

Моделирование прорывов горных озер и селевых потоков в Горно-Бадахшанской автономной области, Таджикистан

Кидяева В.М.¹, Черноморец С.С.¹, Севернюк Е.А.¹, Крыленко И.Н.¹, Докукин М.Д.², Висхаджиева К.С.¹, Бобов Р.А.³, Пирмамадов У.Р.³, Мародасейнов Ф.О.³, Раимбеков Ю.Х.³, Курбонмамадов Д.А.³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, ²ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик, Россия

*³Международная организация Фокус Гуманитарная помощь, Таджикистан
veramkid@gmail.com*

Аннотация: В статье рассмотрены результаты моделирования прорывных паводков и селей, в том числе непрорывного генезиса, в долине р. Гунт и семи долинах-притоках. Для каждой выбранной долины были предложены сценарии возникновения опасных процессов, их триггеры, рассчитаны объемы потоков, максимальные расходы, формы гидрографов, а также оценена вероятность их возникновения (высокая, средняя или низкая). Для долин была адаптирована двумерная модель движения водных и селевых потоков FLO-2D PRO с использованием цифровой модели рельефа ALOS PALSAR (разрешение 12,5 м), данных дистанционного зондирования Земли и полевых материалов. Выполнены сценарные расчеты и получены плановые распределения характеристик затопления (максимальная глубина, скорость течения), рассчитана потенциальная опасность и время добегания. Выявлены объекты инфраструктуры и части населенных пунктов, находящиеся в наибольшей опасности затопления и подверженные возможному разрушению.

Ключевые слова: Горное озеро, прорывной паводок, селевой поток, оценка опасности.

Введение

Проблема исследования прорывоопасных озер и связанных с ними прорывных паводков и селей актуальна для горных территорий, а особенно для заселенных речных долин (Виноградов, 1977; Petrakov et al., 2012; Perov et al., 2017; и другие). Непосредственные измерения высокогорных озер и речных затруднены, поэтому основными методами исследований становятся рекогносцировка, дистанционное зондирование и сценарное гидродинамическое моделирование.

В последние годы актуальность исследования возможности прорывов горных озер завального и ледникового типов в Таджикистане возрастает. Селевой поток, сошедший в долине р. Барсемдара в июне 2015 г. (Черноморец и др., 2015), разрушил и затопил жилые районы, социальные объекты и инфраструктуру с. Барсем и соседних деревень. Русло р. Гунт было смещено к левому берегу и перекрыто селевыми отложениями, в результате образовалось озеро, названное Барсемкуль. Затопление автодороги, соединяющей Таджикистан с Китаем и Киргизией, нескольких мостов и разрушение основной высоковольтной линии подачи электроэнергии от ГЭС Памир-1 привели к большим экономическим потерям в регионе.

Целью исследования было международное сотрудничество в области оценки опасности схода прорывных паводков и селевых потоков на территории Горно-Бадахшанской автономной области в восточной части Таджикистана и анализ негативных последствий этих потоков. Объекты исследования представляют потенциальную опасность для густонаселенных поселений в долине р. Гунт и важных инфраструктурных

объектов, особенно Памирского шоссе, г. Хорога и двух гидроэлектростанций. Объектами исследования стали долина р. Гунт и 7 долин-притоков.

Материалы и методы

Объектами исследования стали долины, в верховьях которых расположены высокогорные озера: р. Шахдара ниже оз. Чандинкуль, Дурумкуль и Зардивкуль, р. Шорипдара ниже группы ледниковых озер, р. Ривакдара ниже оз. Риваккуль, р. Нимацдара ниже оз. Нимацкуль, р. Южный Тогузбулок и р. Тогузбулок ниже оз. Турумтайкуль, р. Упалы ниже оз. Упалы. Долина р. Гунт рассмотрена от впадения р. Тогузбулок до устья на протяжении около 100 км, включая оз. Барсемкуль, которое также представляет потенциальную опасность прорыва.

