DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 5th International Conference

Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018

Editors
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Publishing House "Universal"
Tbilisi 2018

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
5-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г.

Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили

Издательство Универсал
Тбилиси 2018

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე–5 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018

რედაქტორები
ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი

გამომცემლობა "უნივერსალი"
თბილისი 2018

УДК 551.311.8
ББК 26.823

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г. – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. – Тбилиси: Универсал, 2018, 671 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018. – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. – Tbilisi: Publishing House “Universal”, 2018, 671 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე–5 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018. გამომცემლობა "უნივერსალი", თბილისი 2018, 671 გვ. პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი.

Ответственные редакторы С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили
Edited by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Верстка: С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева, Е.А. Савернюк
Page-proofs: S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva, E.A. Savernyuk

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).
Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman’s book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-9941-26-283-8

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი

Моделирование прорыва Башкаринских озер 1 сентября 2017 года

В.М. Кидяева[1,2], Д.А. Петраков[1], С.С. Черноморец[1,5], И.Н. Крыленко[1], А.А. Алейников[1], М. Штоффель[3], К. Граф[4]

[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия, veramkid@gmail.com*

[2]*Институт прикладных экономических исследований РАНХиГС, Центр стратегий регионального развития, Москва, Россия*

[3]*Институт экологических Наук, Университет Женевы, Воздействие изменения климата и риски в антропоцене, Женева, Швейцария*

[4]*Швейцарский Федеральный Институт лесных, снежных и ландшафтных исследований, Бирменсдорф, Швейцария*

[5]*Селевая ассоциация*

В результате прорыва ледникового озера Башкара 1 сентября 2017 г. образовался разрушительный селевой поток. В предыдущих исследованиях было проведено моделирование прорыва озера, однако, фактический сценарий отличался от предполагаемого. Наличие детальных данных о прорыве оз. Башкара позволило провести моделирование селевого потока. Была использована модель RAMMS (автор М. Кристен и др.). Результат моделирования максимально близок к результату схода селевого потока. Была проведена серия экспериментальных расчетов, в результате которых получены зависимости между параметрами потока и шириной потока в разных створах.

прорыв ледникового озера, селевой поток, моделирование, RAMMS

Modelling of the 1st September 2017 Bashkara lakes outburst

V.M. Kidyaeva[1,2], D.A. Petrakov[1], S.S. Chernomorets[1,5], I.N. Krylenko[1], A.A. Aleynikov[1], M. Stoffel[3], C. Graf[4]

[1]*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia, veramkid@gmail.com*

[2]*Institute of Applied Economic Research RANEPA, Center for Regional Development Strategies, Moscow, Russia*

[3]*Institute for Environmental Sciences, University of Geneva, Climate Change Impacts and Risks in the Anthropocene (C-CIA), Geneva, Switzerland*

[4]*Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf, Switzerland*

[5]*Debris Flow Association*

A destructive debris flow was formed as a result of the outburst of the Bashkara glacial lake on September 1, 2017. In previous studies, the lake outburst simulation was performed, however, the actual scenario was different from the expected one. The availability of detailed data on the Bashkara outburst allowed us to perform the debris flow simulation. RAMMS model was used (authors M. Kristen et al.). The result of the

modeling was as close as possible to the result of the real debris flow. A series of experimental calculations was performed, as a result of which dependences between the flow parameters and the flow width in different sections were obtained.

glacial lake outburst flood (GLOF), debris flow, modelling, RAMMS

Введение

Прорыв озера Башкара в долине р. Адыл-Су (Приэльбрусье, Центральный Кавказ) произошел 1 сентября 2017 г. Прорывной паводок трансформировался в разрушительный селевой поток, вследствие схода которого была разрушена дорога и некоторые строения в долине реки Адылсу. Сель вышел в долину р. Баксан и разрушил часть федеральной трассы А-158 Прохладный-Баксан-Эльбрус. Погибли 3 человека. Причиной прорыва озера стали интенсивные осадки, выпавшие на переувлажненный грунт, что привело к нестабильности в озерной системе [*Петраков и др., 2017; Черноморец и др., 2018*].

Прорывы оз. Башкара наблюдались и ранее, озерная система у ледника Башкара считалась опасной последние 15 лет. За это время опубликован ряд работ, посвященных оценки опасности озера, оценена вероятность его прорыва, изучен характеристики озера и нижележащей долины, было проведено моделирование прорывного потока, трансформирующегося в сель [*Гнездилов и др., 2007; Залиханов и др., 2009; Черноморец и др., 2007; Petrakov et al., 2012; Кидяева и др, 2013; и др.*].

