

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЛЕВОГО ПОТОКА ПРИ ПРОРЫВЕ ОЗ. БАШКАРА В 2017 г.

© 2024 г. А. С. Солодова*, Д. А. Петраков, К. А. Пуганов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: annanasiy99@mail.ru

Поступила 19.05.2024 г.

После доработки 12.07.2024 г.

Принята к печати 07.10.2024 г.

С помощью численного моделирования в программе g.avaflow оценена динамика и зона затопления паводка и водокаменного селевого потока при прорыве оз. Башкара 2017 г. Рассчитаны скорости, глубины потока, а также впервые получены расчётное давление и кинетическая энергия потока для различных участков русла, оценена величина эрозии и аккумуляции материала, изменение рельефа после прохождения прорывного паводка.

Ключевые слова: прорыв ледникового озёра, прорывной паводок, селевой поток, двумерное математическое моделирование, Северный Кавказ, Приэльбрусье

DOI: 10.31857/S2076673424040043, EDN: HTRDDK

ВВЕДЕНИЕ

Прорывы ледниковых озёр — одно из наиболее разрушительных стихийных бедствий в высокогорье (Harrison et al., 2014; Tielidze et al., 2018). Они провоцируют селевые потоки и прорывные паводки, которые распространяются на десятки километров вниз по долинам (Черноморец и др., 2007). В нивально-гляциальном поясе Центрального Кавказа из-за ускоряющихся темпов отступления ледников (Хромова и др., 2021) в настоящее время формируется ряд новых ледниковых озёр (Докукин и др., 2020), что наряду с нарастанием туристического потока приводит к увеличению опасности их возможных прорывов для населения и инфраструктуры. Согласно прогнозам, площадь потенциально прорывоопасных озёр Приэльбрусья будет возрастать (Лаврентьев и др., 2020). По этой причине необходима разработка новых и совершенствование уже имеющихся методик оценки селевой опасности. Кроме того, в отсутствие исторических прецедентов важно максимально точно оценить границы опасных зон, в чем может значительно помочь применение математического моделирования.

В качестве объекта исследований был выбран комплекс Башкаринских озёр в Приэльбрусье. Их известные прорывы наблюдались в 1958, 1959 и 1960 гг. (Дубинский, Снегур, 1961). Крупнейший из

них произошел 1 сентября 2017 г., когда моренный вал, удерживающий озеро последние десятилетия, начал разрушаться и пропускать воду (Петраков и др., 2017). В результате прорыва озеро было спущено почти на 2/3, а гляциальный сель, сформированный значительным количеством воды (примерно 800 тыс. м³) (Кидяева и др., 2018), нанес серьёзные повреждения в долинах рек Адылсу и Баксан.

Прорыв озера Башкара уже был прежде смоделирован. Если первые работы носили прогностический характер (Petrakov et al., 2012) и оценивали возможные последствия потенциального прорыва, то работы (Кидяева и др., 2018; Kornilova et al., 2021) базировались на фактических сведениях о прорыве и ставили целью оценить динамические характеристики сошедшего потока.

Цель работы — оценка динамики прорывного селя 2017 г. из оз. Башкара при помощи численного моделирования в программе g.avaflow, которая позволяет учитывать в потоке жидкую и крупнообломочную составляющие.

В результате работы были рассчитаны основные параметры сошедшего водокаменного потока: скорость течения, глубины, время добега до контрольных точек. Кроме того, впервые было рассчитано давление и кинетическая энергия потока для различных участков русла, и оценена величина эрозии и аккумуляции материала, изменение рельефа после прохождения прорывного паводка.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплекс Башкаринских озёр, включающий оз. Башкара и оз. Лапа, расположен в верховьях долины Адылсу на северном склоне Главного Кавказского хребта. Оз. Башкара — ледниково-запрудное и питается талыми водами одноименного горно-долинного ледника. Первые упоминания о нем появились в период международного геофизического года (далее — МГГ) (Дубинский, Снегур, 1961). В августе 1958–1960 гг. на озёре произошла серия прорывов, которые стали причиной образования гляциальных селей в бассейне р. Адылсу. Объем первоначального водного импульса селей 1958 и 1959 гг. оценивается в 60 тыс. м³, а объем селевых отложений, растянувшихся на 12 км ниже по долине — 2 млн м³ (Сейнова и др., 1997). После прорыва 1960 г. площадь озёра уменьшилась более чем вдвое, до 24 тыс. м², объем сброшенной воды из озёра мог составлять примерно 300 тыс. м³ (Докукин и др., 2020).

После формирования устойчивого подледного канала стока прорывы озёра прекратились, и вплоть до 1980-х годов уровень оз. Башкара оставался относительно стабильным. В последующие десятилетия вследствие формирования моренного вала и фильтрационных каналов стока в нем (Докукин и др., 2020) на озёре было зафиксировано резкое колебание уровней воды и незначительное разрастание озёра, которое продолжалось вплоть до лета 2017 г. В 2008 г. впервые был зафиксирован перелив воды через моренную дамбу. Вероятность прорыва тогда оценивалась как высокая, из-за чего местными волонтерами было решено сделать прокоп для снижения объема озёра. К 2016 г. объем озёра увеличился до 1 млн. м³ (Черноморец и др., 2018).

Четвёртый прорыв оз. Башкаринского произошёл 1 сентября 2017 г. В конце августа уровень воды в озёре был на 3 м выше среднегогодовых значений конца лета. Триггером прорыва стали аномальные ливневые осадки: 30–31 августа выпало 45 мм, а в ночь на 31 августа — 1 сентября менее чем за 8 часов выпало еще 98 мм (Черноморец и др., 2018). Интенсивные осадки привели к прорыву озёра и формированию селевого потока, который начал свое движение вниз по поверхности ледника Башкара в сторону оз. Лапа.

После прорыва уровень озёра упал на 16.5 м. Объем жидкой фазы потока оценен как 1.1 млн м³, из которых 800 тыс. м³ были сброшены из озёра. Приток воды от аномального ливня мог составить в грубом приближении 200 тыс. м³, а оставшиеся 50–100 тыс. м³ воды были вовлечены из нижележащего оз. Лапа, где после прорыва уровень понизился на 1 м. Объем твёрдой фазы, вовлеченной в движение селем, оценивается как 350–500 тыс. м³ (Черноморец и др., 2018). Максимальные расходы

паводка в верхней части долины Адылсу составили около 500 м³/с, ближе к выходу в долину Баксана — 200–250 м³/с. Селевые заплески в районе моста через Адылсу были зафиксированы на высоте 7–8 м над руслом.

Селевой поток стал причиной гибели трех человек, разрушения 4 км автодорог и прекращения транспортного сообщения с Приэльбрусьем. В населенных пунктах верхней части Баксанской долины были нарушены телефонная связь, а также газо- и электроснабжение. Затраты на аварийно-спасательные работы составили примерно 160 млн руб., а затраты на восстановление пострадавших районов — еще 650 млн руб. (Черноморец и др., 2018). На сегодняшний день оз. Башкара находится в квазистационарном положении, но оно может продолжить рост за счет обрушений моренных склонов прорана и подъема уровня моренно-завальной плотины.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Обзор существующих моделей, применяемых для моделирования прорывных паводков. **STREAM-2D** (Беликов и др., 1992) и **FLO-2D** (O'Brien et al., 1993) — эти коммерческие двумерные гидродинамические модели были разработаны для проведения расчетов трансформации стока при паводках, определения зон затопления и мероприятий по предотвращению и минимизации последствий наводнений и паводков. Они основаны на численном решении системы уравнений Сен-Венана в приближении “мелкой воды” (Кюнж и др., 1985). При решении уравнения для расчета коэффициента Шези используется формула Маннинга, с учетом коэффициента шероховатости. В качестве граничных условий в программе **STREAM-2D** задаются расходы воды на верхней и уровни воды на нижней границе расчетного участка как функции времени, в качестве начальных условий выступают уровни водной поверхности в пределах расчетного участка на начало расчёта. Модель **STREAM-2D** ограничена своей способностью моделировать смешанные потоки, такие как сель или прорывы озёр, и больше подходит для моделирования паводков и для анализа транспорта мелких наносов. Тем не менее, синтез гидродинамической модели **STREAM_2D** и модели формирования стока **ECOMAG** показал хорошие результаты при использовании в долине Адылсу (Kornilova et al., 2022). Отличием **FLO-2D** служит наличие селевого блока, позволяющего рассчитывать параметры селевых потоков на основе уравнений движения неньютоновских жидкостей. Однако учитывая, что обе эти модели разработаны изначально для водных потоков на равнинах, они не могут полностью учитывать горные условия (Кидяева и др., 2018).

