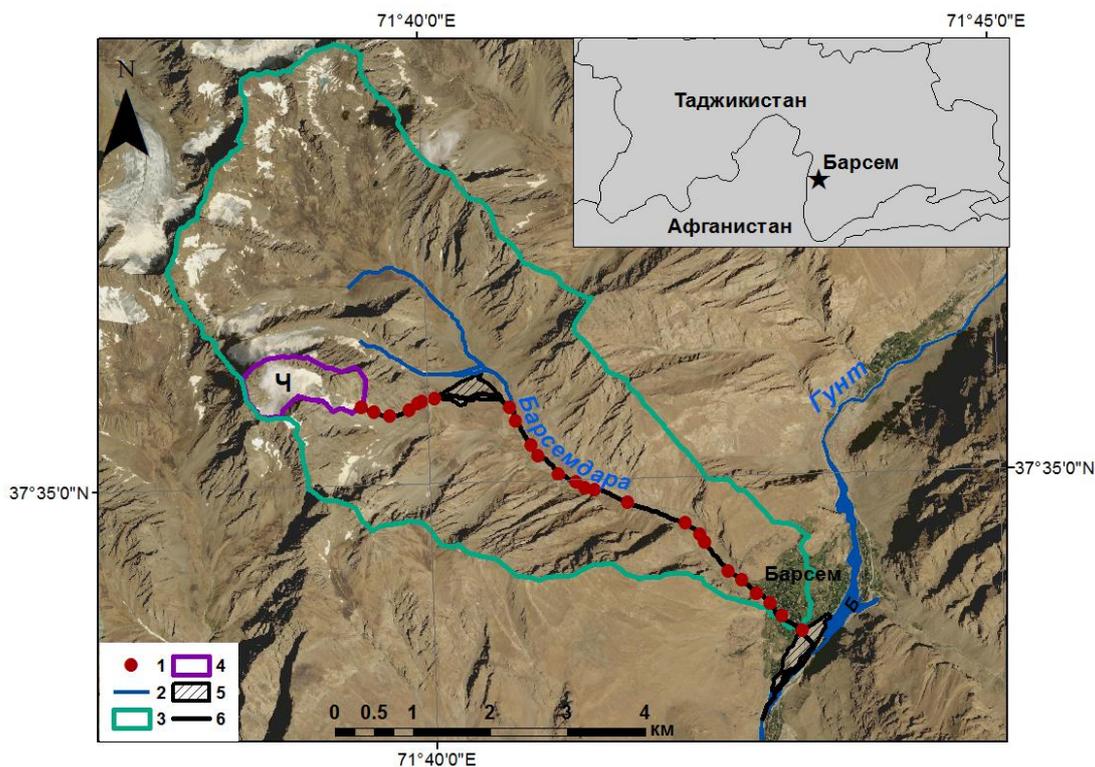


Рис. 3. Схема расположения участков в долине ручья Барсемдара: 1- границы расчетных участков, 2- реки, 3 – границы водосбора, 4-водосбор селевого очага, 5- конус выноса и участок промежуточной аккумуляции, 6-зона движения селя 2015 г., Ч - ледник Чирминтарман, Б – озеро Барсемкуль.

Fig. 3. Location scheme of sights in Barsemdara River valley. Designations: 1 – boundaries of estimation sites, 2 – rivers, 3 – Barsemdara River watershed, 4 – watershed of debris flow origination site, 5 – debris flow fan of 2015 event and a section of intermediate accumulation, 6 – debris flow movement zone in 2015, Ч – Chirmintarman Glacier, Б – Barsemkul Lake Debris



Рис. 4. Схема участка прохождения селевого потока (кадры видеоролика) на участке поворота русла ручья Барсемдара. Стрелкой показана контрольная точка на повороте русла. Источник: <https://www.newsru.com/world/19jul2015/seli.html>