Целью данной работы является проведение прогнозного моделирования прорыва оз. Башкара на основе [*Гнездилов и др., 2007; Черноморец и др., 2007; Petrakov et al., 2012*] и моделирование фактического прорыва. Как показали полевые обследования озера и долины после прорыва [*Петраков и др., 2017; Черноморец и др., 2018*], предполагаемые сценарные варианты развития событий оказались неверны, однако основные параметры оценивались правильно – объем воды, характер течения, время добегания, зоны максимального затопления. Сценарные расчеты базировались на предположении, что оз. Башкара будет прорываться через подледный туннель в леднике Башкара, из чего следует невысокий максимальный расход воды, большая продолжительность излива и асимметричность гидрографа [*Гнездилов и др., 2007; Petrakov et al., 2012*]. Фактически – прорывная волна пошла по поверхности ледника Башкара [*Черноморец и др., 2018*], набирая большую скорость и имея крутой подъем.

В задачи исследования входило проведение полевых исследований в долине ниже озера, разработка сценариев развития событий – как прогнозного, так и фактического, подготовка рельефа для целей моделирования, выбор подходящих моделей, подбор необходимых параметров для моделирования, осуществление расчетов, проведение экспериментальных расчетов. Исследование находится в развитии, предстоит построение цифровых моделей рельефа после прохождения селевого потока для калибровки модели и проверки результатов моделирования, а также уточнение параметров скорости размыва грунтов и коэффициентов эрозии.

Объект исследования

Озеро Башкара (рис. 1) прорывалось 4 раза: в августе 1958 и 1959 гг., в октябре 1960 г. [*Сейнова, 1997*] и в сентябре 2017 г. Абсолютные отметки зеркала озера в 1960-х гг. были гораздо выше современных вследствие большей толщины примыкающего ледника и наледникового расположения озера. Как перемычка, так и преобладающая часть ложа озера состояли изо льда. Прорывы 1958, 1959 и 1960 гг. проходили через грот в месте понижения и примыкания ледовой плотины к правобережной морене [*Петраков и др., 2009; Черноморец и др., 2007*], поэтому возможный прорыв озера ожидался в этом же месте. Озеро Башкара – наиболее глубокое в Приэльбрусье, его глубина в 2008 г. достигала 37 м. Озеро относится к типу ледниково-запрудных озёр. Его котловину

частично ограничивает конечно-моренный вал, который возвышается над урезом озера в северной и северо-восточной частях на 40 м, а в наиболее низкой части, на юго-западном участке, 12 – 15 м. Объем озера в 2008 г. превышал 1000 тыс. м^3, в 2012-2015 гг. объем озера был около 800 тыс. м^3.

а б

Рис. 1. Озеро Башкара (а), оз. Лапа (б). Фото Кидяевой В.М., 2009 г.

Озеро Лапа (Нижнее Башкаринское) (рис. 1) подпружено крупнообломочной конечной мореной ледника Башкара. Озеро имеет поверхностный сток воды по глыбовому каскаду высотой до 10 м и ниже растекается по зандровому выполаживанию, где в середине лета образуется мелководный водоем. За период с 2001 по 2016 гг. объем оз. Лапа увеличился в более чем в 10 раз (с 30 тыс. м^3 до 350 тыс. м^3). Больше половины береговой линии оз. Лапа проходит вдоль языка ледника Башкара. Обвалы льда, термокарстовые просадки на дне озера (глубина его достигает до 14 м), наступание и отступание дельты впадающего в озеро ручья, склоновые процессы на берегах приводят к нестабильному состоянию озера.

Учитывая, что ледник Башкара на современной стадии развития быстро отступает, прогнозируется значительное увеличение объема оз. Лапа в будущем. Радиозондирование языка ледника Башкара, проведенное в июне 2010 г. И.И. Лаврентьевым, С.С. Кутузовым, Д.А. Петраковым и Н.Н. Коваленко позволило исследовать подледный рельеф и, следовательно, оценить максимально возможный объем оз. Лапа. По оценкам, при уровне воды озера на отметке 2485 м н.у.м. и объеме 200 тыс. м^3 в 2010 г., объем озера может увеличиться в 2-3 раза и достичь 500 тыс. м^3. На рисунке 2 синей линией показано возможное положение уреза озера при отступании ледника.