RAMMS: DEBRIS FLOW — это коммерческий программный пакет, основанный на методе конечных объемов. RAMMS: DEBRIS FLOW был разработан для имитации схода селевых потоков и паводков на сложном горном рельефе. Моделируемый объем материала представляется одной фазой и рассчитывается согласно модели трения Фельми (Voellmy, 1955). Сопротивление трению выражается через два параметра: безразмерный коэффициент сухого трения (μ) и коэффициент турбулентного трения (ξ) (Christen et al., 2010). Скорость частиц в RAMMS усредняется по нормали к склону, поэтому распределение характеристик потока по глубине не учитывается. Модель также не предполагает деформации сдвига. Входные параметры для модели: объем водного потока, заданный с помощью гидрографа, или с помощью зоны разделения, имеющей площадь и глубину; и параметры сопротивления. Результаты моделирования представляются в виде плановой картины распределения скоростей течения, уровней водной (селевой) поверхности и глубин в пределах расчетной области. В программе есть возможность учитывать инженерные сооружения, а также рассчитывать интенсивность эрозии, вызываемой моделируемым потоком. Для моделирования селевых потоков RAMMS подходит в большей степени, нежели описанные выше модели, так как изначально был разработан для горных регионов, и учитывает крутизну склонов, турбулентность и вязкость потока (Кидяева и др., 2018). Однако использование модели смеси не в полной мере подходит для симуляции несвязных водо-каменных селей.

FLOVI. Особенность данной программы заключается в объединении уравнений моделей прорыва озёра и транспортно-сдвигового селеобразования, каждая из которых представляет собой отдельный блок (Юдина и др., 2022). Решение уравнений выполняется методом последовательного приближения. Эта комбинация математических моделей позволяет FLOVI учитывать приращение материала в ходе формирования потока в очаге. Такого функционала в предыдущих моделях нет. В качестве входных данных используется водный гидрограф, на основе которого рассчитывают гидрограф селевой волны. Таким образом, гидрограф прорывного паводка, полученный по первому блоку уравнений, может быть использован во втором для расчета характеристик селя в зоне формирования. Помимо того, если в бассейне отсутствует озеро, в модели предусмотрен расчет отдельно селевого потока.

Моделирование прорывного паводка в данной работе производилось в программе **r.avaflow**. Инструмент включает в себя две различные модели: модель смеси (модель типа Voellmy) (Fischer et al., 2012) и многофазную модель (Pudasaini et al., 2019). Выбор модели зависит от сложности и типа моделируемого процесса. Модель смеси и однофазная

модель подходят для сценариев, где всю моделируемую массу можно представить однородной средой. Многофазную модель целесообразно использовать для более сложных процессов, например, когда процессы эрозии, или вовлечение нового материала приводят к заметному изменению характеристик потока. Многофазная модель может рассчитывать распространение и взаимодействие трёх различных компонентов (крупной твердой фракции, мелкодисперсной твердой фракции и вязкой жидкости), каждый из которых имеет определенное физическое поведение. Способность учитывать свойства сразу трёх компонентов как нельзя лучше подходит для моделирования несвязных селей или сложных каскадных процессов. Кроме того, программа представляет возможность рассчитывать изменения базальной поверхности, величину эрозии и аккумуляции, что служит неоспоримым преимуществом перед иными существующими моделями.

К недостаткам программы можно отнести трудоемкость подготовки входных данных, отсутствие пользовательского интерфейса, использование лишь одного ядра процессора, а также высокие требования к оперативной памяти. К примеру, расчеты по данной работе задействовали 16 ГБ оперативной памяти и длились более 40 часов.

Поскольку исследуемый прорывной паводок из оз. Башкара трансформировался в водокаменный селевой поток, не совсем корректно было бы моделировать его, учитывая лишь водную составляющую. Модель смеси, вроде той, что используется в RAMMS: DEBRIS FLOW, тоже не в полной мере может описать физическое поведение несвязного водокаменного селя. Она в большей степени подходит для симуляции связных грязевых или грязекаменных потоков, в которых жидкая компонента практически неотделима от твердой. В случае моделирования прорывных гляциальных паводков в долине р. Адылсу, несущих значительное количество грубообломочного материала, необходимо, чтобы в потоке были учтены две фазы: жидкая и твердая (грубообломочная). Таким образом, на данный момент **r.avaflow** — наиболее подходящее решение для подобного сценария.

Подтверждает эффективность модели множество удачных примеров ее использования для исследований прорывных гляциальных паводков в различных горных регионах (Mergili et al., 2018; Zheng et al., 2020; Sattar et al., 2023). Имеются как ретроспективные, так и прогнозные работы, однако все они выполнены иностранными исследователями для зарубежных горных систем. В отечественной науке этот инструмент остается неизвестным, и на территории Кавказа он прежде применен не был.

Математическое моделирование. Используемая модель – r.avaflow (версия 3), это программа, позволяющая осуществлять моделирование снежных лавин, селевых потоков и камнепадов, оползней и прочих русловых и склоновых процессов. Программа написана на языках Python и R, и, в отличие от большинства аналогов, имеет открытый исходный код. r.avaflow была разработана и протестирована на Ubuntu 20.04 (landslidemodels.org).

Программа производит вычисления и визуализирует результаты моделирования на базе GRASS GIS.

Логическая структура модели представлена на рис. 1. Модель требует на вход данные о рельефе, зонах и объемах вовлекаемого материала, а также физические параметры каждой из учитываемых фаз. Растры высвобождаемого и вовлеченного материала задаются для каждой фазы отдельно.

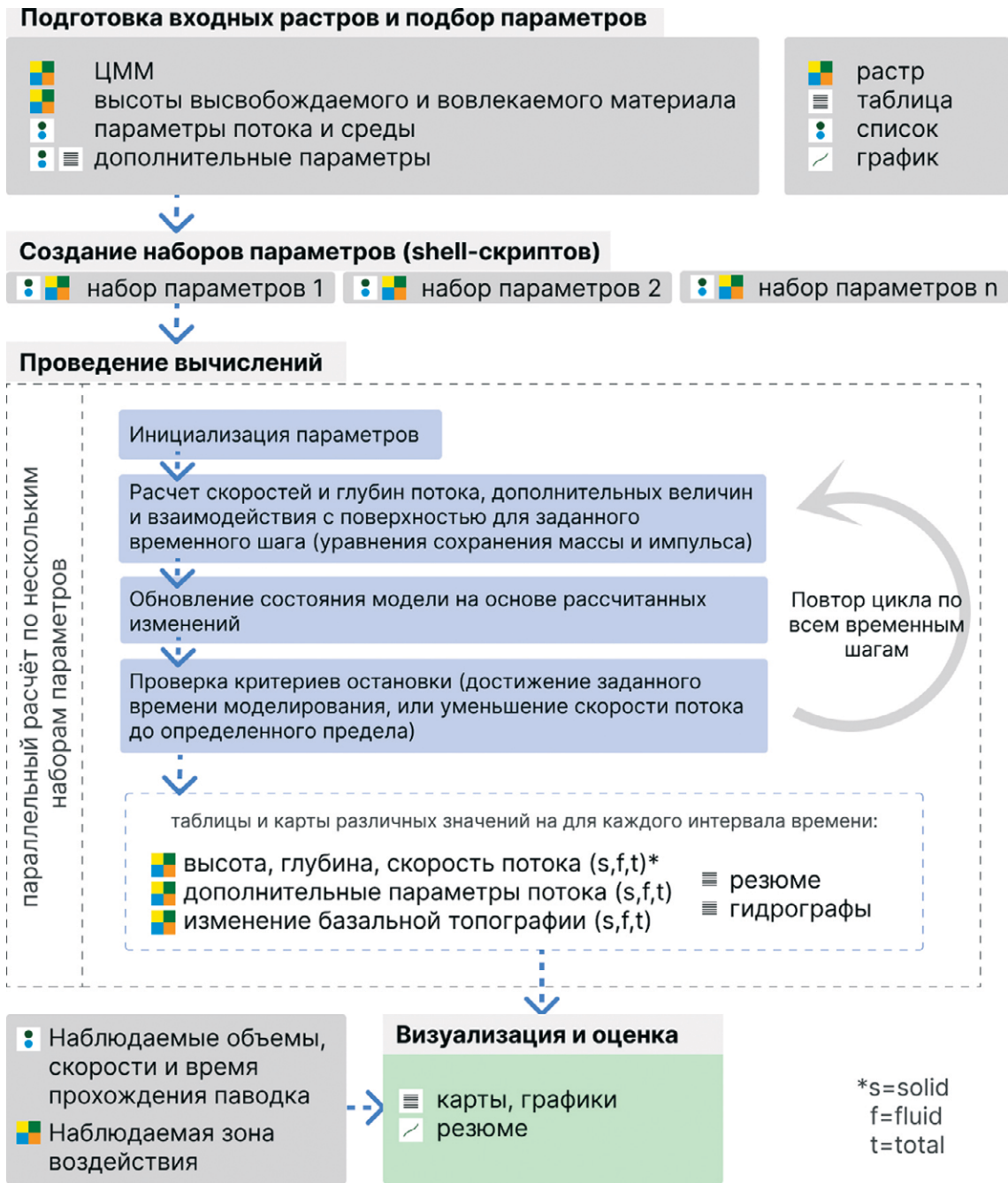


Рис. 1. Логическая структура модели r.avaflow
Fig. 1. Logical structure of r.avaflow

После загрузки предварительно обработанных растров необходимо подобрать параметры самого потока и окружающей среды (см. рис. 1). Все установленные пользователем параметры являются строковыми переменными и записываются в исполняемый файл — shell-скрипт, который запускается через командную строку. В одном шелл скрипте могут быть записаны сразу несколько сценариев.

