

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВОЙ ДАМБЫ ВОДОХРАНИЛИЩА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕПОЛНЕНИЯ ВОДОЕМА

© Г. В. ПРЯХИНА^{* 1}, А. С. БОРОНИНА^{* 2}, С. В. ПОПОВ^{** 3},
В. А. РАСПУТИНА^{* 4}, А. Е. ВОЙНАРОВСКИЙ^{*** 5}

^{*} Санкт-Петербургский государственный университет

^{**} Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург

^{***} ООО «НПП «Фотограмметрия», Санкт-Петербург

E-mail: ¹ g65@mail.ru

² al.b.s@yandex.ru

³ spopov67@yandex.ru

⁴ lerasputina88@gmail.com

⁵ aw@photogrammetria.com

Разрушение грунтовых плотин как естественного, так и искусственного происхождения обусловлено определенными критическими условиями. Основными причинами при этом являются перелив потока через гребень плотины, фильтрация воды сквозь ее тело или механическое разрушение. Для горных районов весьма характерны процессы разрушения грунтовых перемычек моренных озер. Кроме того, прорывы грунтовых плотин могут происходить под толщей покровных и горных ледников, что приводит к формированию подледниковой гидрографической сети. В результате разрушения дамб образуются прорывные паводки, сопровождающиеся значительными разрушениями, а порой и человеческими жертвами. В связи с тем, что изучать процесс прорыва непосредственно в момент его естественного прохождения крайне сложно и небезопасно, исследователи обращаются к альтернативным методам, а именно к физическому моделированию. В работе приводятся результаты эксперимента прорыва моренного модельного водоема. Работа выполнялась в прибрежной зоне прорвавшегося озера Башкара (Приэльбрусье). Для этого была создана искусственная дамба, состоявшая из материала морен, окружающих озеро. Это, в известной степени, воссоздает условия эксперимента, близкие к натурным. В процессе выполнения работы проводилась фото- и видеофиксация прорыва модельного водоема. Результаты физического моделирования вполне согласуются с ранее опубликованными данными прорывов грунтовых плотин и не противоречат физической сущности процесса.

Ключевые слова: разрушения плотин, прорывы озер, физическое моделирование, опасные гидрологические явления.

Введение. Разрушение естественных и искусственных запрудных перемычек в результате перелива воды, ее фильтрации либо механических разрушений тела самой плотины приводит к формированию прорывных паводков, последствиями которых являются серьезные разрушения и человеческие жертвы. Как правило, подобные процессы характерны для моренных приледниковых озер, расположенных в труднодоступных горных районах, где организовать систематические наблюдения крайне сложно. Кроме того, процессы эрозии с последующим разрушением грунтовых плотин могут происходить и под толщей крупных покровных ледников, являясь причиной формирования подледниковой гидрологической сети. Первые теоретические данные по образованию подледниковых водоемов Антарктиды получены Н. Н. Зубовым, И. А. Зотиковым и Г. Робинот (G. Robin) и относятся к середине XX в. [6–9, 35]. Открытие подледникового озера Восток в конце XX в. фактически заложило основу нового направления в науке — субгляциальной гидрологии. В течение последующих лет отечественными и зарубежными исследователями проводилось масштабное мультидисциплинарное изучение этого природного феномена [10, 14–17, 37, 38], что привело к выявлению в этом районе 56 изолированных подледниковых водоемов [21]. Открытие столь значительного субгляциального

гидрологического объекта стало причиной пересмотра ранее полученных аэро-радиолокационных данных. Выяснилось, что на многих временных радиолокационных разрезах зарегистрированы отражения от подобных водоемов [33, 45]. Новые аэро-радиолокационные и наземные данные, полученные в ходе реализации проектов МПГ-3, также позволили выявить значительное количество подобных объектов [22, 45], и к настоящему времени в Антарктиде насчитывается более 400 подледниковых водоемов [45]. Возможно, что часть из них связана своего рода с подледными реками. Основные публикации на эту тему принадлежат М. Сигерту (M. Siegert); имеются работы, в которых приводится схема подледниковой гидрографической сети Антарктиды древовидного типа [28, 36, 44].