Fig. 4. Scheme of debris flow passage section (film frame) at the section of the Barsemdara River channel turn. Arrow shows the control point on the channel turn. Source: <https://www.newsru.com/world/19jul2015/seli.html>



Рис. 5. Схема участка прохождения селевого потока (кадры видеоролика) на участке впадения руч. Барсемдара в р. Гунт. Стрелкой показана контрольная точка перед выходом на конус выноса. Источник: <https://www.newsru.com/world/19jul2015/seli.html>

Fig. 5. Scheme of debris flow passage section (film frame) at the confluence of the Barsemdara River in the Gunt River. Arrow shows the control point before the debris flow fan. Source: <https://www.newsru.com/world/19jul2015/seli.html>

Привязка осуществлялась в программном пакете ArcGIS, расстояние между двумя контрольными точками составило 216 м. В программном пакете Shortcut фиксировалось время прохождения фронта селевой волны на контрольных точках, т.е. на повороте и перед выходом на конус выноса селевого потока. Полученное в результате измерений время равнялось 13 с.

Результаты

В летний период рыхлые отложения более насыщены талыми водами снежников и ледников за счет высокой проницаемости грунтов, что резко уменьшает их устойчивость. Характеристики селевого потока в сильнейшей мере зависят от влажности ПСМ. Возможны три характерных случая: при абсолютно сухом ПСМ ($\zeta_1 = 0$), увлажненном до предела текучести ($\zeta_2 = 0.133$) и заполненном водой ($\zeta_3 = 0.200$). Вариант а отвечает постепенному затуханию, б- стабильности и с - лавинообразному развитию процесса, которое может ограничить только резкое уменьшение уклона или отсутствие ПСМ [4]. В связи с этим были проведены сценарные расчеты с различной влажностью ПСМ по трем вариантам, описанным выше. Как можно видеть из рисунка ниже (рис.6), приращение твердого материала в очаге во многом определяются именно влажностью селеформирующих грунтов. Данный рисунок раскрывает суть транспортно-сдвигового процесса, заложенного в модели. Максимальное приращение твердого материала составляет от 274 м³/с на 1 участке 4088-3992 м н.у.м. до 1821 м³/с на участке 3767-3715 м н.у.м. для варианта с), минимальное же – от 123 до 182 м³/с, соответственно, для варианта а). Модель в целом отражает закономерность, соответствующую развитию селевого процесса, однако имеются отклонения при сухом ПСМ ($\zeta_1 = 0$), т.к. при недостатке воды в какой-то момент расход твердого вещества должен перестать нарастать по длине участка.

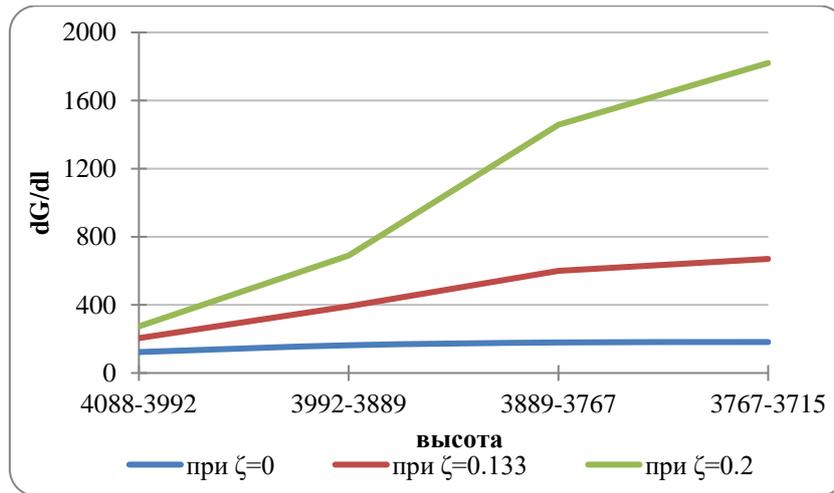


Рис. 6. Изменение интенсивности захвата селеформирующих грунтов по длине очага (т.е. приращение твердого расхода на единицу длины очага (dG/dl)). Вариант а (при $\zeta = 0$) обозначается синим цветом, б (при $\zeta = 0.133$) – красный цвет и вариант с (при $\zeta = 0.2$) – зеленый