При исполнении шелл-скрипта происходит импорт растров в среду GRASS GIS, затем g.avafLOW приступает к расчетам, последовательно решая уравнения состояния, сохранения массы и импульса в каждой точке сетки на протяжении заданного пользователем времени. После выполнения расчетов начинается процесс визуализации, в результате которого пользователь получает: набор ASCII растров, отражающих все рассчитанные характеристики потока; набор текстовых файлов, резюмирующих все вышеуказанные параметры за все время моделирования; набор GIF файлов, отражающих динамику потока и его основных характеристик; набор PNG файлов, фиксирующих состояние потока через указанный интервал времени, а также результирующий файл времени добегания потока.

Математическая основа многофазной модели. В общих чертах механические компоненты, учитываемые моделью, описаны ниже.

Жидкая фаза представляет собой смесь воды и тонких частиц (глины, ила и коллоидов) и может быть описана как вязкопластичный материал Гершеля-Бакли, зависящий от скорости сдвига (Coussot et al., 1998; von Boetticher et al., 2016). Как правило, при моделировании селевых потоков суспензия имеет скорее вязкие свойства при быстром движении, а в процессе аккумуляции селевой массы, при снижении скоростей движения приобретает все больше пластичных свойств.

Мелкодисперсная фаза состоит из песка и гравия. В модели она представлена как кулоновско-вязкопластичный материал, физическое поведение которого зависит от скорости сдвига и давления (жидкость Гершеля—Балкли или Бингамовская жидкость) (Domnik et al., 2013; von Boetticher et al., 2016). В ходе запущенного сценария эта фаза не учитывалась.

Твердая фаза представляет собой грубообломочный материал (валуны, галька, гравий), который описывается как кулоновское твердое тело по континууму Мора—Кулона, не зависящее от скорости сдвига (Iverson, Denlinger, 2001; Savage, Hutter, 1989). Крупные частицы не обладают вязкостью. Сила трения зависит от нормальной нагрузки и трения частиц.

Взаимодействия между фазами в модели Pudasaini представлены набором парциальных дифференциальных уравнений, которые описывают сохранение массы и импульса (уравнения

Навье—Стокса) для каждой фазы (Pudasaini et al., 2019). Использование уравнений Навье—Стокса вместо уравнений Сен-Венана, которые используются в программах — аналогах, является более предпочтительным для селевых потоков, поскольку последние предполагают, что давление в потоке распределяется гидростатически, а вертикальные ускорения незначительны (Mergili et al., 2017). Для селевых потоков со значительной крутизной русла это не вполне верно. Уравнения Навье—Стокса, в отличие от уравнений Сен-Венана, могут описать детали взаимодействия между фазами, такие как трение и столкновения частиц. Они также учитывают вертикальные ускорения и негидростатическое давление, что крайне важно для анализа селевых потоков с крутыми руслами и сложной динамикой. Таким образом, уравнения Навье—Стокса позволяют описывать: скорость потока, направление, изменения давления внутри потока, взаимодействие между твердыми и жидкими фазами, а также трение и столкновения частиц. Поэтому математическая основа исследуемой модели более детально описывает динамику селевых потоков.

Используемые материалы. В качестве исходных данных о рельефе долины Адылсу была использована цифровая модель местности (далее — ЦММ), полученная со спутника SPOT-6 с разрешением 3.2 м (дата съемки 01.08.2017). На основе данной ЦММ было произведено моделирование прорыва оз. Башкара 2017 г. Также была использована ЦММ, сгенерированная по стереопаре снимков Pleiades, с разрешением 1 м и датой съемки 03.09.2017. Сравнение ЦММ позволило примерно очертить зоны наиболее интенсивной эрозии и аккумуляции в русле. Для нанесения контуров озёр и зон вовлечения материала использовались базовые спутниковые покрытия ESRI ArcGIS Imagery и Яндекс.

Для верификации модели помимо фактических данных о прорыве (Черноморец и др., 2018) были использованы и собственные данные одного из авторов, полученные в ходе полевых обследований долины Адылсу 20–21 июля 2022 г.: фотографии озёрной котловины и русла Адылсу, ортофотоплан, выполненный при помощи БПЛА, ЦММ с разрешением 0.3 м, поперечный профиль прорыва, схема преобладающих на разных участках долины русловых процессов.

Все входные растры предварительно обрабатывались в ArcGIS Pro. Растры обрезаны по единому экстенду, имеют одинаковое пространственное разрешение и пространственную привязку к метрической системе координат UTM WGS-84 зона 38N.

Реализация сценария прорыва оз. Башкара 2017 г. В ходе работы было запущено моделирование водокаменного селя, учитывающее жидкую

Таблица 1. Релизация сценария прорыва оз. Башкара 2017 г.

Переменная	Определение	Источник/значение
elev	ЦМР	ЦММ SPOT-6 с разрешением 3 м, от 1.08.2017
hrelease1	растр высот высвобождаемого твёрдого (1) и жидкого (3) материала	Материал размытой подпруживающей дамбы (33 тыс. м ³). Объём оценен на основе сравнения ЦМР SPOT-6 и Pleiades
hrelease3		800 тыс. м ³ воды из оз. Башкара, 50 тыс. м ³ — из оз. Лапа (Черноморец и др., 2018)
hentrmax1	растр высот вовлекаемого твёрдого (1) и жидкого (3) материала	250 тыс. м ³ у альплагеря “Шхельда”, еще 130 тыс. м ³ — ниже УСБ “Джан-Туган”, и по 20 тыс. м ³ — из морены МЛП и озёрной перемычки оз. Лапа (Черноморец и др., 2018)
hentrmax3		50 тыс. м ³ воды, поступившей из русловых запасов воды
density	плотность фаз	Плотность твердой фазы 2600 кг/м ³ , жидкой — 1000 кг/м ³
friction	вязкость фаз	Угол внутреннего трения твердой фазы составил 35°, угол базального трения — 20°, турбулентное трение — lg3. Коэффициент трения жидкости 0.05
cellsize	размер ячейки для расчётов	5 м
entrainment control	контроль вовлечения	Потоку разрешается вовлекать материал с поверхности течения. Величина вовлечения равна коэффициенту эрозии (entrainment coefficient), умноженному на импульс потока
basal	взаимодействие с базальной поверхностью	Entrainment coefficient — 7; Stopping criterion = 0 (остановка потока до достижения времени моделирования отключена)

и грубообломочную компоненты. Параметры, заданные для каждой фазы, приведены в табл. 1.

Высвобождаемым твердым материалом послужила размытая морена ледника Башкара. Границы зон эрозии определялись при помощи сравнения космических снимков и ЦММ, выполненных до и после прорыва. Анализ разностей ЦММ (Spot-6 от 01.08.17 и Pleiades от 03.09.17) показал, что из озёрной перемычки было вовлечено около 33 тыс. м³ материала, эта величина и была использована при моделировании.

С учетом объемов каждой из фаз (см. табл. 1) итоговая плотность селевого потока составляет порядка 1400 кг/м³, что соответствует водокаменному селю (Виноградов, 1977). Угол внутреннего трения твердой фазы составил 35°, угол базального трения — 20°, турбулентное трение — lg3. Для жидкой фазы задается только один параметр — коэффициент трения жидкости, равный 0.05. Эти параметры были калибровочными.

Время моделирования было ограничено 50 мин., так как за это время модельный поток достигает впадения в р. Баксан. Реальный же селевый поток достиг устья примерно за то же время, после чего он был разбавлен водами Баксана и трансформировался в паводок, прошедший далеко вниз по долине (Kornilova et al., 2021), и размывший запруды

селевого потока из р. Герхожансу в г. Тырнауз. Динамика и вещественный состав паводка существенно отличаются от водокаменного селя, поэтому моделирование селевого потока было ограничено устьем р. Адылсу.

В отличие от предыдущего моделирования, реализация сценария была начата с момента размывания озёрной перемычки Башкаринского озёра, в то время как в исследовании 2018 г. начальный створ был расположен ниже оз. Лапа, где поток набрал весь основной объем (Кидяева и др., 2018). Такое решение помогло смоделировать в том числе выпуск воды из озёрной котловины, и поставить его в зависимость только от морфометрии прорана и гидродинамического напора воды, а не от рассчитанного входного гидрографа, как сделано в более раннем исследовании.

Модернизация программы. Для упрощения установки и запуска g.avafLOW авторами был разработан Docker контейнер, который легко устанавливается и дает возможность программе работать в любой операционной системе (github.com). Оригинальная версия g.avafLOW работает только в Linux и требует от пользователя базовых навыков программирования и работы с терминалом.

Кроме того, была инициирована разработка графического интерфейса. Он существенно облегчит

использование программы и снизит когнитивную нагрузку на пользователя. В оригинальной версии пользователь взаимодействует с терминалом, а текстовые скрипты не проверяются на корректность вводимых данных.