Ввиду сложностей с прогнозированием прорывов озер горных районов и Антарктических оазисов исследователи чаще всего имеют дело уже с последствиями прохождения паводков, не получая полного представления о процессе его формирования и механизмах разрушения плотины. Поскольку стать свидетелями прорыва реального водного объекта практически невозможно и, кроме того, весьма опасно, то для понимания природы формирования катастрофического явления, характера протекания изучаемого процесса, определения количественных характеристик целесообразно использовать методы физического моделирования. Ледниковая и водно-ледниковая эрозии формируют не только подледную гидрографическую сеть, но и приводят к постоянному изменению рельефа подледной поверхности. К сожалению, о процессах, происходящих под ледниковым покровом Антарктиды, можно судить лишь по косвенным признакам [28, 36, 44], и заметны они только в прибрежной части континента [2, 34]. Прорывы подледниковых озер в горах и на островах Арктики редки и изучены недостаточно хорошо. Однако иногда эти катастрофические события поражают масштабом разрушений. В Арктике наиболее значимые прорывы подледниковых водоемов известны в Исландии, где расположен один из крупнейших ледников Европы — Ватнайёкюдль (Vatnajökull). Его особенностью является подверженность тепловому потоку Земли и подледным вулканическим извержениям. Под ледником Ватнайёкюдль имеется периодически опорожняющееся озеро Гримсвётн (Grímsvötn). Накопление воды в нем происходит благодаря интенсивному донному таянию, а прорывы носят периодический характер с интервалом от 5 до 10 лет [26, 27]. В результате одного из них образовался селевой поток, который в 1996 г. разрушил мост на участке единственной дороги, кольцом опоясывающей остров и соединяющей все его основные населенные пункты. Фрагмент моста, в качестве памятника событиям тех лет, до сих пор можно увидеть на этой дороге [23]. Аналогичное событие недавно имело место на архипелаге Северная Земля, где летом 2016 г. произошел прорыв озера Спартакоское [19].

Расчеты по интегральным зависимостям не дают полного представления о механизме развития прорывов во времени, что является их главным недостатком. Физическое моделирование, при всей своей кажущейся простоте, позволяет лучше понять, как именно и почему происходит тот или иной процесс, правильно выявить главные факторы, определяющие его ход. Это крайне важно, в частности для разработки математических моделей. Кроме того, полученные в результате физического моделирования характеристики и параметры можно использовать при верификации моделей.

В отечественной и зарубежной литературе полевые и лабораторные эксперименты по прорыву грунтовых дамб описаны в основном применительно к решению задач, связанных с разрушением плотин водохранилищ [18, 20, 29, 31, 32, 42, 43].

Они направлены на определение масштабов наводнений, построение зависимостей уровня воды, скорости течения и изменения размеров прорана от времени. Обширная работа проведена в Лаборатории гидравлики в Стилвотере (Оклахома, США) [30], где на примере физической модели размыва плотины получены зависимости между скоростью перелива и скоростью размыва дамбы, а также продемонстрировано, как определенные свойства различных грунтов влияют на сроки и темпы эрозионного процесса. Полученные в ходе физических экспериментов данные могут быть также использованы для калибровки и валидации математических моделей развития прорана и фильтрационных деформаций плотин [1, 39–41].

Насколько известно авторам, выполнение натуральных экспериментов в условиях непосредственного образования опасных гидрологических явлений (прорывы ледниковых и моренных временно запрудных озер, формирование паводковых волн и селевых потоков) не слишком распространено. Наиболее значимые научные результаты были получены при масштабных работах, выполненных 27 августа 1972 г. и 19 августа 1975 г. сотрудниками КазНИГМИ под руководством Ю. Б. Виноградова на уникальном селевом полигоне, созданном на реке Чемолган в Карасайском районе Алма-Атинской области [3].

В связи с этим авторы поставили своей целью проделать серию экспериментов, связанных с физическим моделированием прорыва водоемов с грунтовыми и снежно-ледовыми перемычками для использования полученных результатов для последующего математического моделирования. Таким образом, проделанная работа является первым этапом масштабного всестороннего исследования этой проблемы. Кроме того, обсуждаемая тематика представляется важной как в плане фундаментальных научных исследований, так и в прикладных аспектах, обусловленных прогнозом развития опасных гидрологических явлений, особенно в свете глобального потепления.