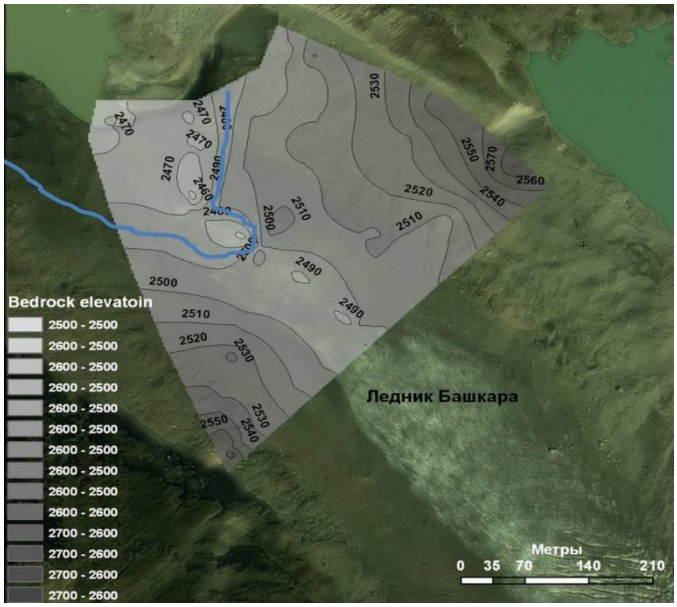


Рис. 2. Результаты геофизической съемки ледника Башкара в июне 2010 г. Синей линией показано положение уреза оз. Лапа при отступании ледника

До событий 2017 г., наиболее вероятным сценарием прорыва оз. Башкара считалось его опорожнение через подледный канал стока [*Гнездилов и др., 2007*]. При расчетах по модели прорыва подпруженного ледником озера Виноградова Ю.Б. [*Виноградов, 1977*] был получен максимальный расход гидрографа 123,5 м^3/с, общий объем прорывного паводка – 764 тыс. м^3 [*Гнездилов и др., 2007*]. Гидрограф гипотетического прорыва характеризовался большой величиной отрицательной асимметрии, что характерно для прорыва озёр по внутриледниковому каналу, с добавлением пиков, образовавшихся в результате размыва нижних Башкаринских озер. Максимальный расход достигал своей величины через 4,5 часа от начала прорыва. Предполагалось, что прорывной паводок преобразуется в селевой паводок с плотностью около 1127 кг/м^3, а максимальный расход достигнет 133 м^3/с [*Гнездилов и др., 2007*]. Моделирование данного сценария прохождения прорывного паводка по участку долины р. Адыл-Су протяженностью около 8 км было проведено в работах [*Норин, Крыленко, 2008; Petrakov et al., 2012*].

Методика исследований

Методика моделирования водных и селевых потоков

В данной работе для расчетов использовались двумерные модели STREAM_2D [*Беликов, Милитеев, 1992*], FLO-2D [*O'Brien et al., 1993*] и RAMMS: DEBRIS FLOW [*Christen et al., 2010*].

Программные комплексы STREAM_2D и FLO-2D основаны на численном решении системы уравнений Сен- Венана в приближении «мелкой воды» [*Кюнж и др., 1985; и др.*]. При решении уравнения для расчета коэффициента Шези используется формула Маннинга, в которой используется параметр n – коэффициент шероховатости.

Для численного решения системы уравнений должны быть заданы граничные и начальные условия. 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 – уровни водной поверхности в пределах расчетного участка на начало расчета.

В отличие от программы STREAM_2D, в программе FLO-2D можно рассчитывать движение селевого потока, основанной на решении уравнений неньютоновских жидкостей.

RAMMS (Rapid Mass Movements) – это программный пакет, который позволяет осуществлять моделирование снежных лавин, селевых потоков и камнепадов. Для моделирования селевых потоков RAMMS использует однофазный подход (аналогичный лавинам, метод Фелми). В гидравлической модели, предложенной А. Фелми [*Voellmy, 1955*], скорость частиц осредняется по нормали к склону, поэтому распределение характеристик потока по толщине потока не рассматривается. Модель не предполагает деформации сдвига. В модели учитываются два параметра: безразмерный коэффициент сухого терния μ и коэффициент турбулентного трения ξ, м/с^2 [*Christen, et al., 2010*].

Входными параметрами для модели RAMMS являются общий объем селевого потока, который может быть задан как гидрографом, так и зоной отрыва, имеющей площадь и глубину, и параметры сопротивления.

Для проведения моделирования с использованием двумерных моделей требуются следующие исходные данные: топографические карты, топографическая съемка участка долины, синтезированная в цифровую модель рельефа (ЦМР), данные о максимальных расходах воды и формах гидрографов. Результаты моделирования представлены в виде плановой картины распределения скоростей течения, уровней водной (селевой) поверхности и глубин воды или селевой массы в пределах расчетной области.

Подготовка данных и построение гидродинамических моделей

Сценарии и параметры модели. В статье рассмотрены два сценария – 1) предполагаемый прорыв оз. Башкара по подледному каналу стока с учетом максимально возможного объема оз. Лапа; 2) фактический прорыв оз. Башкара 1 сентября 2017 г.