Fig. 6. Change in the intensity of soil entrainment along the origination site (i.e., the increment in solid flow per unit length of the origination site (dG/dl)). Case a (for $\zeta = 0$) is marked in blue, b (for $\zeta = 0.133$) is red, and case c (for $\zeta = 0.2$) is green

Необходимо отметить, что вид функции роста расхода селя по очагу по своему виду повторяет приращение твердого материала. Значение расхода изменяется в пределах от 148 и до 455 m^3/c для варианта а, 255 – 1630 m^3/c для варианта б и 353 – 4551 m^3/c для варианта с.

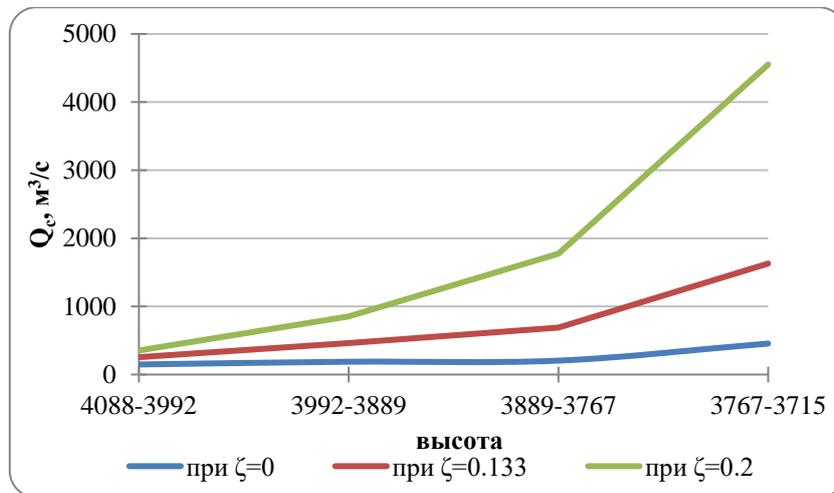


Рис. 7. Рост расхода селя по длине очага. Вариант а (при $\zeta = 0$) обозначается синим цветом, б (при $\zeta = 0.133$) – красный цвет и вариант с (при $\zeta = 0.2$) – зелены

Fig. 7. Increase of debris flow discharge along the origination site. Case a (for $\zeta = 0$) is marked in blue, b (for $\zeta = 0.133$) is red, and case c (for $\zeta = 0.2$) is green

Плотность селевой массы по очагу изменялась в среднем в пределах от 2239 kg/m^3 при начальном ПСМ, заполненным водой, и до 2407 kg/m^3 для абсолютно сухого ПСМ. Полученные значения соответствуют диапазону плотности грязекаменного потока [Виноградов, 1980]. Движение селевого потока в долине неизменно сопровождается его трансформацией. На рисунке ниже представлены расчеты трансформации расхода селевого потока по формуле, упомянутой выше.