На ключевых участках горных долин нами проводились полевые обследования. На прорывоопасных озёрах проведены промеры глубин для расчета объема воды. Выполнена оценка возможности схода обвалов и оползней и возникновения волн вытеснения. Выявлены предположительные очаги формирования селей непрорывного генезиса.

В качестве метода исследований было выбрано двумерное математическое моделирование движения водных и селевых потоков на основе программного комплекса FLO-2D PRO (O'Brien et al., 1993). Входными данными при моделировании являлись данные о рельефе и возможные сценарии прорыва горных озер, результатами моделирования – плановое распределение глубин затопления, скоростей течения и потенциальной опасности в горных долинах ниже прорывоопасных озер, а также время добегания. В качестве основных данных о рельефе территории использовалась цифровая модель рельефа ALOS PALSAR с разрешением 12,5 м. Корректировка и дополнительная детализация рельефа в руслах рек проводилась с учетом топокарт и космических снимков высокого разрешения с использованием программы ArcGIS 10.2.

Исходные гидрологические данные для моделирования были представлены в виде гидрографов водного потока на входных границах и фоновых расходов воды в реках. Предварительная оценка максимальных расходов воды при прорыве озер проводилась на основе эмпирических формул (Huggel et al., 2004). Кроме того, учитывались экспертные оценки, данные рекогносцировочных обследований и региональные закономерности.

Для расчета баллов потенциальной опасности использовались полученные на основе моделирования данные о скоростях и глубинах потока в каждой ячейке расчетной области. Ранжирование опасности проводилось по трёхбалльной шкале, применяемой в модуле MAPPER PRO программного комплекса FLO-2D PRO (O'Brien et al., 1993).

Результаты

Результаты моделирования позволили оценить потенциально опасные зоны, выявить уязвимые объекты и оценить время, необходимое для эвакуации населения.

Выше оз. Упалы располагается каскад прорывоопасных ледниковых озёр. Вход прорывного селя в оз. Упалы, по нашей оценке, не приведет к его прорыву, однако в случае большого объема может заполнить котловину озера и пойти дальше вниз по долине. С другой стороны, ниже точки перелива с левого борта возможны обвалы и лавины, которые повысят уровень плотины и могут привести к подъему уровня и увеличению объема воды до 2 млн м³, а затем прорыву. Согласно нашим исследованиям, оз. Турумтайкуль не является прорывоопасным, однако, в долине р. Южный Тогузбулок ниже озера возможно формирование селевых потоков. На участках р. Южный Тогузбулок и р. Упалы рассмотрено прохождение селевых потоков с объемом водной составляющей 1 млн м³, максимальным расходом селя около 350 м³/с. Время добегания селя до р. Тогузбулок из обеих долин будет менее одного часа, максимальный расход в р. Тогузбулок составит около 200 м³/с. При движении по долине р. Тогузбулок паводок трансформируется в водный, расход его у с. Джелонди будет составлять 100 м³/с, что

обусловит опасность затопления до двух баллов. Время добегания до с. Джелонди будет менее 3 ч.

У впадения р. Тогузбулок в р. Гунт максимальный расход паводка будет составлять около 50 м³/с. Максимальный расход ниже по течению не превысит 100 м³/с, пиковые значения расхода будут наблюдаться здесь через 10 ч от момента схода селя. Продолжительность периода с повышенными расходами р. Гунт составит около 10 ч. До с. Вир в 60 км ниже впадения р. Тогузбулок, волна паводка достигнет через 16 ч. Далее расход в р. Гунт будет приближаться к максимальным наблюдаемым расходам половодья. Затопленными оказываются поймы реки, однако многочисленные поселения вдоль р. Гунт расположены выше уровня затопления, возможны лишь последствия для инфраструктуры этих поселений, приуроченной к руслу реки.