Эти улучшения значительно упрощают процесс работы с g.avaflow, делают его доступным более широкому кругу пользователей. Следующим потенциальным улучшением программы может стать использование всех ядер процессора, что приведет к уменьшению времени моделирования и требуемого объема оперативной памяти.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате моделирования был сформирован водокаменный селевой поток с объемом жидкой компоненты – 830 тыс. м³, и твердой – 310 тыс. м³. За 50 мин. моделируемый поток прошел более 8.5 км по долине Адылсу, немного не дойдя до впадения в р. Баксан. От прорана до УСБ “Джан-Туган” фронт волны паводка добежит за ~1100 сек, или за 18 мин, что соответствует средней скорости 2.3 м/с. Для сравнения, в другом исследовании (Кидяева и др., 2018) фронт волны паводка добежит до УСБ «Джан-Тугана за 15–20 мин, что соответствует скорости 2–2.5 м/с. Согласно (Petrakov et al., 2012) время добегания селевого потока до УСБ “Джан-Туган” составляет примерно 15 мин., а до устья – 30 минут (табл. 2).

Максимальная скорость потока составляет 27 м/с и наблюдается на участке от ледникового грота до впадения потока в оз. Лапа, где поток движется по крутому языку ледника. На протяжении остального пути скорости не превышают 14–18 м/с

(рис. 2). Осреднённая максимальная скорость потока на всем участке пути составляет 6 м/с. Замедление потока наблюдается на наиболее пологих и широких участках русла, например, перед альплагером УСБ “Джан-Туган”, где скорость потока в среднем составляет всего 2–3 м/с. При сужении русла скорости потока и его эродирующая способность значительно возрастают, как, например, чуть ниже УСБ “Джан-Туган” (максимальная скорость до 15 м/с) или у альплагеря “Шхельда”, ниже моста через р. Адылсу (17 м/с). Распределение максимальных скоростей совпадает с зонами интенсивной боковой и донной эрозии.

Для сравнения, в предыдущем исследовании (Кидяева и др., 2018) максимальная скорость потока возле УСБ “Джан-Туган” составляла 9 м/с, а перед мостом – 6 м/с. В работе (Kornilova et al., 2022) максимальные скорости течения у альплагеря “Шхельда” составили 11–15 м/с, в районе морены малого ледникового периода (12 м/с). Данные скорости хорошо соотносятся со значениями, рассчитанными в ходе данной работы (см. табл. 2). Согласно (Petrakov et al., 2012), максимальная скорость движения селевого потока составляла около 13 м/с. Некоторое превышение полученных автором скоростей над значениями прежнего моделирования можно, вероятно, объяснить более низкой плотностью потока (общая плотность 1400 против 1800 кг/м³) (Petrakov et al., 2012). Крайне высокие рассчитанные скорости течения в районе прорана можно объяснить возникновением на озёре селевой волны от прорывного импульса с ледника, как отмечено в статье (Докукин и др., 2020).

На выположенной широкой поверхности русла перед УСБ “Джан-Туган” глубина потока в среднем составляет 2–3 м, но в месте сужения русла

Таблица 2. Сравнение рассчитанных характеристик потока с результатами предыдущих модельных оценок

		Данная работа	(Кидяева и др., 2018)	(Petrakov et al., 2012)	(Kornilova et al., 2022)	(Черноморец и др., 2018)
		r.avaflow	RAMMS Debrisflow	FLO-2D	STREAM 2D + ECOMAG	Фактические сведения
Время добегания до контрольной точки (мин)	УСБ “Джан-Туган”	18	15–20	15	–	–
	а/л “Шхельда”	24	–	–	–	~20
	Устье	50	<60	30	–	–
Скорость (м/с)	УСБ “Джан-Туган”	10	9	–	–	–
	а/л “Шхельда”	17 (ниже моста)	6 (перед мостом)	–	11–15	–
	$v_{\max}$	18	–	13	16–18	>5.3
	$v_{\text{ср}}$	6	–	–	–	6
Глубина в контрольной точке (м)	УСБ “Джан-Туган”	7	8	< 9	–	–
	а/л “Шхельда”	12	6	< 9	–	> 8

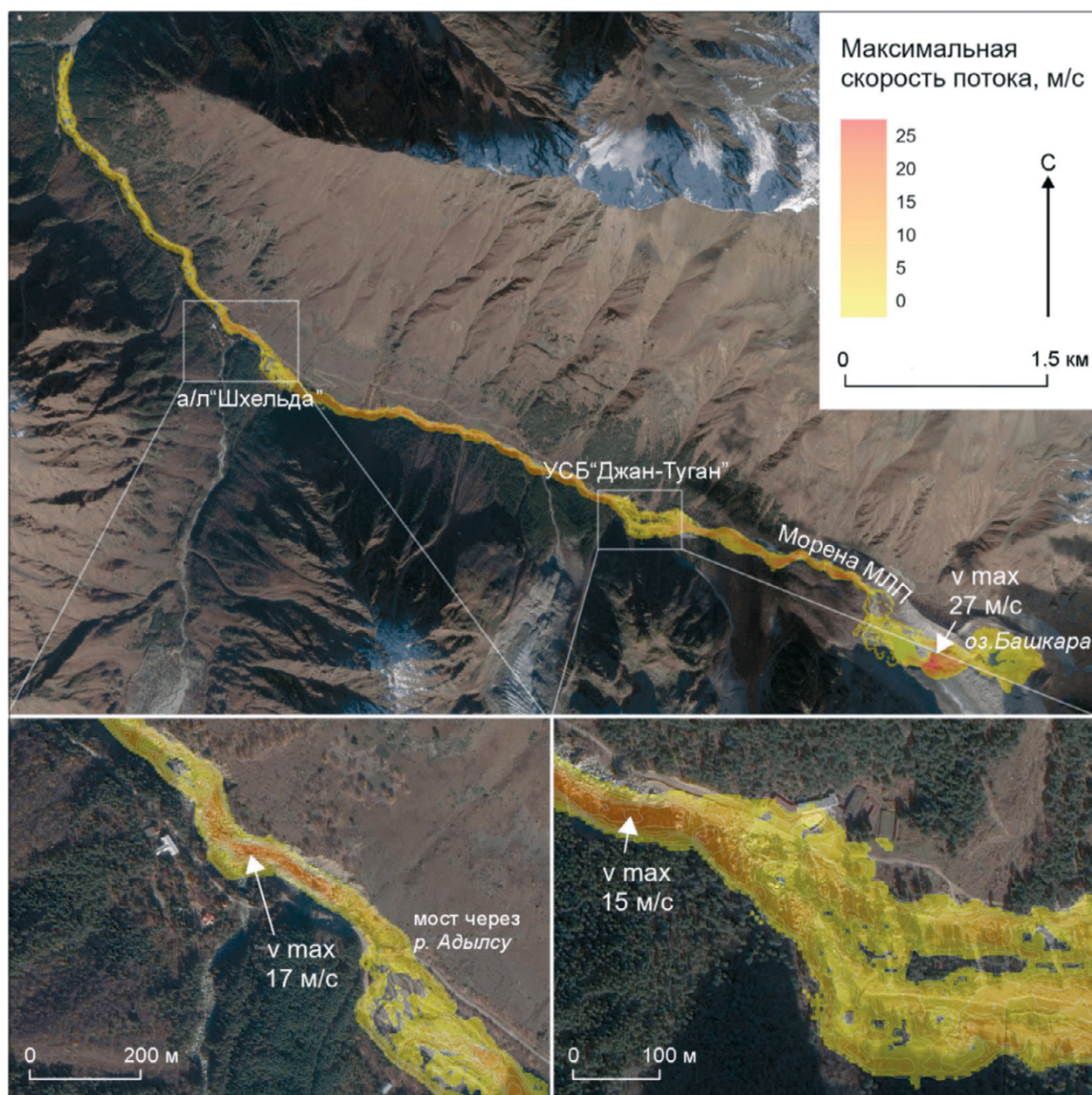


Рис. 2. Максимальная скорость потока при моделировании прорыва оз. Башкара в программе r.avaflow

Fig. 2. Maximum flow speed during the simulation of Lake Bashkara outburst in the r.avaflow program

увеличивается до 7 м (рис. 3). В районе альплагеря “Шхельда” максимальная глубина потока достигает 12 м. Наблюдается такая величина чуть ниже моста, в узком каньоне, откуда в поток вовлекался твердый материал. Во время прорыва озёра 1 сентября 2017 г. здесь наблюдалась крайне активная боковая и донная эрозия.

В то же время в исследовании (Кидяева и др., 2018) глубина потока у УСБ “Джан-Туган” составляет 8 м, а у “Шхельды” 6 м, что вдвое меньше смоделированного нами значения. Причина такого

превышения полученного значения кроется в вовлечении большого количества твердого материала с бортов русла. Стоит отметить, что из-за крутых бортов долины увеличение объема потока за счет вовлечения нового материала практически не отражается на ширине потока и конфигурации зоны поражения, а влияет только на скорость потока, его глубину и давление.