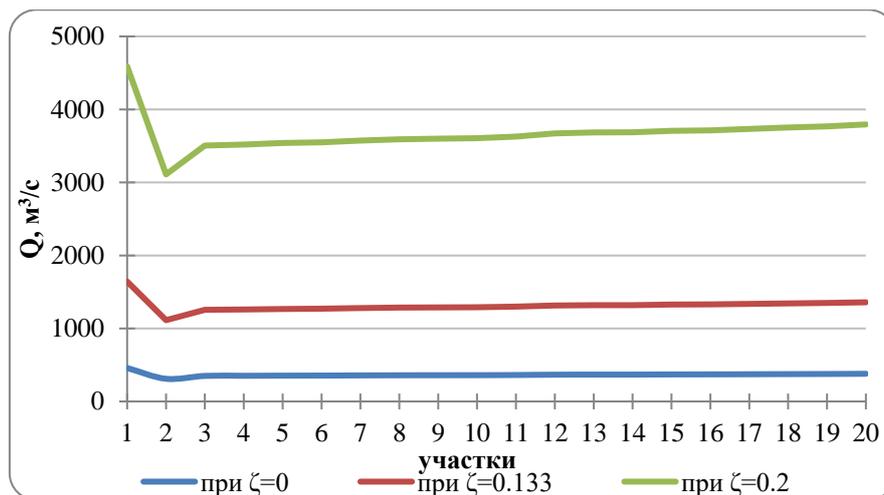


Рис. 8. Трансформация расхода селя по долине ручья Барсемдара, полученных при моделировании по 3 сценариям влажности ПСМ. Вариант а (при $\zeta = 0$) обозначается синим цветом, б (при $\zeta = 0.133$) – красный цвет и вариант с (при $\zeta = 0.2$) – зеленый

Fig. 8. Transformation of the debris flow discharge along the valley of the Barsemdara River. Data were obtained from modeling according to three scenarios of moisture content of the friable material. Case a (for $\zeta = 0$) is marked in blue, b (for $\zeta = 0.133$) is red, and case c (for $\zeta = 0.2$) is green

Как можно видеть, на 2 участке в долине происходит резкое снижение расхода. Это связано в первую очередь, со средней шириной, которая на этом участке в среднем составляет 200 м. На снимке с БПЛА, полученном в ходе маршрутного обследования долины в 2019 году на данном участке наблюдается промежуточная аккумуляция селевых отложений (рис. 9).

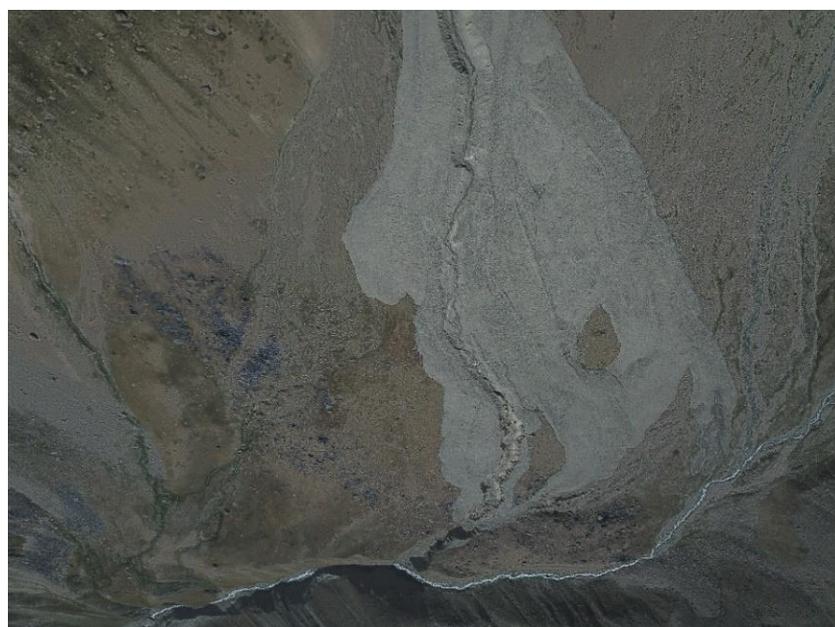


Рис. 9. Зона промежуточной аккумуляции перед выходом потока в главное русло. 10 августа 2019 г. Фото с квадрокоптера: С.С. Черноморец

Fig. 9. Zone of 2015 debris flow intermediate accumulation before the flow enters the main channel, 10 August 2019. Photo from a quadcopter: S.S. Chernomorets