В работе представлены результаты натурального физического эксперимента прорыва моренного озера. Эксперимент проводился в прибрежной зоне озера Башкара, входящего в систему Башкаринских озер, расположенных в Эльбрусском районе Кабардино-Балкарской Республики в долине реки Адыл-Су. Формирование озера произошло, вероятно, в конце 1930-х—начале 1940-х гг. в результате подпруживания талых вод ледника Башкара мореной. На протяжении своей истории водоем неоднократно прорывался, формируя катастрофические паводки и селевые потоки [5, 12, 13, 24, 25]. Таким образом, уникальность данного эксперимента определялась его выполнением непосредственно в условиях формирования опасных гидрологических явлений. Это позволило использовать в качестве материала для строительства плотины материал из окружающих озеро морен, близкий по структурным, гранулометрическим, фильтрационным характеристикам к естественным. Вода, заполняющая резервуар в ходе эксперимента, обладала теми же гидрохимическими характеристиками (мутность, температура, минерализация), что и водные потоки, наполняющие озеро Башкара. Проведение экспериментов непосредственно в условиях протекания подобных процессов позволяет избежать многих допущений, принимаемых при экспериментах в лабораториях.

Методика проведения эксперимента. Участок для эксперимента находился в русле одного из рукавов ручья, берущего начало в леднике Башкара (рис. 1, *а*). Он представлял собой прямоугольный канал с озерным расширением перед искусственной плотиной (рис. 1, *б*). Перепад высот на исследуемом участке составил 0.8 м.



Рис. 1. Место проведения эксперимента (а) и вид конструкции с указанием размеров (б).

Желтым прямоугольником указано место работ. Фото выполнены А. С. Борониной 04.07.2018 г.

Fig. 1. The location of the experiment (a) and the view of construction with indication of the size (b). Yellow rectangle indicates the location of work. Photos by A. S. Boronina on July 4, 2018.

Для регулирования потока воды и оценки поступающего расхода к модельному участку выше по течению на удалении 4.7 м от плотины был установлен металлический лоток с гидроизоляционным слоем из глины и прорыт обводной канал. Вода на участок подавалась самотеком. Сливной лотковый водослив обеспечивал сброс воды для постепенного заполнения модельного водоема. Вода через лоток подавалась таким образом, чтобы до определенного момента избежать ее перелива через гребень плотины. Величина расхода поступающей воды была постоянной, что подтверждено пятикратными измерениями, выполненными объемным методом, и составила 0.11 л/с. Это и понятно, поскольку вода поступала только по отводному каналу от одного из русел ручья. Во избежание боковой фильтрации в подводном канале была сооружена боковая насыпь, укрепленная глинистым материалом. Уровни воды водоема h определялись по водомерной рейке, установленной вблизи плотины и заглубленной на 15 см в дно (рис. 1, б) с дискретностью 30 с. Таким образом, нулевой отсчет уровня соответствовал 15 см. В ходе заполнения водой модельного водоема через сливной лоток была построена экспериментальная зависимость общего объема воды W от ее уровня $W = G(h)$. Графически кривая $h = G^{-1}(W)$ представлена на рис. 2, а. Величина максимального объема составила 0.20 м³.

Во время прорыва плотины фиксировалось время, за которое уровень воды по рейке (рис. 1, б) изменялся на 1 см, что стало возможным с высокой точностью благодаря видеофиксации эксперимента. Изменение h с течением времени t , $h = F(t)$, представлено на рис. 2, б.

Модель плотины сооружена на плотной песчано-галечной подушке естественного происхождения. Сечение плотины принималось треугольным. Ширина по нижнему краю фронта составляла 1.2 м, высота по наклонной стенке 0.42 м, при толщине по основанию 0.4 м, ширина гребня плотины составила около 0.5 м.