Максимальная кинетическая энергия потока характерна для центральной части русла. В районе прорыва, где поток набирает наибольшую скорость,

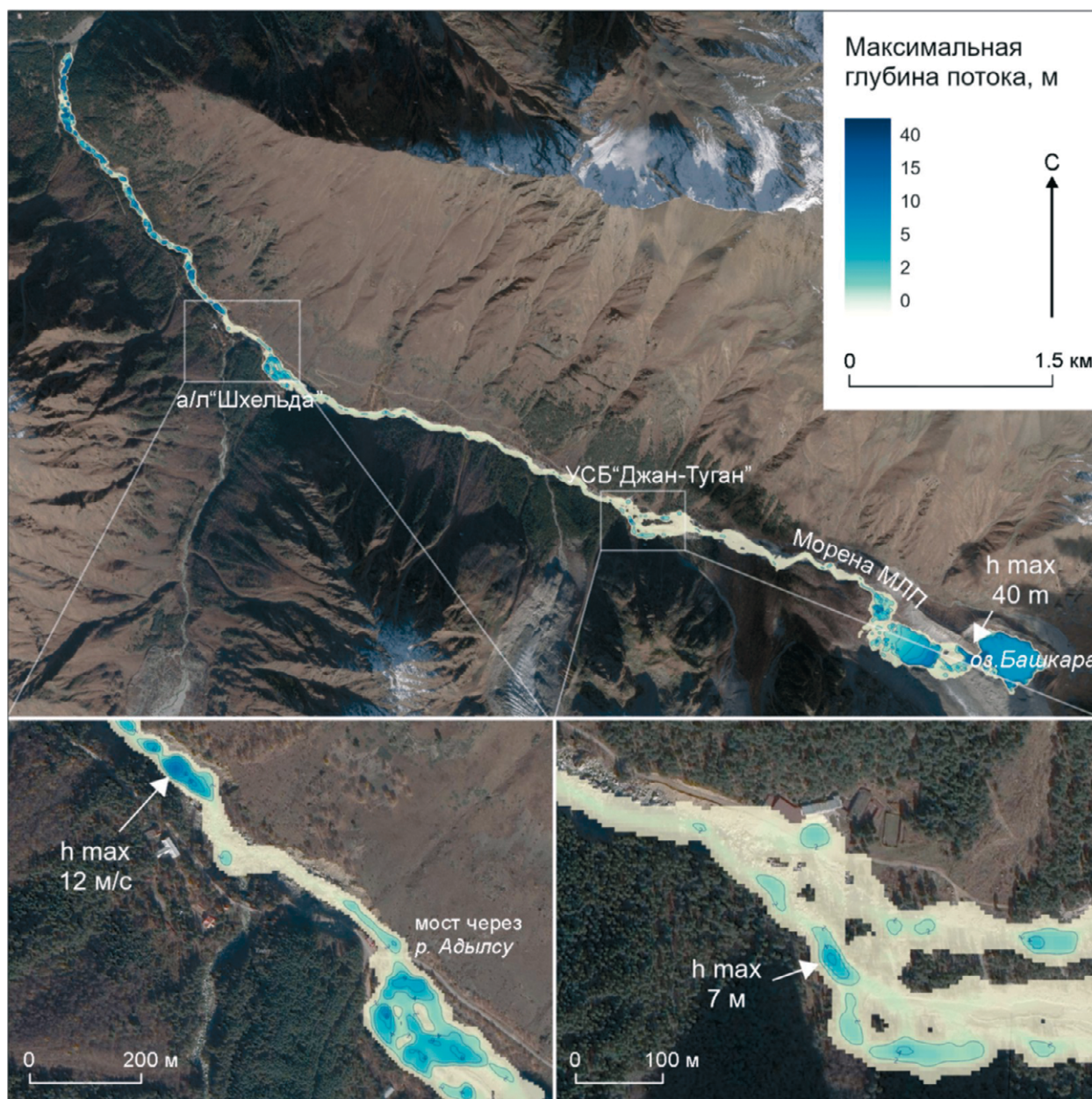


Рис. 3. Максимальная глубина потока при моделировании прорыва оз. Башкара в программе r.avaflow

Fig. 3. Maximum flow depth during the simulation of Lake Bashkara outburst in the r.avaflow program

размывая при этом моренную перемычку оз. Башкара, максимальная кинетическая энергия потока достигает 3 МДж (рис. 4). В каньоне морены малого ледникового периода кинетическая энергия потока достигает значения 200 кДж, в зоне промежуточной аккумуляции перед УСБ “Джан-Туган” – около 22 кДж, перед альплагером “Шхельда” – 15 кДж. При движении потока в узких каньонах, например, ниже моста через Адылсу, кинетическая энергия возрастает до 170–200 кДж.

В районе устья на фоне снижения уклонов долины снижается до 30–40 кДж.

Прослеживается сильная положительная корреляция величины кинетической энергии со значениями давления потока ($R = 0.82$ по 100 произвольным точкам). Вовлечение в поток материала происходит при кинетической энергии, превышающей 30–40 кДж. При меньших значениях процесс эрозии сменяется на транзит и аккумуляцию (см. рис. 4). Скорость потока на участках русла, для которых более характерны аккумулятивные

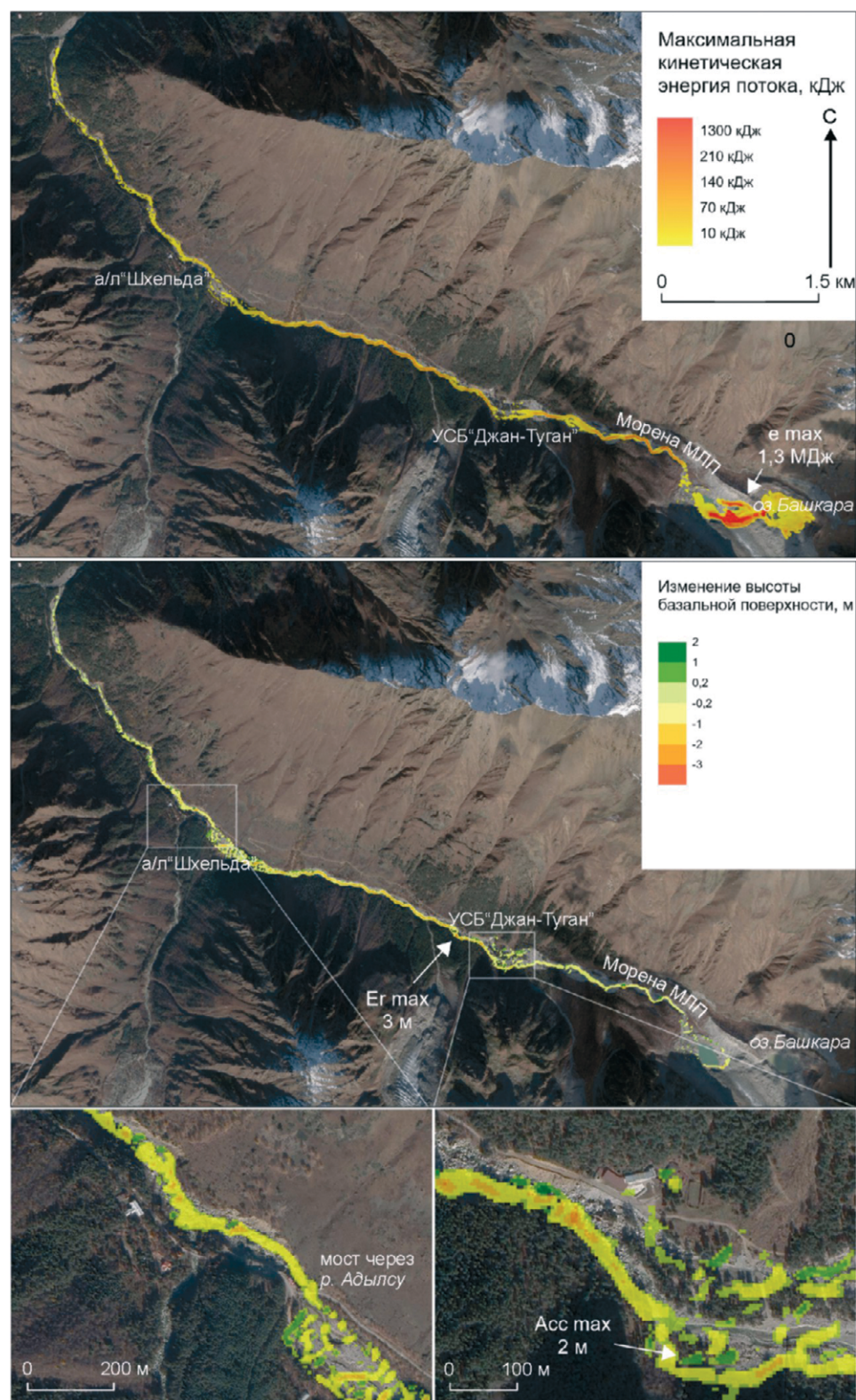


Рис. 4. Максимальная кинетическая энергия потока, изменение высоты базальной поверхности при моделировании прорыва оз. Башкара

Fig. 4. Maximum kinetic energy of the flow, change in the height of the basal surface during the simulation of Lake Bashkara outburst

процессы, не превышает 3–4 м/с. При этом уклон русла составляет не более 5°. Отложение селевых масс зачастую наблюдается при столкновении потока с препятствиями в русле или бортами долины.

