

УДК 556.5

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ПРОРЫВНЫХ ПАВОДКОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПРОРЫВАХ МОРЕННЫХ ОЗЕР, НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. А. Распутина, Г. В. Пряхина

*Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7-9,
г. Санкт-Петербург, Россия, lerasputina88@gmail.com*

В работе представлены результаты апробации методики расчета характеристик прорывных паводков, образующихся при прорывах моренных озер, на данных, полученных при проведении физических экспериментов, и на опубликованных данных реальных прорывов моренных озер.

Ключевые слова: прорывы моренных озер; прорывные паводки; математическое моделирование.

ASSESSMENT OF CHARACTERISTICS OF OUTBURST FLOODS FORMED DURING OUTBURSTS OF MORaine-DAMMED LAKES BASED ON MATHEMATICAL MODELLING

V. A. Rasputina, G. V. Pryakhina

*St. Petersburg State University, Universitetskaya embankment, 7-9, St. Petersburg,
Russia, lerasputina88@gmail.com*

The paper presents the results of testing a methodology for calculating the characteristics of outburst floods formed during moraine lakes outbursts, using data obtained during physical experiments and published data from real outbursts of moraine lakes.

Keywords: moraine-dammed lakes outbursts; outburst floods; mathematical modelling.

Водоемы, подпруженные естественными плотинами, широко распространены в районах современного оледенения Земли. Особенностью гидрологического режима таких водных объектов является формирование прорывных паводков в результате разрушения подпруживающей дамбы, которые могут приводить к катастрофическим последствиям. Ввиду того, что организация наблюдений за прорывами затруднена, для их изучения и получения характеристик прорывов применяются методы математического моделирования. В настоящей работе представлены результаты апробации методики расчета характеристик прорывных паводков, которая учитывает два механизма прорыва (образование фильтрационного канала

и перелив воды через гребень плотины) и неоднородный состав морены. Методика разработана авторами [1]. Апробация проводилась на результатах физических экспериментов и реальных случаях прорывов озер.

Настоящая методика расчета основывается на следующих представлениях о формировании прорыва. Длительный высокий уровень воды может стать причиной фильтрации воды через тело моренной перемычки. Просачивание воды через слой грунта приводит к выносу частиц водным потоком, образуя фильтрационный канал в теле плотины. Причем в начальный момент времени скорости потока воды имеют небольшие величины, при которых вымываться могут не все частицы грунта, а только те, чье критическое сдвиговое напряжение меньше сдвигового напряжения воды. И какая доля этих выносящихся водой частиц содержится в моренной перемычке, на эту долю относительно единицы и происходит расширение и углубление фильтрационного канала. Принимается допущение, что канал имеет круглую форму и его формирование происходит в центральной части плотины. В начальный момент времени диаметр канала имеет малое значение. По мере размыва происходит увеличение размеров образовавшегося канала, в результате чего увеличивается его пропускная способность и, соответственно, увеличение расходов воды. При увеличении скоростей потока и скорости эрозии происходит постепенное расширение канала до момента пока диаметр канала не достигнет критического значения, равного $1/5$ от напора воды, так как образованная арка не может выдержать верхний свод грунта [2]. При достижении этого критического значения будет происходить обрушение части моренной плотины, которая находится выше канала, и дальнейший вынос этого обвалившегося грунта потоком воды. После чего расчет осуществляется как для перелива воды. Разрушение перемычки и развитие прорыва происходит сверху вниз неравномерно по причине неравномерного распределения скоростей потока по глубине. Подробное описание методики расчета и основные выражения для расчета характеристик прорывного паводка приведены в [1, 3].

Для апробации математических моделей часто используется метод физического моделирования, так как он позволяет более детально описать процесс прорыва и получить необходимые данные для проверки математических моделей. В связи с этим осуществлен ряд физических экспериментов по прорыву грунтовых дамб, которые проводились силами студентов и сотрудников кафедр Гидрологии суши и Геофизики Института наук о Земле СПбГУ.

Натурный эксперимент (эксперимент № 1) был проведен в июле 2018 г. на Кавказе в прибрежной зоне неоднократно прорывавшегося

озера Башкара [4]. Искусственный водоем был создан в результате перекрытия стока ручья плотиной, которая состояла из моренного материала. Эксперимент уникален тем, что проводился в условиях формирования опасных гидрологических явлений [5].

Физические эксперименты № 2, № 3 и № 4 проводились на экспериментальной установке на территории учебно-научной базы «Приладожская» СПбГУ в 2020, 2021 и 2023 гг. Экспериментальный водоем представлял собой емкость, выполненную из монолитного поликарбоната размерами 1×1×1.5 м, состоящую из двух отсеков. Расходы воды через проран по результатам экспериментов определялись по изменению объемов воды во времени. Для оценки сходимости рассчитанных по модели и полученных в результате эксперимента гидрографов использован коэффициент Нэша-Сатклиффа (NS). В общем случае моделирование признается удовлетворительным при $NS > 0.5$. В качестве примера приведем результаты экспериментов с наилучшим, удовлетворительным и наихудшим значениями NS (размеры дамб и характеристики грунтов представлены в табл. 1).