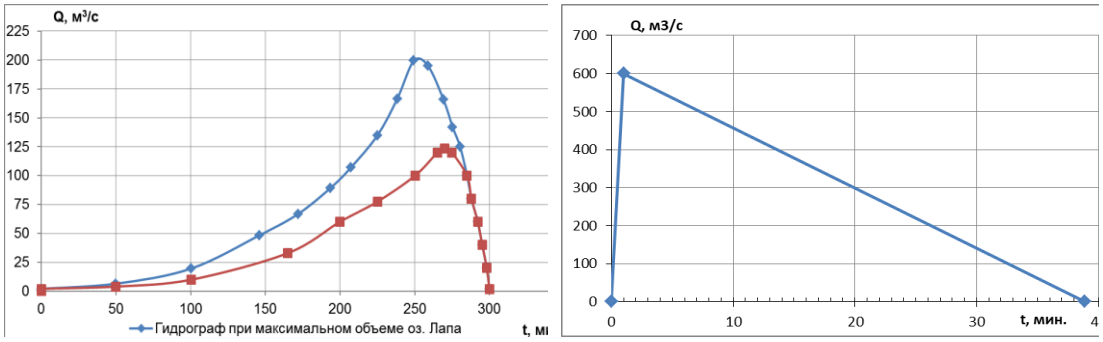
Анализ динамики развития Башкаринских озёр предполагает увеличение объема оз. Лапа до 500 тыс. м^3. Триггером при прорыве оз. Лапа могло стать опорожнение верхнего озера. По нашей оценке, максимальный объем паводка мог составить более 1 млн м^3. При прогнозном моделировании прорыва была задана асимметричная форма гидрографа с пологим подъемом паводка и резким спадом (рис. 3а) [*Гнездилов и др., 2007*]. Максимальный расход составлял 200 м^3/с, наступление максимального расхода происходило приблизительно через 4 ч после начала прорыва.

Фактический прорыв оз. Башкара 1 сентября 2017 г. развивался по другому сценарию. Уровень озера до 2017 г. колебался в районе отметки 2596 м н.у.м., максимальная глубина озера достигала 37 м, максимальный объем достигал 1 млн м^3 в 2008 г. В 2008 г. началась фильтрация воды из озера сквозь стенку перемычки, и образовался сток под язык ледника Башкара. Сток из озера направлен был в грот, образовавшийся в языке Башкаринского ледника, позже сформировался поверхностный перелив с хорошей отмосткой.

Причиной прорыва озера 1 сентября 2017 г. стал аномальный ливень на фоне сильного переувлажнения горных пород. Часть переувлажненных моренных отложений оползло в озеро, перегородив естественный сток из него, начал расти уровень воды, грот в теле ледника не пропустил выросший объем стока, и поток перелился через ледник и пошел по леднику. Объём жидкой фазы потока составил порядка 1,1 млн м^3, основная часть ее, 800 тыс. м^3, была сброшена из озера, в селевой паводок было вовлечено 350-500 тыс. м^3 твердого материала [*Петраков и др., 2017, Черноморец и др., 2018*].

В программе RAMMS для построения входного гидрографа прорыва используется оценка общего объема селевого потока и эмпирические зависимости между общим объемом и максимальным расходом воды [*Rickenmann et al. 1999*]. Для построения гидрографа использовались следующие параметры (рис. 3б):

- объем, W = 700000 м^3;
- максимальный расход воды, Qmax = 600 м^3/с;
- время наступления пика, t1 = 60 с;
- время окончания излива, t2 = 2333 с;
- максимальная скорость течения Vmax = 15 м/с.



а б

Рис. 3. Входной гидрограф для моделирования селевых потоков: а) при максимальном объеме оз. Лапа; б) при фактическом прорыве Башкаринских озёр.

Плотность селевого потока была задана 1100 кг/м^3, что соответствует воднокаменному селю. Коэффициент сухого трения был задан в соответствии с рекомендациями разработчиков программы по тангенсу уклона склона в зоне аккумуляции выше а/л Джантуган μ = 0,107. Был использован средний для селевых потоков коэффициент турбулентного трения, ξ = 1000 м/с^2 [Christen, et al., 2010].

Исходные данные для моделирования.

Рельеф. В качестве исходных данных для расчетов по сценарию предполагаемого прорыва оз. Башкара и оз. Лапа использовалась цифровая модель рельефа, полученная на основе топографической карты 1:25000 1957 г. и адаптированная для цели расчетов в работах [*Норин, Крыленко, 2008; Petrakov et al., 2012*].