Оценка скорости потока

Помимо высокой насыщенности рыхлообломочным материалом, селевому потоку также присуще волновое движение [Казаков, 2001; Натишвили, Тевзадзе, 2011]. В данной работе с помощью видеосъемки были получены значения скорости движения фронта одной из многих селевых волн, принесенной материал которой значительно участвовал в формировании конуса выноса. Скорость рассчитывалась как пройденное волной расстояние, деленное на время, и составила 16.6 м/с. Также была оценена площадь поперечного сечения в программном пакете ArcGIS с использованием ранее применяемой ЦМР и функции Contour для построения изолиний. Рассчитанный расход селевой волны составил 1536 м³/с. Однако в связи с тем, что площадь поперечного сечения была получена по ЦМР 2007 года, и скорость определялась только для одной из 40 волн, полученные с помощью видеосъемки значения носят оценочный характер.

Выводы

В данной работе была впервые проведена оценка характеристик селевого потока, сошедшего по долине ручья Барсемдара. Для этого использовалась транспортно-сдвиговая модель селеобразования, разработанная Ю.Б. Виноградовым. В данной работе расчет уравнений модели велся с помощью средств языка программирования Python. Ранее модель использовалась для расчетов и сравнения данных наблюдений Чемолганских экспериментов [Vinogradova, Vinogradov, 2017]. На этапе подготовки исходной информации селевой врез и долина были разбиты на участки с одинаковыми морфометрическими показателями на основе данных ЦМР ALOS 2007 года. Всего было выделено 24 участка. Сначала велся расчет прироста твердого материала, а также селевого расхода и плотности по длине очага для 3 вариантов увлажнения ПСМ: при абсолютном сухом, увлажненным до предела текучести и заполненным водой. Полученные данные еще раз свидетельствуют о том, что влажность ПСМ во многом определяет характер процесса. Максимальные значения расхода селевого вала на выходе из очага составили до 455 м³/с для варианта а, 1630 м³/с для b и 4551 м³/с для варианта с. Максимальное значение приращения селевого материала наблюдалось для варианта ПСМ, заполненного водой, и составило 1821 м³/с. Плотность селевого потока в среднем составила 2292 кг/м³ для варианта расчета с и 2382 кг/м³ для а, что соответствует плотности грязекаменного селевого потока.

Также была рассчитана трансформация волны селевого потока при движении по долине. Расход селевого потока в замыкающем створе составил 379 м³/с для варианта а, 1358 м³/с для b и 3794 м³/с для варианта с. Кроме того, была получена скорость одной из селевых волн с помощью видеосъемки. Для этого были выбраны кадры прохождения волны селея на территории кишлака до поворота и перед выходом на конус выноса, которые в дальнейшем привязывались к спутниковому снимку. Зная расстояние и время, была получена скорость селевой волны, которая составила 16.6 м/с. Далее была измерена площадь поперечного сечения и получен расход селея, который составил 1536 м³/с. Следует учитывать, что это были кадры одной из 40 селевых волн, и полученные данные носят оценочный характер.

Важным этапом будущих работ с транспортно-сдвиговой моделью станет уточнение характеристик селеформирующих грунтов. В настоящее время результаты представляют собой первичную оценку характеристик данного селея. Несмотря на это, полученные данные могут иметь практическое значение для расчета параметров селевых потоков высокой плотности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-35-90006 и 18-05-00520, а также темы МГУ имени Ломоносова I.7 АААА-А16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов» (ГЗ) МГУ имени М.В. Ломоносова.

Авторы выражают благодарность И.В. Крыленко (МГУ имени М.В. Ломоносова), А. Акдодову и Ф.О. Мародасейнову (Агентство Ага Хана по Хабитат) за участие в сборе

полевых материалов; Ч.Д. Икболшоеву, председателю кишлака Барсем Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана, за логистическую поддержку; Г. Филлоеву, очевидцу селя 2015 г., за предоставленные сведения.