Следующая представляющая опасность река Нимацдара впадает в Гунт ниже с. Вир. Плотина озера является достаточно устойчивой, ее разрушение маловероятно. Прорывной паводок возможен в случае землетрясения. При образовании волны из оз. Нимацкуль, время добегания селя объема 500 тыс. м³ с максимальным расходом 200 м³/с до п. Нимац составляет 1 ч, опасность – максимальная. Поселок Нимац будет затоплен частично. При впадении в р. Гунт расход селевого потока будет составлять 160 м³/с. В районе п. Шитам пик селевого потока окажется через 2 ч. В долине р. Нимацдара также возможно формирование селевых потоков гляциального генезиса, начинающихся в долине левого притока, не связанных с прорывом озера. Гляциальный селень объемом 2 млн м³ может полностью затопить п. Нимац, частично п. Шитам и автомобильную дорогу на левом берегу р. Гунт. При этом сценарии рассчитан максимальный балл опасности, п. Нимац затапливается полностью, глубины затопления населенного пункта около 2-3 м, скорости течения 3 м/с, местами до 4 м/с. При впадении в р. Гунт расход селевого потока будет составлять 190 м³/с. В районе п. Шитам пик селевого потока окажется через 2 ч.

Ниже п. Шитам селевые потоки из долины р. Нимацдара трансформируются в водные паводки. При учете среднего многолетнего расхода р. Гунт на этом участке около 70 м³/с и с учетом дальнейшего распластывания паводка в створе п. Дихмиена максимальный расход не превысит 140 м³/с, а в створе плотины ГЭС Памир-1 паводок будет практически не заметен.

Устье р. Ривакдара (левый приток р. Гунт) находится в 7 км выше плотины ГЭС Памир-1. Образование паводка или селя в долине р. Ривакдара в случае падения в оз. Риваккуль обвала маловероятно из-за большой относительной высоты плотины озера над урезом воды. В случае прорыва оз. Риваккуль и полного разрушения плотины объем излившейся воды оценивается в 8 млн м³, максимальный расход прорывного потока может составить 454 м³/с (Коновалов и Рудаков, 2016). Поток трансформируется в селень, в который будет вовлечен материал плотины и дополнительный материал в долине, максимальный расход – около 700 м³/с. По нашим оценкам, подобный сценарий может развиваться в течение длительного периода времени – до 8 часов. Время добегания пика селевого потока до п. Ривак составляет 1,8 ч, потенциальная опасность – максимальная. В створе плотины ГЭС Памир-1 максимальный расход селевого потока окажется через 4,8 ч после прохождения пика на плотине оз. Риваккуль и через 8 ч после начала разрушения плотины озера. В случае реализации этого сценария будет полностью затоплен п. Ривак, частично п. Сижд и автомобильная дорога на левом берегу р. Гунт. Автомобильная дорога выше ГЭС Памир-1 на правом берегу р. Гунт затоплена не будет.

В створе ГЭС Памир-1 максимальный расход селевого потока с учетом расхода воды в р. Гунт составит около 500 м³/с. При условии, что все водопропускные системы закрыты, поток перельется через гребень плотины водохранилища суточного регулирования и заполнит водоем. Развитие данного сценария ниже плотины ГЭС Памир-1 зависит от того, насколько устойчива плотина к разрушению, заполнится ли водохранилище суточного регулирования наносами или его объем будет вовлечен в селевой поток и от других

факторов, требующих дополнительных изысканий и обзора технической документации по ГЭС.

Наиболее опасный объект ниже ГЭС Памир-1 – оз. Барсемкуль. Объем прорывного паводка из оз. Барсемкуль (при незначительном понижении отметки прорана) может составить 800 тыс. м³, максимальный расход излива оценивается в 200 м³/с. Время добегания паводка до центральной части г. Хорог составит 4 ч, максимальный расход воды у г. Хорог составит 172 м³/с. В зоне затопления находится часть дороги и строения в с. Питодашт, строения в с. Сангов на левом берегу реки, автомобильная дорога у с. Бидурд, отдельные строения в восточной части г. Хорог и в западной части у нижнего моста и в устьевой области р. Гунт.