Согласно полученной схеме изменения высоты поверхности, практически на всем протяжении русла в центральной его части наблюдается понижение его дна на глубину от 0.1 до 1 м. Также в результате моделирования можно выделить две промежуточные зоны аккумуляции — перед альплагерем “Шхельда” и УСБ “Джан-Туган”, где высота отложенного материала достигает 0.8 и 1.7 м соответственно. Основная зона аккумуляции выделяется возле устья Адылсу на фоне снижения уклонов русла и кинетической энергии потока.

Эрозия наблюдается в русле практически повсеместно — центральная часть русла понизилась в долине в среднем на 0.1–1 м. Максимальная высота вовлечения твердого материала составила 3.2 м, наблюдается подобная величина в среднем

течении Адылсу, между устьями ручья Кашкаташ и р. Шхельда. Для центральной части русла между этими водотоками характерна эрозия, в то время как для боковых частей потока — аккумуляция материала. Максимальная высота аккумуляции материала (1.8 м) характерна для зоны промежуточной аккумуляции возле УСБ “Джан-Туган” и для приустьевой зоны р. Адылсу.

К зоне транзита можно отнести области с небольшими изменениями высоты, примерно от 0.2 до –0.2 м. Подобные участки присутствуют на всем протяжении долины, поэтому четко оконтурить зону транзита по результатам моделирования затруднительно.

Поскольку признаки исследуемого прорыва до сих пор хорошо читаются в рельефе, они были использованы для верификации результатов. На рис. 5, б представлено поле промежуточной аккумуляции чуть выше УСБ “Джан-Туган”, на котором распространены множественные селевые валы

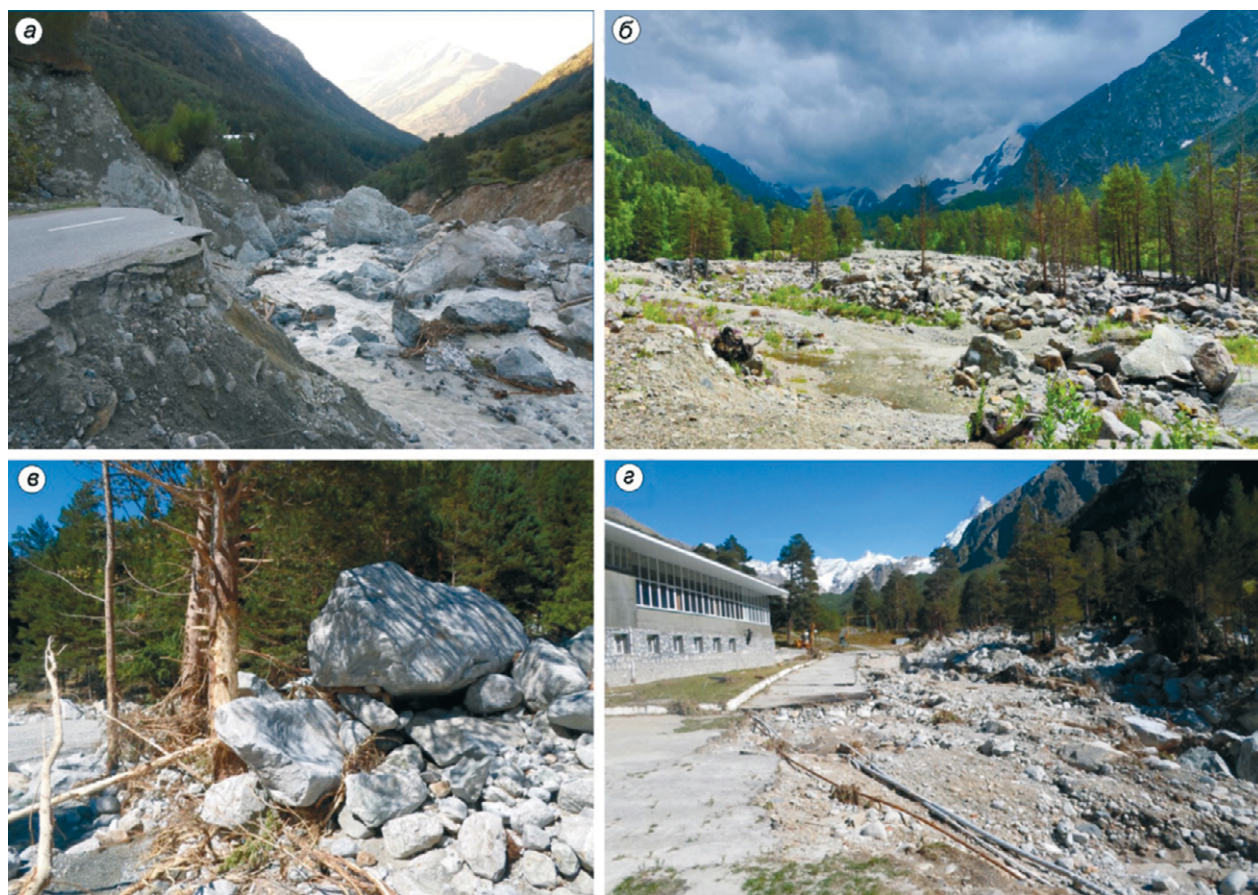


Рис. 5. Зона сильнейшей донной и боковой эрозии ниже моста через Адылсу (а) и возле УСБ “Джан-Туган” (г). Фото от сентября 2017 г. (Черноморец и др., 2018); Зона промежуточной аккумуляции (б) и отложения селевого потока во взрослом лесу (в) перед УСБ “Джан-Туган” (фото А.С. Солодовой, август 2022 г.)

Fig. 5. Zone of strongest bottom and lateral erosion below the bridge over Adyl–Su (a) and near the Jantugan alpine camp (г) in September 2017 (Chernomorets et al., 2018); Zone of intermediate accumulation (б) and debris flow deposits in the mature forest (в) in front of the Jantugan alpine camp (author’s photo made in August 2022)

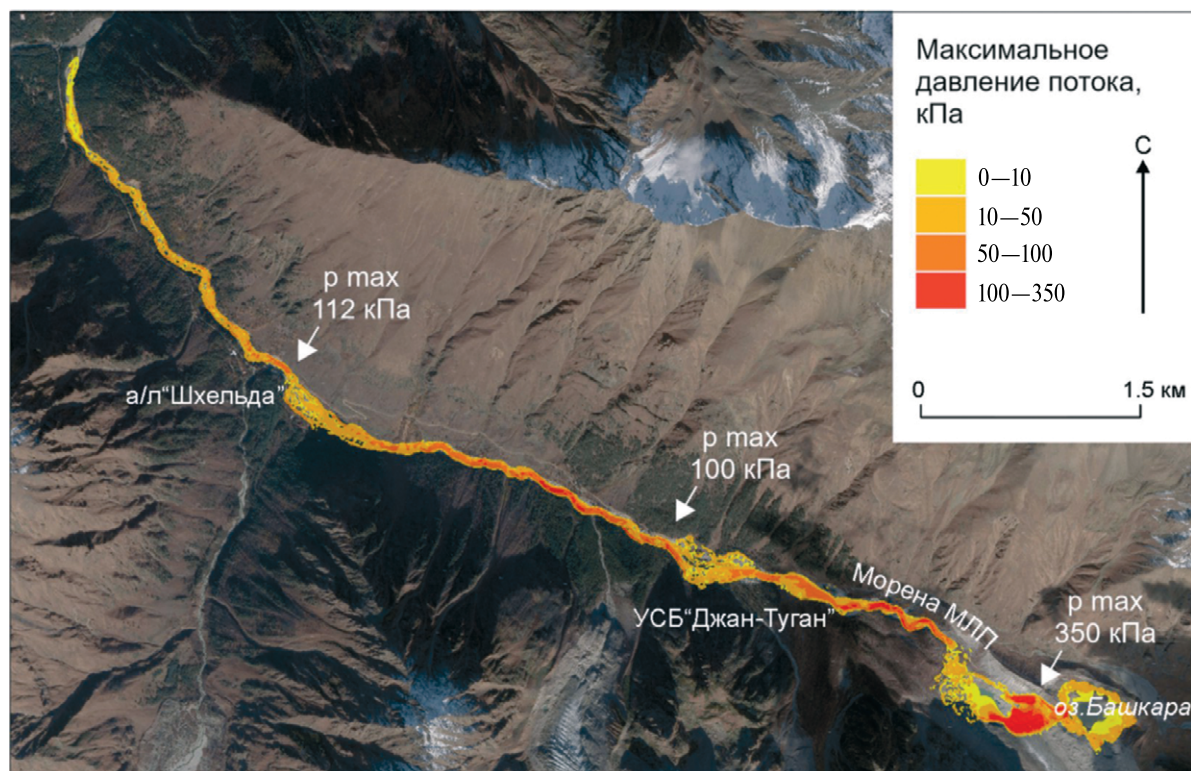


Рис. 6. Максимальное давление потока при моделировании прорыва оз. Башкара

Fig. 6. Maximum flow pressure during the simulation of Lake Bashkara outburst

и гряды высотой около 2 м. Рассчитанные значения аккумуляции материала в этом месте составили 1.8 м. В районе промежуточного поля аккумуляции перед УСБ “Джан-Туган” рассчитанный селевой поток заходит во взрослый лес, как в середине русла, так и по его краям. При сходе прорывного паводка 2017 г. в этом месте был разрушен палаточный городок. В лес были вынесены глыбы до 2 м диаметром, сформированы селевые прочесы и гряды (см. рис. 5, в). Рис. 5, а–г – иллюстрация интенсивной донной и боковой эрозии, наблюдавшейся ниже моста через Адылсу и возле УСБ “Джан-Туган”. Результаты моделирования тоже показывают наличие интенсивной эрозии в этих местах. Опираясь на рассчитанные значения, выяснено, что поверхность русла в этом месте понизилась в среднем на 1 м, достигая местами 3 м. Однако возле УСБ “Джан-Туган” в модели сформированы селевые заплески, которые не наблюдались при сходе селевого потока 2017 г.