Список литературы

- Виноградов Ю.Б. (1980а) Транспортный и транспортно-сдвиговый селевые процессы. // Селевые потоки, Сб. 4. КазНИГМИ, с. 3–18.
- Виноградов Ю.Б. (1980б) Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоздат, 144 с.
- Виноградов Ю.Б. (1985) К методике расчета характеристик селевых потоков. // Труды Государственного гидрологического института, вып. 304, Л., с.83–89.
- Виноградов Ю. Б., Виноградова Т.А. (2010) Математическое моделирование в гидрологии: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 304 с.
- Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Запороженко Э.В., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р. (2019) Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе. // Геориск, т. XIII, № 1, с. 26–36.
- Казаков Н.А. (2001) Волновая динамика селей // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. № 2, с. 158–164.
- Маслов, Н. Н. (1977). Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 320 с.
- Михайлов В.О. (2011) Классификация численных математических моделей селевых и склоновых процессов // Инженерная геология, №3, с. 26–33.
- Михайлов В.О., Черноморец С.С. (2011) Математическое моделирование селей, обвалов и оползней. LAP Lambert, 131 p.
- Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. (2011) Волны в селях. М.: ООО Издательство Научтехлитиздат, 160 с.
- Никулин А.С. (2009) Опыт определения углов внутреннего трения селевых грунтов. // ОАО «Севкавгипропроводхоз». Сборник научных трудов. Выпуск 18. Пятигорск, 2009, с.30–33.
- Соколова Д.П., Куровская В.А., Осташов А.А., Казаков Н.А. (2019) Оценка динамических характеристик селевого потока по видеоматериалам // Гидросфера. Опасные процессы и явления. Т. 1. Вып. 1. С. 31–51, DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.003
- СП 425.1325800.2018 «Инженерная защита территорий от эрозионных процессов. Правила проектирования» М.: Минстрой РФ, 2018. 60 с. <https://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/469/SP-425.pdf>.
- Тукеев О.В. (2002) Селевые явления Памира: катастрофы, закономерности, прогноз. М., 176 с.
- Черноморец С., Савернюк Е., Бобов Р., Асмаатов Н., Мавлоназаров О., Мирмамадов Д., Пирмамадов У., Шафиев Г. (2015) Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан). // Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии, Сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова, Санкт-Петербург, с. 261–264.
- Arattano M., Marchi L. (2000). Video-derived velocity distribution along a debris flow surge. // *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9), p. 781–784. doi:10.1016/s1464-1909(00)00101-5
- Berti M., Genevois R., LaHusen R., Simoni A., Tecca P.R. (2000). Debris flow monitoring in the aquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps). // *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9), p. 707–715. doi:10.1016/s1464-1909(00)00090-3
- Bezák N., Sodník J., Mikoš M. (2019) Impact of a random sequence of debris flows on torrential fan formation. // *Geosciences*, 9, 64.
- Dattilo G., Spezzano G. (2003) Simulation of a cellular landslide model with CAMELOT on high performance computers // *Parallel Computing*, Vol. 29, No. 10, p. 1403–1418.
- Guzzetti F., Crosta G., Detti R., Agliardi F. (2002) STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls // *Computers & Geosciences*, Vol. 28, No. 9, p. 1079–1093.
- Keiler M., Zimmermann M., Bigler S., Fuchs S. (2018). Assessing a large-scale debris flow in Barsem, Tajikistan: exceptional size, duration and process chain. EGU General Assembly Conference Abstracts, Vol. 20, p. 5405.
- Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., Seynova I.B. (2012) Monitoring of Bashkara glacier

- lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst. // *Natural Hazards*, 61, p. 1293–1316.
- Takahashi T., Tsujimoto H. (1984) Numerical simulation of flooding and deposition of a debris flow // *Disastrous Preventing Research Institute, Kyoto University*, No. 27(B-2), p. 467–485.
- Vinogradova T.A., Vinogradov A.Y. (2017) The Experimental Debris Flows in the Chemolgan River Basin. // *Natural Hazards*, 88, p. 189–198.