В качестве исходных данных для моделирования прорыва озера 2017 г. использовалась цифровая модель местности, полученная по снимку Spot 6 с разрешением 3,2 м (дата съемки 1 августа 2017 г.). Для пойменных территорий была проведена корректировка рельефа с целью убрать растительность (лес и кустарники), которая завышала отметки рельефа. Для этого использовался специальный алгоритм, представленный в программном обеспечении с открытым кодом ГИС Whitebox Geospatial Analysis Tools [*Lindsay, 2014*]. Алгоритм Remove Off-Terrain Objects разработан для создания поверхности земли в ЦМР для городских и сельскохозяйственных ландшафтов, однако, в зимних условиях при отсутствии листвы может применяться и для негустых лесов и кустарников.

Схематизация модельной области. Поскольку при прорыве поток прошел по языку ледника Башкара, затем попал в озеро Лапа и пошел далее по долине, то входной створ для моделирования был расположен на зандровой площадке ниже озера Лапа. Замыкающий створ находился ниже впадения р. Адыл-Су в р. Баксан. Ниже впадения наблюдаемый водокаменный поток продолжал свое разрушительное движение, но его свойства сильно изменились от впадения в большую реку (рис. 4). Ниже слияния целесообразно проводить новый этап моделирования с новыми параметрами.

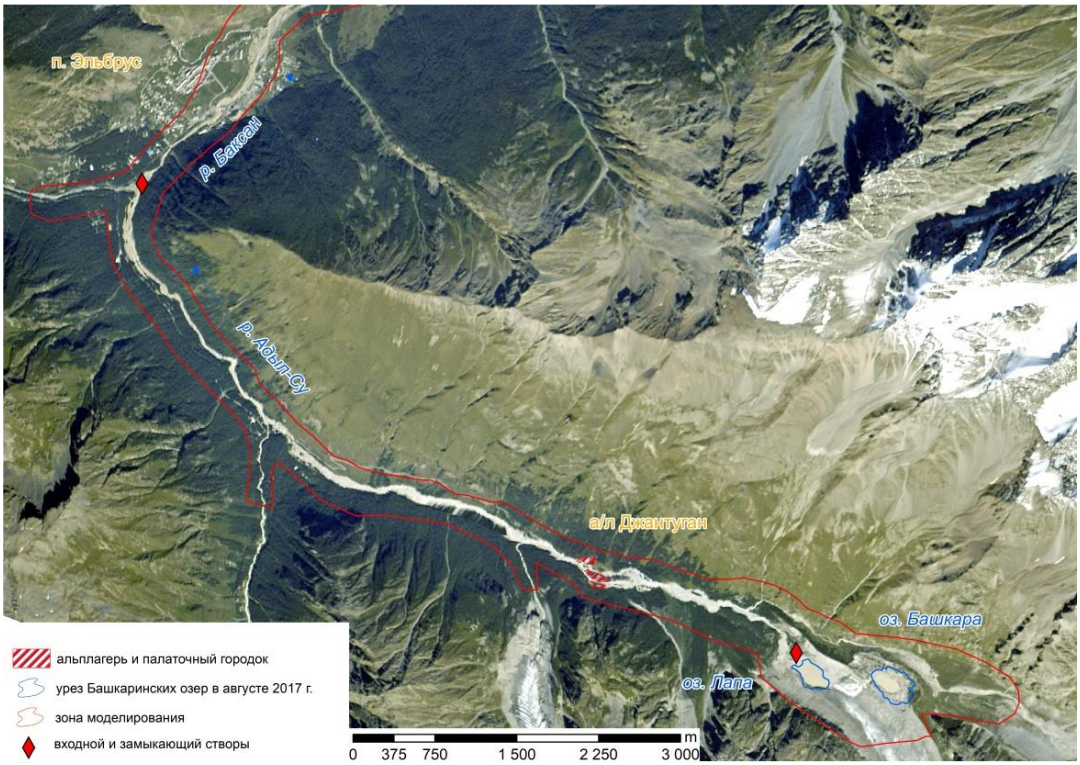


Рис. 4. Зона моделирования, р. Адыл-Су.

Экспериментальные расчеты. Экспериментальные расчеты на основе программного комплекса STREAM_2D для долины р. Адыл-Су были проведены с использованием оптимальных параметров шероховатости для горных долин [*Норин, Крыленко, 2008*]. Была построена зависимость между параметрами потока, морфометрическими характеристиками долины и величиной потенциальной опасности.

Для этого было выбрано 11 контрольных репрезентативных створов-профилей долины (рис. 4). Серия расчетов была проведена для расходов 62, 123,5, 186, 247 м^3/с. Для получения зависимостей для селевого потока с расходом 133 м^3/с (паводок расходом 123,5 м^3/с, с добавлением селевой составляющей) были использованы результаты [*Норин, Крыленко, 2008*].

Результаты

По результатам моделирования для каждого экспериментального створа были определены следующие параметры: площадь живого сечения потока, ширина поймы, средний расход воды, ширина затопления по профилю, средняя и максимальная скорости течения, средняя глубина, средняя удельная энергия потока.