Максимальное рассчитанное давление потока отмечается при впадении потока в оз. Лапа и составляет 350 кПа. На остальном протяжении пути давление в среднем не превышает 30 кПа на относительно пологих участках, где русло расширяется и скорости течения снижаются. В узких частях долины, например, чуть ниже альплагеря “Шхельда”

и УСБ “Джан-Туган”, максимальное давление потока превышает 100 кПа (рис. 6).

Потенциальный разрушительный эффект в зависимости от давления селевых потоков и снежных лавин описан в работе (Muzychenko et al., 2023). Поток с давлением менее 100 кПа может разрушить деревянное здание, снести молодое дерево или автомашину, с давлением 100–1000 кПа – способен повалить старый лес и разрушить каменные сооружения и металлоконструкции. Давление более 1000 кПа приводит к разрушению железобетонных сооружений. Смоделированный поток на большей части своего пути способен разрушить деревянное здание или автомашину, и лишь возле прорана, в узких каналах ниже УСБ “Джан-Туган” и моста через Адылсу может повредить каменные сооружения и металлоконструкции в русле. Именно в этих узких местах в русле отмечаются особо крупные глыбы с диаметром до 7 м. В силу недостаточного давления, железобетонные сооружения смоделированный поток, как и реально сошедший, разрушить не способен. Это подтверждается существованием в русле бетонных стенок (в районе моста), которые выдержали разрушительное воздействие прорывного паводка 2017 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был смоделирован водокаменный селевой поток с объемом жидкой компоненты — 830 тыс. м³, и твердой — 310 тыс. м³. Не весь изначально заданный материал пришел в движение. Конфигурация зоны селевой опасности, значения глубины, скорости течения, и соответственно, времени добегания потока до разных контрольных точек хорошо коррелируют с данными предыдущих исследований (Petrakov et al., 2012; Кидяева и др., 2018; Kornilova et al., 2022) и результатами полевых наблюдений. За счет вовлечения твердого материала рассчитанные значения скорости течения и глубин несколько возросли относительно предыдущих оценок. Кроме того, в данной работе впервые было рассчитано давление и кинетическая энергия потока для различных участков русла, а также оценена величина эрозии и аккумуляции материала. Применение моделирования с учетом жидкой и твердой составляющих позволило уточнить имеющиеся сведения о динамике прорывного селя 2017 г.

Апробированная модель, *r.avaflow*, может быть применима в условиях Приэльбрусья для оценки динамики и зон поражения водокаменных селевых потоков прорывного генезиса. Применение двухфазной модели, интегрированной с ГИС, может способствовать более глубокому пониманию и эффективному управлению рисками, связанными с прорывами ледниковых озёр и прохождением водокаменных селевых потоков, поэтому в будущем освоение модели, прежде не использовавшейся на территории России, продолжится. Выполненные в ходе работы усовершенствования программы в виде автоматизации процесса установки и разработки графического интерфейса значительно упростят процесс работы с *r.avaflow* и сделают модель доступной широкому кругу пользователей.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы НИР географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова 121051100164–0 “Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии”. Авторы выражают благодарность сотруднице кафедры криолитологии и гляциологии Алле Сергеевне Турчаниновой за ценные советы и конструктивные замечания по данной работе. Авторы также благодарят сотрудника Института географии и регионоведения Университета г. Грац (Австрия) Мартину Мергили за помощь в освоении модели *r.avaflow*.

Acknowledgements. This work was conducted with the support of the state-funded research theme of the Faculty of Geography at Lomonosov Moscow State University 121051100164–0 “Evolution of the Cryosphere under Climate Change and Anthropogenic Impact”. The authors express their gratitude to Alla Sergeevna Turchaninova, a staff member of the Department of Cryolithology and Glaciology, for her

valuable advice and constructive comments on this work. The authors also thank Martin Mergili, a staff member of the Institute of Geography and Regional Science at the University of Graz (Austria), for his assistance in mastering the *r.avaflow* model.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. Вып. 155. С. 4.
- Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Условия и механизмы прорывов Башкаринских озёр в долине р. Адыл-Су (Центральный Кавказ) // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. 2020. С. 369–375.
- Дубинский Г.П., Снегур И.П. Физико-географические особенности верховьев р. Баксан и метеорологические наблюдения на леднике Башкара // Материалы Кавказской экспедиции (по программе МГГ). Т. III. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1961. С. 215–285.
- Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Алейников А.А., Штоффел М., Граф К. Опыт моделирования прорыва Башкаринских озёр // Геориск. 2018. Т. 12. № 2. С. 38–47.
- Кюнж Ж.А., Холли Ф.М., Вервей А. Численные методы в задачах речной гидравлики. М.: Энергоатомиздат, 1985. Вып. 252.
- Лаврентьев И.И., Петраков Д.А., Кутузов С.С., Коваленко Н.В., Смирнов А.М. Оценка потенциала развития ледниковых озёр на Центральном Кавказе // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 343–360. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030044>
- Петраков Д.А., Черноморец С.С., Докукин М.Д., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Запороженко Э.В., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Савернюк Е.А., Смирнов А.М., Рец Е.П., Хаджиев М.М. Прорыв озёра Башкара и катастрофический селя в Приэльбрусье 1 сентября 2017 г // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. 2017. С. 95–97.
- Пуганов К.А. *r.avaflow* WEB application // <https://github.com/kostyanp95/r.avaflow> Дата обращения: 10.04.2024.
- Сейнова И.Б. Селевые процессы бассейна р. Баксан в последнем тысячелетии (Центральный Кавказ). М.: ВИНТИ. 1997. 295 с.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. 2021. Т. 61 № 3. С. 341–358. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>

- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Капов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озёра Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Крыленко И.В., Тарбева А.М. Динамика ледниково-озёрного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адылсу // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 1. С. 72–84.
- 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; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ РФ 08.12.2022.
- Coussot P., Laigle D., Arattano M., Deganutti A., Marchi L. Direct determination of rheological characteristics of debris flow // Journ. of Hydraulic Engineering. 1998. V. 124. № 8: P. 865–868.
- Domnik B., Pudasaini S.P., Katzenbach R., Miller S.A. Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows // Journ. of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2013. V. 201. P. 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2013.07.005>
- Fischer J.T., Kowalski J., Pudasaini S.P. Topographic curvature effects in applied avalanche modeling // Cold Regions Science and Technology. 2012. V. 74. P. 21–30.
- Harrison S., Kargel J.S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R. A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilímek V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods // The Cryosphere. 2018. V. 12. № 4. P. 1195–1209.
- Iverson R.M., Denlinger R.P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory // Journ. of Geophys. Research: Solid Earth. 2001. V. 106. № B1. P. 537–552. <https://doi.org/10.1029/2000JB900329>
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A. Modeling of extreme hydrological events in the Baksan River basin, the Central Caucasus, Russia // Hydrology. 2021. V. 8. № 1. P. 24. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010024>
- Mergili M., Emmer A., Juřicová A., Cochachin A., Fischer J.T., Huggel C., Pudasaini S.P. How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? The 2012 multi-lake outburst flood in the Santa Cruz Valley (Cordillera Blanca, Perú) // Earth surface processes and landforms. 2018. V. 43. № 7. P. 1373–1389. <https://doi.org/10.1002/esp.4318>
- Mergili M., Fischer J.T., Krenn J., Pudasaini S.P. r. avafLOW v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows // Geoscientific Model Development. 2017. V. 10. № 2. P. 553–569. <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-218>
- Muzychenko L.E., Lobkina V.A., Muzychenko A.A. Calculation of Anthropogenic Mudflows Parameters in the Dumps of the Listvenichnyi Quarry (Sakhalin Island) // Russian Journ. of Pacific Geology. 2023. V. 17. № 1. P. 80–89.
- O'Brien J. S., Julien P. Y., Fullerton W. T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // Journ. of Hydraulic Engineering. 1993. V. 119. № 2. P. 244–261.
- Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomoretz S.S., Evans S.G., Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., Seynova I. B. Monitoring of Bashkara Glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst // Natural Hazards. 2012. V. 61. №. 3. P. 1293–1316. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9983-5>
- Pudasaini S.P., Mergili M. A multi-phase mass flow model // Journ. of Geophys. Research: Earth Surface. 2019. V. 124. № 12. P. 2920–2942. <https://doi.org/10.1029/2019JF005204>
- r.avafLOW. The mass flow simulation tool // <https://www.landslidemodels.org/r.avafLOW/> Дата обращения: 10.04.2024.
- Savage S.B., Hutter K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline // Journ. of Fluid Mechanics. 1989. V. 199. P. 177–215.
- Tielidze L.G., Wheate R.D. The greater caucasus glacier inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // The Cryosphere. 2018. V. 12. № 1. P. 81–94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
- Voellmy A. Über die zerstörungskraft von lawinen // Bauzeitung. 1955. V. 73. P. 159–165.
- von Boetticher A., Turowski J.M., Mcardell B.W., Rickenmann D., Kirchner J.W. DebrisInter Mixing–2.3: a finite volume solver for three-dimensional debris-flow simulations with two calibration parameters—Part 1: Model description // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. № 9. P. 2909–2923. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2909-2016>