Таблица 1

Характеристики экспериментальных плотин и водоемов

№ п/п	1 эксперимент (натурный)	2 эксперимент	3 эксперимент	4 эксперимент
Грунт	Моренный грунт	Супесь	Супесь	Супесь
Уд. вес грунта/ % глины	2630 / 5 %	2730 / 16 %	2590 / 6.9 %	2610 / 7.7 %
Высота, м	0.17	0.2	0.35	0.16
Толщина по по- дошве, м	0.4	0.46	0.71	0.7
Длина по гребню, м	1.2	1	1	1
Ширина гребня, м	0.05	0.1	0.05	0.05
Длина откосов, м	0.3 и 0.3	0.29 и 0.33	0.55 и 0.55	0.48 и 0.38
Глубина началь- ного Прорана, м	0.005	0.005	0.01	0.01
Объем водоема, м ³	0.203	0.183	0.312	0.162

Полученные в результате эксперимента наблюдения, а также смоделированные гидрографы прорывов представлены на рисунке 1. При моделировании не учитывается спонтанное обрушение грунта с бортов прорана, которое ведет к появлению локальных увеличений расходов воды на

наблюдаемых гидрографах (рис. 1а, б, в). В физических экспериментах № 1, № 3 и № 4 прорыв грунтовых плотин происходил при переливе воды через гребень, а в эксперименте № 2 — в результате образования фильтрационного канала в теле плотины (piping).

Анализ смоделированных и полученных в результате физических экспериментов гидрографов показал: наступление пиков прорывных паводков практически совпадает по времени. При проведении эксперимента № 1 (рис. 1а) произошло спонтанное обрушение грунта на 19 секунде, что привело к несовпадению пиков гидрографов. Именно для этого случая критерий NS принимает наименьшее значение — 0,42. Для остальных NS составил 0,58–0,8, что говорит об удовлетворительной сходимости.

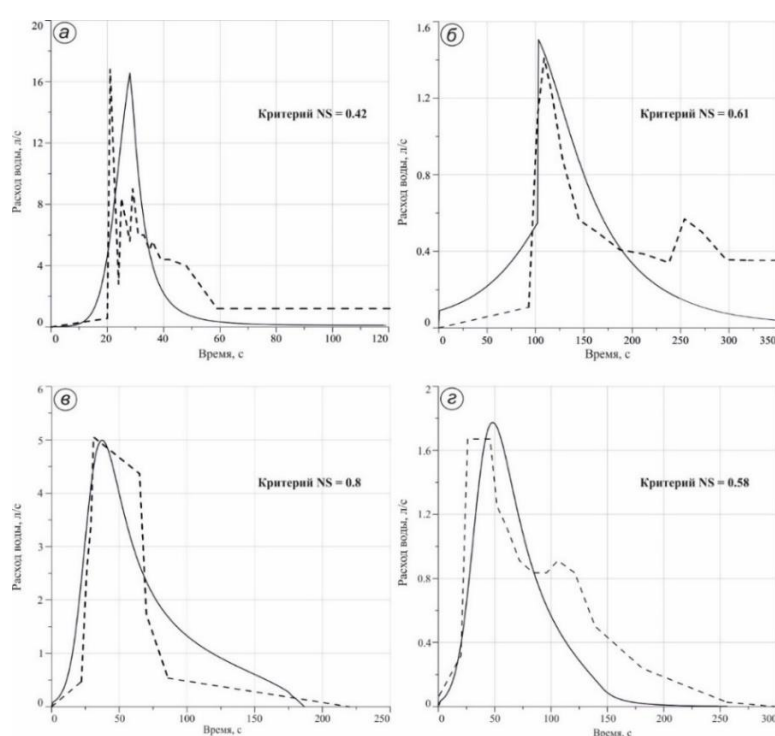


Рис. 1. Наблюдаемые (пунктирная линия) и смоделированные (сплошная линия) гидрографы прорывных паводков, полученные по результатам физических экспериментов: № 1 – а, № 2 – б, № 3 – в и № 4 – г.

Таким образом, удовлетворительная сходимость результатов показала адекватность методики расчета, что позволило использовать ее для расчета реальных случаев прорывов моренных озер (рис. 2). Для апробации методики использовались опубликованные данные по прорывам моренных озер Jinwuso [6] и Tam Pokhari [7] (табл. 2).

Апробация разработанной методики расчета на опубликованных данных реальных прорывов моренных озер показала также удовлетворительный результат.