Определение гранулометрического состава материала плотины, осуществлялось ситовым методом при помощи звукового просеивателя ATM Sonic Sifter (Endecotts Ltd., UK). Выделенные фракции моренных отложений взвешивались и пересчитывались в проценты к весу всей навески пробы. На основании этих данных была построена гистограмма механического состава ма-

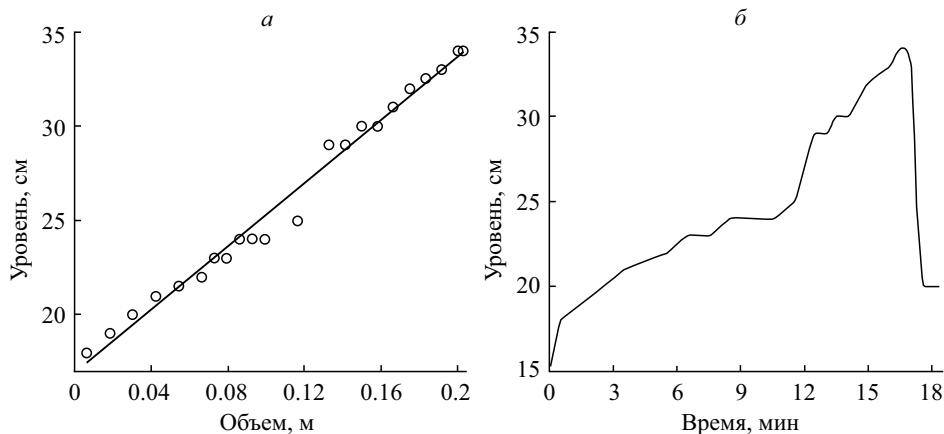


Рис. 2. Рассчитанная зависимость объема модельного водоема от уровня воды в нем (а) и ход уровня воды в модельном водоеме (б).

Fig. 2. The graph of the relation between model reservoir volume and water level (а) and graph of water level fluctuation in model reservoir (б).

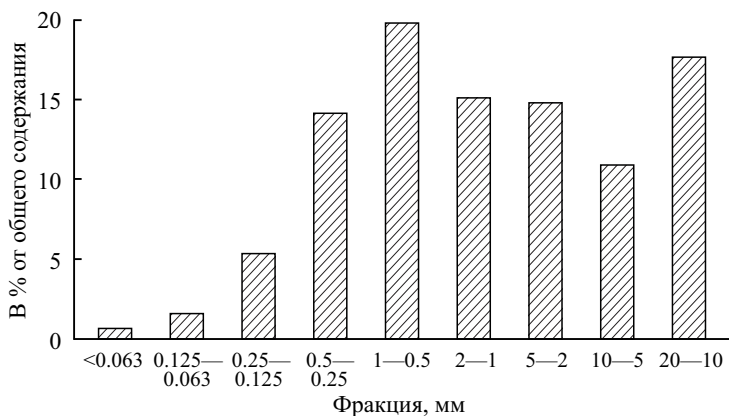


Рис. 3. Гистограмма гранулометрического состава материала плотины.

Fig. 3. The histogram of the granulometric structure of the dam material.

териала плотины (рис. 3). При анализе полученных результатов установлено, что в образце преобладают две фракции размером 0.5—1 мм и 10—20 мм. В процентном содержании их количество составляет около 20 и 18 % соответственно от всех фракций пробы. Согласно [11], в исследуемом материале преобладает однородный крупный песок и мелкая галька.

Результаты физического моделирования. В процессе выполнения физического моделирования были получены ход уровня воды в верхнем бьефе, расходы воды через проран и размеры последнего (ширина прорана во время процесса прорыва изменялась от 9 до 58 см). Время наполнения модельного водоема до уровня, при котором произошел перелив воды через гребень плотины, составило 17 мин при среднем расходе, поступающем через металлический водослив около 0.11 л/с. Ход уровня воды в искусственном водоеме (рис. 2, б) характеризуется асимметричностью, плавным нарастанием и



Рис. 4. Сравнение оттенков моренной плотины в период наполнения водоема (а) и при максимальном уровне воды в нем (б).

Fig. 4. The comparison of moraine shades dam during the filling of the reservoir (a) and at the maximum water level (b).

резким падением, что обычно и наблюдается при прорыве озер различного генезиса [2, 4]. Наполнение водоема происходило до отметки 34 см по рейке. После перелива через гребень и последующего разрушения плотины уровень воды начал стремительно уменьшаться и, достигнув сливного порога на отметке 20 см, стабилизировался.

Начало развития прорана инициировалось переливом через гребень плотины в центральной части. Феноменологически процесс его формирования в перемычке, по результатам визуальных наблюдений, фото- и видеофиксации, протекал следующим образом. На участке начального перелива образовалось струйное течение, часть потока которого на начальном этапе начала фильтроваться в тело плотины со стороны нижнего бьефа. На рис. 4 хорошо прослеживается различие в оттенках цвета моренного материала к моменту наполнения водоема и достижения его максимальных размеров. Из-за того, что вода



Рис. 5. Стадии развития прорана плотины.