Возможны реализации и других сценариев. При повторном сходе селя из долины р. Барсем, повышение селевого конуса выноса возможно на 5-10 м, а при последующем прорыве озера объем прорывного паводка оценивается в 3 млн м³. Объем селя оценивается в 4,5 млн м³, максимальный расход селевого потока составит 770 м³/с. Селевой поток достигнет центральной части г. Хорог через 2 ч, максимальный расход селя у г. Хорог составит около 550 м³/с. В этом случае разрушению подвержены все мосты через р. Гунт. В зоне затопления находятся строения в с. Бердикобод, Манем, Питодашт, Богев, Даштак, Сангов, Бидурд, жилые дома в восточной части г. Хорог у деривационного канала и в западной части города у нижних мостов, промышленные и хозяйственные строения в устьевой области р. Гунт.

Влияние на устойчивость оз. Барсемкуль может оказать его левый приток, р. Шарипдара, в верховьях которой расположен каскад ледниковых озер. В верховьях р. Шарипдара может образоваться катастрофический сел, аналогичный Барсемскому, объемом 4 млн м³. Время добегания пика селевого потока с максимальным расходом более 600 м³/с до п. Колхозобод составит 0,8 ч. Максимальный расход потока у п. Колхозобод составит 515 м³/с, при этом поселок будет затоплен. Селевой материал может частично занести оз. Барсемкуль в районе п. Колхозобод, осуществить дополнительный подпор оз. Барсемкуль и стать причиной его прорыва. Объем прорывного селевого потока из оз. Барсемкуль, оценивается в 2,2 млн м³, с максимальным расходом 250 м³/с. Поток достигнет центральной части г. Хорог через 3 ч. В случае повышения уровня воды в оз. Барсемкуль, возникает угроза затопления сбросного канала ГЭС Памир-1, увеличится подпор на р. Гунт, что приведет к активизации склоновых процессов.

Непосредственное влияние на г. Хорог могут оказать опасные процессы, происходящие в долине р. Шарипдара, где расположено три высокогорных озера. Прорывные паводки из оз. Дурумкуль и оз. Зардивкуль возможны в случае сейсмической активности в регионе.

Озеро Зардивкуль подпружено плотиной высотой более 50 м, потеря устойчивости которой теоретически возможна, но вероятность этого невелика. Объем прорывного паводка в случае разрушения плотины может составить 300 тыс. м³, максимальный расход излива из озера 65 м³/с. У п. Сежд максимальный расход воды будет наблюдаться через 2.2 ч от начала прорывного паводка и составит 60 м³/с (с учетом базового расхода р. Шахдара).

Прорыв оз. Дурумкуль возможен при падении крупного обвала в озеро. Потенциальный объем прорывного паводка может достигать 500 тыс. м³, максимальный расход излива оценивается в 135 м³/с. Время добегания паводка до п. Сежд – около 1 ч, максимальный расход воды р. Шахдара у п. Сежд составит около 120 м³/с, в наибольшей опасности находятся прирусловые участки и автодорожный мост. Наиболее населенного участка долины р. Шахдара ниже п. Шодж и Дашт пик паводка достигнет через 11.5 ч. На наиболее освоенном участке в нижнем течении р. Шахдара рассчитана низкая опасность на поймах и высокая на прирусловых участках и в руслах.

При прорыве оз. Чандинкуль максимальный объём излива воды оценивается в 2 млн м³, максимальный расход 420 м³/с, время излива – 2ч. Устья р. Чандиндара поток достигнет через 0,8ч, максимальный расход воды составит 390 м³/с. Наиболее населенного участка долины пик паводка достигнет через 7.5 ч. Большинство населенных пунктов вдоль р. Шахдара в нижнем течении расположены на достаточно высоких отметках относительно уреза воды, однако прорывной паводок представляют угрозу для мостовых переходов, автодорог, линий электропередач, водозаборов и любой хозяйственной деятельности на прирусловых участках.