Зависимости между параметрами потока и шириной потока в створе имеют степенной вид (обратные пропорциональные зависимости), что следует из формул расхода воды, площади поперечного сечения и удельной энергии потока [*Сурков, 2010; Крыленко и др., 2018*]. Средняя удельная энергия потока связана с шириной поймы (рис. 5), R = 0,72 для селя и 0,79 - 0,94 для водного потока. Как видно из рисунка 6, средняя удельная энергия селевого потока при ширине поймы около 100 м и меньше достигает уровня катастрофических разрушений P > 171500 кг/с^2 [*Кидяева, 2013*].

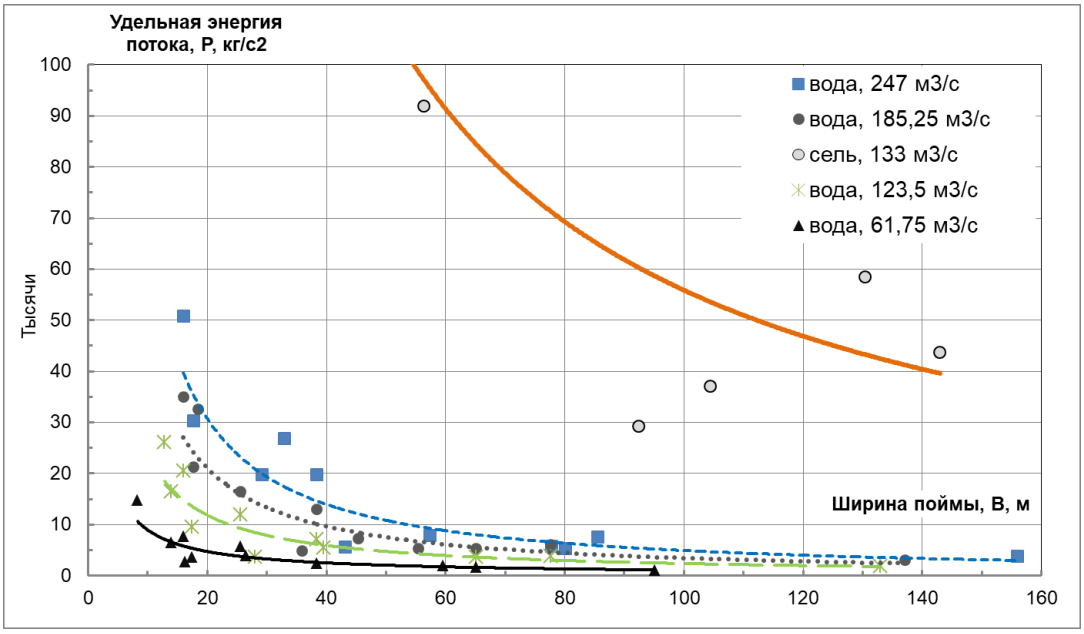


Рис. 5. Зависимость средней удельной энергией потока в створе от ширины поймы для водного и селевого потока.

При прорыве Башкаринских озёр с учетом потенциального объема оз. Лапа максимальное значение расхода, равное 200 м^3/с, будет наблюдаться через 250 минут после начала прорыва. От верхнего створа до альплагеря Джантуган расход добегает за 15-20 минут, что соответствует скорости 2-2,5 м/с. Среднее время добегания от места прорыва до устья р. Адыл-Су менее 1 часа. Гидрограф не трансформируется.

Максимальные глубины в районе альплагеря достигают 8 м, максимальные скорости 9 м/с. Такие характеристики потока у альплагеря соответствуют сильным и катастрофическим разрушениям, особенно на участках врезанного русла, где располагаются мосты, грунтовые дороги, переходы коммуникаций. Все эти объекты инфраструктуры могут быть разрушены.

По результатам моделирования, при прорыве оз. Башкара в 2017 г. время добегания максимального расхода воды до альплагеря Джантуган составило 30 минут. Время добегания до устья р. Адыл-Су составило 1 час 15 минут.

Максимальные глубины затопления у альплагеря достигают 6 м, максимальные скорости течения – 6 м/с. Площади затопления в районе альплагеря по двум сценариям значительно не отличаются благодаря крутым склонам долины.