Fig. 5. Stages of development of the breach.

просачивалась через тело плотины, моренный материал промачивался и становился более темным.

После начала разрушения вследствие увеличения действующего напора водных масс происходило нелинейное увеличение объема перетекающей воды, расхода истечения через проран с размывом тела плотины и увеличение ширины прорана. При углублении вреза переливающегося потока в тело плотины боковые откосы прорана теряли устойчивость, и развитие прорана в дальнейшем происходило как за счет смыва грунта с обтекаемых поверхностей, так и вследствие обрушения откосов (рис. 5).

Фото- и видеофиксация в ходе выполнения эксперимента позволила не только пронаблюдать за процессом разрушения дамбы, но также и рассчитать расход воды через образовавшийся проран $Q(t)$:

$$Q(t) = \frac{G[F(t)] - G[F(t + \Delta t)]}{\Delta t},$$

при этом интервал времени Δt соответствовал изменению уровня воды на 1 см. Гидрограф $Q(t)$ представлен на рис. 6.

Из представленного гидрографа следует, что расход достигает максимального значения (16.8 л/с) через 21 с после начала перелива. После этого, вследствие уменьшения напора и увеличения площади поперечного сечения потока, его значения начинают уменьшаться, а интенсивность расширения прорана также снижается. На 25-й секунде величина расхода увеличилась более чем в 2.5 раза, а затем, на 29-й секунде, происходит еще один локальный пик. Анализ видеосъемки показал, что именно в эти моменты произошло обрушение моренного материала с боковых стенок прорана, вызвавшее мгновенное расширение русла и локальное увеличение расхода. Размеры прорана стабилизировались при достижении расходом воды постоянного значения, начиная

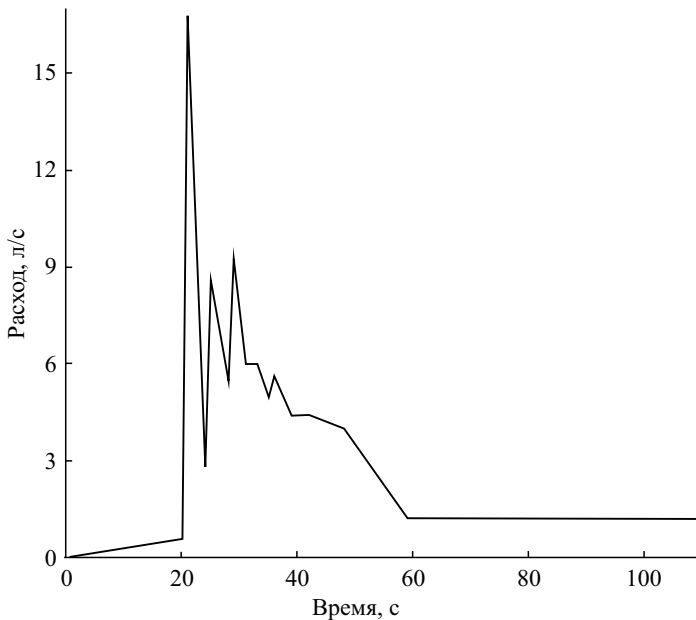


Рис. 6. Гидрограф прорывного паводка.

Fig. 6. Hydrograph of the outburst flood.

с 49-й секунды после начала истечения. Во время истечения воды моренный материал переносился потоком воды вниз по течению, имитируя возникновение селевых потоков.

В силу организационных причин подобный эксперимент удалось провести только два раза. Первый служил в качестве тестового варианта, а результаты второго представлены в настоящей работе. Тем не менее, авторы полагают, что это направление работ должно развиваться, и в дальнейшем планируется выполнить аналогичные эксперименты с запрудными перемычками различного материала (лед, снег, грунты различного гранулометрического состава).