В устьевом створе р. Шахдара волна прорывного паводка достигнет максимума через 10-11ч от момента прорыва оз. Чандинкуль. При катастрофическом сценарии максимальный расход в устье р. Шахдара составит 157 м³/с, что значительно превысит максимальный расход половодья. После впадения в Гунт паводок затопит строения на пойме и в устьевой зоне в г. Хорог.

Дискуссия

Одной из наиболее сложных задач при моделировании прорывных потоков в горах является оценка вероятности прорывов и разработка возможных сценариев опасных событий. При составлении сценариев использовалось, как экспертное мнение специалистов, так и сценарии-аналоги, эмпирические формулы и литературные данные, однако, не исключены большие погрешности при оценке максимальных расходов воды, особенно при наличии недоучтенных опасных геологических процессов в долинах. Расчетные сценарии могут быть уточнены в результате комплекса полевых обследований перемычек горных озер и условий в нижележащих долинах. При оценке вероятности возникновения рассматриваемых сценариев, также довольно сложно оценить все влияющие на опасные процессы факторы. Одной из проблем, с которой столкнулись разработчики, была неточность используемой цифровой модели рельефа и даже грубые ошибки, особенно в прирусловых областях. Полученные в результате сценарного моделирования зоны затопления имеют оценочный характер. Необходимо осуществление комплекса полевых исследований для выявления наиболее уязвимых объектов инфраструктуры, уточнение высотных отметок в пределах населенных пунктов.

Список литературы

- Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 156 с.
- Коновалов В.Г., Рудаков В.А. Дистанционное определение резервного объёма прорывоопасных высокогорных озёр // *Лёд и Снег*, т.56, №. 2, 2016: 235-245.
- Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Бобов Р., Асмаев Н., Мавлоназаров О., Мирмамадов Д., Пирмамадов У., Шафиев Г. Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) // *Международная научно-практическая конференция "Вторые Виноградовские Чтения. Искусство гидрологии"*, 2015: 261-264.
- Huggel C., Haeblerli W., Käb A., Bieri D., Richardson S. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps // *Can. Geotech. J.*, vol. 41, 2004: 1068-1083.
- O'Brien J., Julien P., Fullerton W. Two-dimensional water flood, mudflow simulation // *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 119 (2), 1993: 244-259.
- Perov V.F., Chernomorets S.S., Budarina O.I., Savernyuk E.A., Leontyeva T. A. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events // *Natural Hazards*, 88(1 Supplement), 2017:199–235.
- 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. Monitoring of Bashkara glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst // *Natural Hazards*, 61(3), 2012: 1293-1316.

Modelling of mountain lakes outbursts and debris flows in the Gorno-Badakhshan autonomous region, Tajikistan

Kidyaeva V.M.¹, Chernomorets S.S.¹, Savernyuk E.A.¹, Krylenko I.N.¹, Dokukin M.D.², Viskhadzhieva K.S.¹, Bobov R.F.³, Pirmamadov U.R.³, Marodaseinov F.O.³, Raimbekov Y.H.³, Kurbonmamadov D.A.³

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, veramkid@gmail.com

²Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation,

³Focus Humanitarian Assistance, Tajikistan

veramkid@gmail.com

Abstract: The results of the modeling of outburst floods and debris flows, including non-outburst origin, which can possibly occur in the Gunt River valley and its seven valleys-tributaries are presented in the paper. For each river valley the scenarios of the dangerous processes were developed, including their possible triggers, flow volumes, discharges, forms of hydrographs, and likelihood of their occurrence (high, medium or low). The two-dimensional mathematical model of water and debris flows motion FLO-2D was adapted for the valleys using the digital elevation model PULSAR (12.5 m resolution), remote sensing and field data. The scenario calculations were performed and the spatial distribution of flooding characteristics (maximum depth, flow velocity), hazard levels and lag-time were calculated. Infrastructure facilities and parts of the settlements, which are exposed to flooding and destruction were identified.

Keywords: Mountain lake, outburst flood, debris flow, hazard assessment