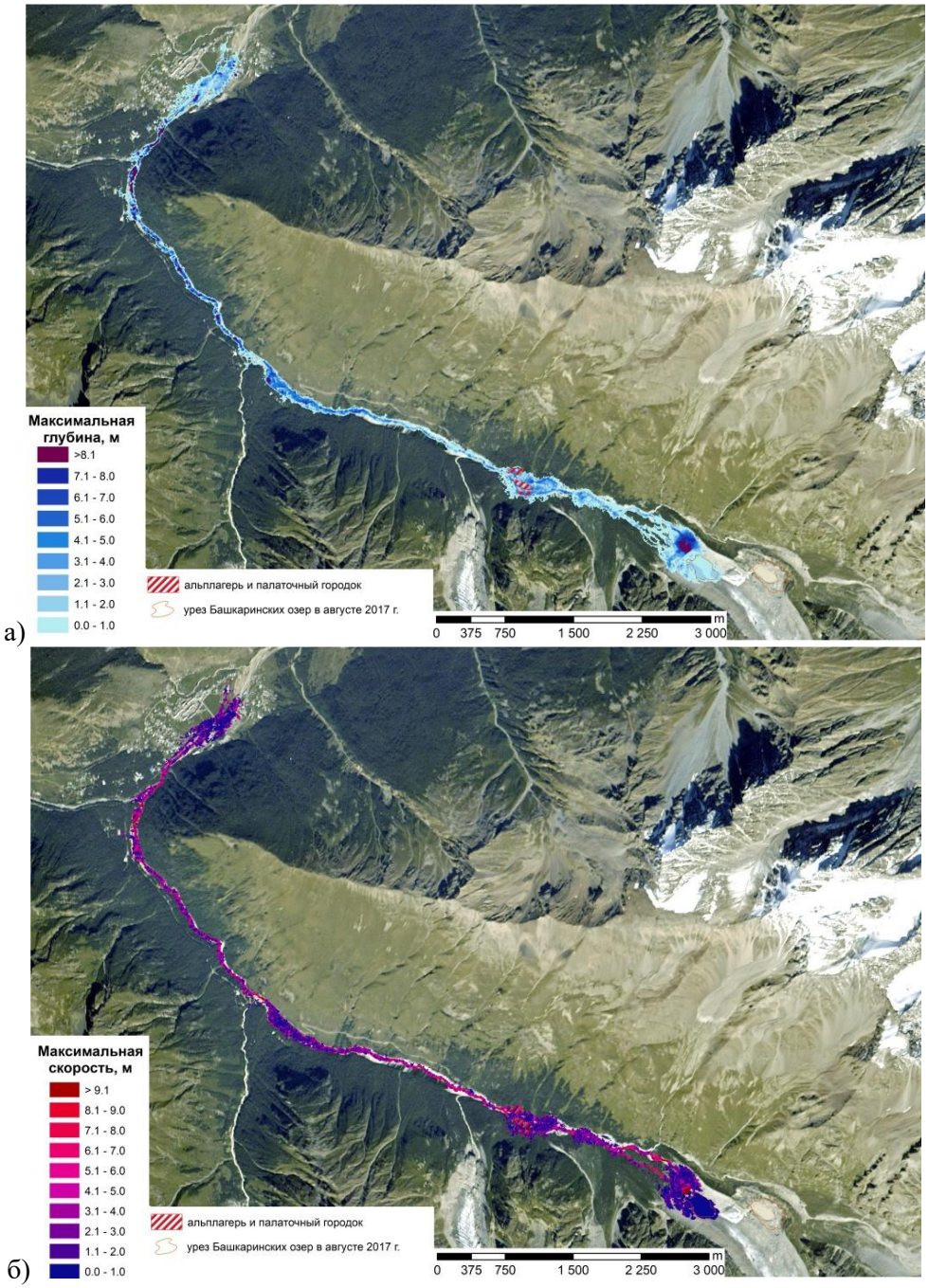


Рис. 5. Максимальная глубина потока (а) и скорость течения (б) при моделировании фактического прорыва оз. Башкара 1 сентября 2017 г. в программе RAMMS.

Дискуссия

В результате моделирования получено отображение прохождения селевого потока по долине р. Адыл-Су в результате прорыва оз. Башкара 1 сентября 2017 г. Использованные при моделировании селевого потока параметры и входной гидрограф позволили получить представление о селевом потоке. Так, вероятнее всего, селевой поток был водокаменного типа, имел скорости в среднем до 6 м/с, плотность около 1100 кг/м^3. Однако, использованные параметры требуют дополнительной калибровки и проверки в ходе полевых исследований. Например, заданная треугольная форма гидрографа несколько завышает результаты моделирования, а коэффициент турбулентного трения необходимо менять в зависимости от условий подстилающей поверхности и преобладающего типа транспорта наносов. Сравнение результатов

моделирования прогнозного и фактического сценариев прорыва показали, что площадь затопления различается незначительно, однако, скорости течения при моделировании фактического сценария ниже, что кажется более вероятным. Также различия в результатах моделирования заложены в свойствах самих моделей. На наш взгляд, моделирование селевого потока в программе RAMMS больше подходит для условий горных территорий, поскольку учитывает крутизну склонов, турбулентность и вязкость потока в горах. Другие модели, разработанные изначально для водных потоков на равнинных территориях, требуют более тщательной калибровки и не могут полностью учитывать горные условия.