Таблица 2

Объемы озер и прорывных паводков и размеры образовавшихся проранов

Озеро	Объем водоема, м ³	Объем прорывного паводка (факт. и расчетный), м ³	Реальные ширина и глубина прорана, м	Расчетные ширина и глубина прорана, м
Jinwuso	13900000	10000000/9960000	80/40*, 45	70/38*, 41
Tam Pokhari	21300000	18000000/17300000	100/25*, 50	102/58*, 53

*Через дробь указаны ширина прорана по гребню и по дну

По результатам сравнения реальных и расчетных объемов прорывных паводков было установлено, что расхождение минимально (до 4 %). Что касается размеров прорана, то в случае расчета характеристик прорыва для озера Jinwuso расхождение не превышало 12.5 %, что говорит об удовлетворительном качестве моделирования. В случае озера Tam Pokhari расхождение между измеренной и расчетной шириной прорана по гребню практически отсутствует, однако величина рассчитанной ширины прорана по дну завышена по сравнению с реальной шириной. Это может быть обусловлено тем, что за период времени от произошедшего прорыва до момента измерения размеров прорана могло произойти осыпание грунта с его бортов, в результате чего результат выполненного измерения мог быть занижен.

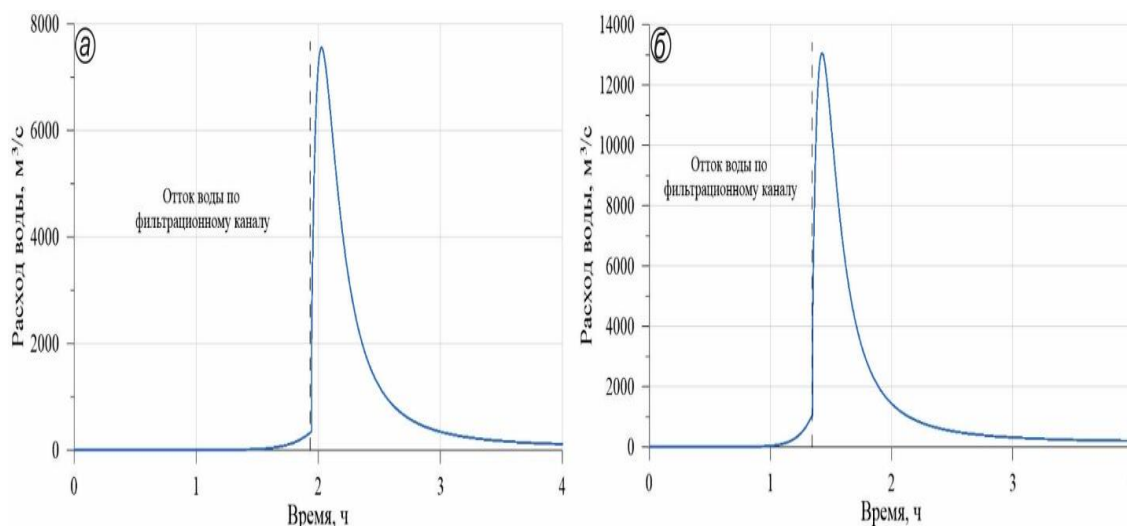


Рис. 2. Расчетные гидрографы прорывного паводка для озер:
Jinwuso – а и Tam Pokhari – б

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-27-00171 «Моделирование прорывов водоемов, подпруженных дамбами естественного происхождения».

Библиографические ссылки

1. *Распутина В. А., Пряхина Г. В.* Математическое моделирование прорывных паводков, образующихся при прорывах моренных озер // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю. Б. Виноградова «Пятые Виноградовские Чтения. Гидрология в эпоху перемен», Санкт-Петербург, 2023. С. 448-454.
2. *Протодьяконов М. М.* Давление горных пород и рудничное крепление. ГИЗ, 1931. 65 с.
3. *Распутина В. А., Пряхина Г. В., Попов С. В.* Опыт моделирования гидрографа прорывного паводка при разрушении грунтовых плотин в результате перелива // Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 194-204.
4. *Черноморец С. С., Петраков Д. А., Алейников А. А., Беккиев М. Ю., Висхаджи-ева 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.* Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Том 22, № 2. С. 70-80.
5. *Пряхина Г. В., Боронина А. С., Попов С. В., Распутина В. А., Войнаровский А. Е.* Физическое моделирование разрушения грунтовой дамбы водохранилища в процессе переполнения водоема // Известия Русского географического общества. 2019. Т. 151. № 2. С. 51-63.
6. *Zheng G., Mergili M., Emmer A., Allen S., Bao A., Guo H., Stoffel M.* The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment // The Cryosphere. 2021. Vol. 15. – P. 3159-3180.
7. *Osti R., Egashira S.* Hydrodynamic characteristics of the Tam Pokhari Glacial Lake outburst flood in the Mt. Everest region, Nepal // Hydrological Processes. 2009. Vol. 23. P. 2943-2955.