Citation: Solodova A.S., Petrakov D.A., Puganov K.A. Numerical simulation of debris flow caused by Bashkara Glacier lake outburst flood in 2017. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (4): 527–542. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424040043

Numerical simulation of debris flow caused by Bashkara Glacier lake outburst flood in 2017

A. S. Solodova[#], D. A. Petrakov, K. A. Puganov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[#]*e-mail: annanasiy99@mail.ru*

Received May 19, 2024 / Revised July 12, 2024 / Accepted October 7, 2024

Glacier lake outburst floods (GLOFs) are among the most destructive natural hazards in high mountain areas. Mathematical modeling can help to assess the potential consequences of such outbursts, delineate hazard zones, and calculate characteristics of debris flows and floods. The study is focused on the Lake Bashkara outburst on September 1, 2017, forming a stony debris flow with a total volume of about $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. The availability of extensive data on this outburst allows to simulate the event using the r.avaflow program. The software can account for up to three phases in the flow: liquid, solid and fine solid. In our case the number of phases was reduced to two: liquid and solid. The software utilizes the volume of entrained material, flow parameters, and pre- and post- GLOF Digital Elevation Models (DEMs) obtained by previous researchers. The results were compared with actual data on the outburst and previous numerical simulations. The limits of the debris flow hazard zone, depth values, flow speeds (averaging 6 m/s), and travel time to different control points correlate well with previous simulations and eye-witness estimates. Due to the involvement of solid material, the calculated values of flow speed and depth increased slightly comparatively to previous estimates. This work is the first attempt to calculate the pressure and kinetic energy of the flow for different sections in the channel, and to assess the amount of eroded and accumulated material, changed the terrain after the GLOF. The obtained inundation zone almost replicates the observed boundaries delineated using post-GLOF Pleiades image on September, 3. The tested model, r.avaflow, can be applied in the Mt. Elbrus region to assess the dynamics and impact zones of stony debris flows initiated by lake outbursts.

Keywords: glacier lake outburst flood (GLOF), debris flow, two-dimensional numerical simulation, North Caucasus, Mt. Elbrus region

REFERENCES

- Vinogradov Yu.B. Glacial outburst floods and debris flows. *Glyacial'nye proryvnye pavodki i selevye potoki*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977, 155: 4. [In Russian].
- Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. Conditions and mechanisms of Bashkarinsky lakes outbursts in the Adyl-Su river valley (Central Caucasus). *Sovremennye problemy geologii geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza*. Modern problems of geology, geophysics, and geoecology of the Northern Caucasus. 2020: 369–375. [In Russian].
- Dubinsky G.P., Snegur I.P. Physical geography features of the upper Baksan River valley and meteorological observations at Bashkara Glacier. *Materialy Kavkazskoy ekspeditsii (po programme MGG)*. Data of the Caucasian Expedition within the International Geophysical Year framework T. 3. Kharkov: Izdatelstvo Kharkovskogo Universiteta, 1961: 215–285. [In Russian].
- Kidyaeva V.M., Petrakov D.A., Krylenko I.N., Aleynikov A.A., Stoffel M., Graf K. An experience of modelling the Bashkara lakes outburst. *Georisk*. 2018, 12 (2): 38–47. [In Russian].
- Kyunzh Zh.A., Holli F.M., Verwey A. Numerical methods for river hydraulics. *Energoatomizdat*. Energoatom Publishing. 1985: 252. [In Russian].
- Lavrentyev I.I., Petrakov D.A., Kutuzov S.S., Kovalenko N.V., Smirnov A.M. Assessment of glacier lakes development potential in the Central Caucasus. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (3): 343–360. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030044> [In Russian].
- Petrakov D.A., Chernomorets S.S., Dokukin M.D., Aleynikov A.A., Bekkiev M.Yu., Vishadjieva K.S., Zaporozhchenko E.V., Kalov R.Kh., Kidyaeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.N., Savernyuk E.A., Smirnov A.M., Rets E.P., Khadzhiev M.M. The outburst of the Bashkara glacier lake and the catastrophic debris flow in the Elbrus region on September 1, 2017. *Problemy prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy*. Problems of Predicting Emergencies. 2017: 95–97. [In Russian].

- Puganov K.A.* r.avaflow WEB application. Retrieved from: <https://github.com/kostyanp95/r.avaflow> Last access: April 10, 2024. [In Russian].
- Seinova I.B.* Debris flow processes in the Baksan river basin over the past millennium (Central Caucasus). Moscow: VINITI, 1997: 295 [In Russian].
- Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Ya., Nikitin S.A., Lavrentyev I.I.* New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Ledi Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61 (3): 341–358. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030093> [In Russian].
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleynikov A.A., Bekkiev M.Yu., Vishadjieva K.S., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Kidyayeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.N., Rets E.P., Savernyuk E.A., Smirnov A.M.* The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1. 2017. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2018, 22 (2): 70–80. [In Russian].
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Krylenko I.N., Tutubalina O.V., Aleynikov A.A., Krylenko I.V., Tarbeeva A.M.* Changes of the Bashkara glacier-lake system and assessment of debris flow hazard in the Adyl-Su river valley (Caucasus). *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2007, 11 (1): 72–84. [In Russian].
- Iudina V.A., Iudin N.E., Vinogradova T.A.* Program for calculation of outburst flood and debris flows (FLOVI). Certificate of state registration of the computer program no. 2022683748. 2022.
- Coussot P., Laigle D., Arattano M., Deganutti A., Marchi L.* “Direct determination of rheological characteristics of debris flow.” *Journ. of Hydraulic Engineering*. 1998, 124 (8): 865–868.
- Domnik B., Pudasaini S.P., Katzenbach R., Miller S.A.* Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows. *Journ. of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2013, 201: 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2013.07.005>
- Fischer J.T., Kowalski J., Pudasaini S.P.* Topographic curvature effects in applied avalanche modeling. *Cold Regions Science and Technology*. 2012, 74: 21–30.
- Harrison S., Kargel J.S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R. A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimes J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshi-re A., Regmi D., Vilímek V.* Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*. 2018, 12 (4): 1195–1209.
- Iverson R.M., Denlinger R.P.* Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. *Journ. of Geophysical Research: Solid Earth*. 2001, 106 (B1): 537–552. <https://doi.org/10.1029/2000JB900329>
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A.* Modeling of extreme hydrological events in the Baksan River basin, the Central Caucasus, Russia. *Hydrology*. 2021, 8 (1): 24. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010024>
- Mergili M., Emmer A., Juřicová A., Cochachin A., Fischer J.T., Huggel C., Pudasaini S.P.* How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? The 2012 multi-lake outburst flood in the Santa Cruz Valley (Cordillera Blanca, Perú). *Earth Surface Processes and Landforms*. 2018, 43 (7): 1373–1389. <https://doi.org/10.1002/esp.4318>
- Mergili M., Fischer J.T., Krenn J., Pudasaini S.P.* r.avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. *Geoscientific Model Development*. 2017, 10 (2): 553–569. <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-218>
- Muzychenko L.E., Lobkina V.A., Muzychenko A.A.* Calculation of Anthropogenic Mudflows Parameters in the Dumps of the Listvennichnyi Quarry (Sakhalin Island). *Russian Journ. of Pacific Geology*. 2023, 17 (1): 80–89.
- O'Brien J., Julien P., Fullerton W.* Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journ. of Hydraulic Engineering*. 1993, 119 (2): 244–261.
- 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.* Monitoring of Bashkara Glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst. *Natural Hazards*. 2012, 61 (3): 1293–1316. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9983-5>
- Pudasaini S.P., Mergili M.* A multi-phase mass flow model. *Journ. of Geophysical Research: Earth Surface*. 2019, 124 (12): 2920–2942. <https://doi.org/10.1029/2019JF005204>
- r.avaflow. The mass flow simulation tool. Retrieved from: <https://www.landslidemodels.org/r.avaflow/> Last access: April 10, 2024. [In Russian].
- Savage S.B., Hutter K.* The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journ. of Fluid Mechanics*. 1989, 199: 177–215.
- Tielidze L., Wheate R.* The greater caucasus glacier inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan). *The Cryosphere*. 2018, 12 (1): 81–94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
- Voellmy A.* Über die zerstörungskraft von lawinen. *Bauzeitung*. 1955, 73: 159–165.
- von Boetticher A., Turowski J.M., McArdell B.W., Rickenmann D., Kirchner J.W.* DebrisInterMixing–2.3: a finite volume solver for three-dimensional debris-flow simulations with two calibration parameters—Part 1: Model description. *Geoscientific Model Development*. 2016, 9 (9): 2909–2923. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2909-2016>