Важным этапом будущих работ с программой RAMMS станет моделирование эрозионных процессов при прохождении селевого потока. На практике, необходимо четкое представление об эрозионных процессах в долине, которое можно получить только в результате сравнения двух цифровых моделей рельефа – до и после события, при условии наличия полевых наблюдений. Результатом данной работы станет представление о свойствах эрозионных процессов, типичных для данного бассейна или даже региона.

Полученные результаты экспериментальных расчетов имеют практическое значение для целей моделирования селевых потоков в горах при недостаточности наблюдений. Полученные номограммы можно использовать для зонирования долин горных реки по степени потенциальной опасности при недостатке исходных данных.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект 18-05-00520.

Список литературы

Беликов В.В., Милитеев А.Н. (1992). Двуслойная математическая модель катастрофических паводков. В сб.: Вычислительные технологии, 1(3).

Виноградов Ю.Б. (1977). Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеоиздат, 156 с.

Гнездилов Ю.А., Иващенко Е.Н., Красных Н.Ю. (2007). Оценка гипотетического прорыва озера Башкара. Сборник научных трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства (ОАО «Севкавгипроводхоз»), Пятигорск.

Залиханов М.Ч., Анахаев К.Н., Недугов А.Н. (2009). О селеопасном озере Башкара. Метеорология и гидрология, 2: 89-92.

Золотарев Е.А., Сейнова И.Б. (1997). Катастрофические сели Приэльбрусья за два последних тысячелетия. Материалы гляциологических исследований, 82: 184-189.

Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Крыленко И.В., Петраков Д.А., Черноморец С.С. (2013). Колебания уровня воды горных ледниковых озёр Приэльбрусья. Георискъ, 3: 8–15.

Кидяева В.М. Зонирование опасности в речных долинах при прорыве горных озер. В кн.: Материалы XX Международной молодежной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». МАКС Пресс, Москва.

Крыленко И.Н., Головлев П.П., Корнилова Е.Д., Сазонов А.А., Фингерт Е.А. (2018). Оценка чувствительности характеристик затопления к изменениям природных и антропогенных факторов на основе двумерной гидродинамической модели. Международная научно-практическая конференция «Третьи Виноградовские Чтения. Грани гидрологии». Санкт-Петербург, 908–912.

Кюнж Ж., Холли Ф., Вервей А. (1985). Численные методы в задачах речной гидравлики. М., Энергоатомиздат, 255 с.

Норин С.В., Крыленко И.Н. (2008). Моделирование возможного паводка при прорыве горных озер в долине реки Адыл-Су (Приэльбрусье). Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность. Сборник трудов ИВП РАН, 99-104.

Петраков Д.А., Алейников А.А., Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Норин С.В., Сейнова И.Б., Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Шахмина М.С. (2009). Современная эволюция приледниковых озер в Приэльбрусье (Центральный Кавказ, Россия). В кн.: Снижение риска природных катастроф в горах. Материалы Международной конференции, Кыргызская Республика, г. Бишкек, 69-74.

Петраков Д.А., Черноморец С.С., Докукин М.Д., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Запорожченко 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. (2017). Прорыв озера Башкара

и катастрофический сель в Приэльбрусье 1 сентября 2017 г. В кн.: Материалы 16 Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций», 95–97.

Сейнова И.Б. (1997). Селевые процессы бассейна р. Баксан в последнем тысячелетии (Центральный Кавказ). М., ВИНИТИ, № 9763. В97. 295 с.

Сурков В.В. (2010). Ландшафтообразующая роль русловых и гидрологических процессов в речных долинах. Эрозия почв и русловые процессы, 17: 154-192.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Крыленко И.В., Тарбеева А.М. (2007). Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су. Криосфера Земли, XI(1): 72-84.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. (2018). Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года. Криосфера Земли, XXII(2): 70–80.

Christen M. et al. Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS //Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop September 21-27, 2008. 2008. P. 709.

Christen M., Kowalski J., Bartelt P. (2010). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology, 63(1–2): 1–14.

Lindsay J.B. (2014). The Whitebox geospatial analysis tools project and open-access GIS. Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, 16-18.

O'Brien J., Julien P., Fullerton W. (1993). Two-dimensional water flood, mudflow simulation. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(2): 244–259.

Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyaeva 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(3): 1293–1316.

Rickenmann D. (1999). Empirical relationships for debris flows. Natural hazards, 19(1): 47-77.

Voellmy A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweiz, Bauzeitung, 73(12): 159–162.