Заключение. В целом, первый эксперимент получился очень удачным. По его результатам выполнено феноменологическое описание разрушения моренной плотины и получены количественные характеристики потока, сформированного в результате размыва дамбы: гидрограф прорыва и максимальный расход воды. Авторы представленного научного исследования в настоящий момент активно занимаются разработкой математической модели и компьютерной программы разрушения грунтовой дамбы, и основное достоинство проделанной работы они видят в визуальном наблюдении того процесса, модель которого планируется создать. В этом смысле полученные результаты, особенно видеорегистрация разрушения дамбы, послужат основой верификации математической модели и компьютерной симуляции на начальном этапе этих работ.

Авторы выражают благодарность начальнику гляциологического стационара МГУ «Джанкуат» В. В. Поповнину за помощь в организации и проведении экспедиционных исследований, а также своим коллегам: С. И. Пряхину — за помощь в проведении полевых работ и А. А. Четверовой — за предоставление оборудования при камеральной обработке данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00421.

Список литературы

- [1] *Бакланова Д. В.* Факторы, влияющие на возникновение аварийных ситуаций на крупных каналах // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2011. № 3 (03). С. 1—9.
- [2] *Боронина А. С., Попов С. В., Пряхина Г. В.* Моделирование подледниковых паводков на примере катастрофического прорыва водоема в леднике Долк (полуостров Брокнес, Восточная Антарктида) // Сборник докладов международной научной конференции «Третьи Виноградские чтения. Грани гидрологии», Санкт-Петербург, 28—30 марта 2018 г. С. 854—859.
- [3] *Виноградов Ю. Б.* Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // Селевые потоки. Сб. 1. 1976. С. 138—153.
- [4] *Гнездилов Ю. А., Иващенко Е. Н., Красных Н. Ю.* Оценка гипотетического прорыва озера Башкара // Сборник научных трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства (ОАО «Севкавгипроводхоз»). 2007. Вып. 17. С. 122—145.
- [5] *Дубинский Г. П., Снегур И. П.* Физико-географические особенности верховьев р. Баксан и метеорологические наблюдения на леднике Башкара // Материалы Кавказ. экспедиции (по программе МГГ). Т. III. Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1961. С. 215—285.
- [6] *Зотиков И. А.* Тепловой режим ледника Центральной Антарктиды // Бюлл. САЭ, 1961. Вып. 28. С. 16—21.

- [7] *Зотиков И. А.* О температурах в толще ледников Антарктиды // Антарктика. 1963. С. 61—105.
- [8] *Зотиков И. А., Капица А. П., Сорохтин О. Г.* Тепловой режим ледникового покрова Центральной Антарктиды // Бюлл. САЭ. 1965. Вып. 51. С. 27—32.
- [9] *Зубов Н. Н.* О предельной толщине морских и материковых льдов // Метеорология и гидрология. 1959. № 2. С. 22—27.
- [10] *Исанина Э. В., Крупнова Н. А., Попов С. В., Масолов В. Н., Лукин В. В.* О глубинном строении котловины Восток (Восточная Антарктида) по материалам сейсмологических наблюдений // Геотектоника. 2009. № 3. С. 45—50.
- [11] *Караушев А. В.* Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 271 с.
- [12] *Кидяева В. М., Петраков Д. А., Крыленко И. Н., Алейников А. А., Штоффел М., Граф К.* Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер // Геориск. 2018. Т. XII. № 2. С. 38—46.
- [13] *Ковалев П. В.* О селях на северном склоне Центрального Кавказа // Материалы Кавказ. экспедиции (по программе МГТ). Том III. Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1961. С. 149—161.
- [14] *Лейченко Г. Л., Беляцкий Б. В., Попков А. М., Попов С. В.* Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Материалы гляциол. исслед. 2005. Вып. 98. С. 81—91.
- [15] *Лукин В. В., Масолов В. Н., Миронов А. В., Попков А. М., Попов С. В., Шереметьев А. Н., Веркулич С. Р., Кузьмина И. Н.* Результаты геофизических исследований подледникового озера Восток (Антарктида) в 1995—1999 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2000. № 72. С. 237—248.
- [16] *Мандрикова Д. В., Липенков В. Я., Попов С. В.* Строение ледникового покрова в районе озера Восток (Восточная Антарктида) по данным радиолокационного профилирования // Материалы гляциол. исслед. 2005. Вып. 98. С. 65—72.
- [17] *Масолов В. Н., Попов С. В., Лукин В. В., Попков А. М.* Характер рельефа дна и водного тела подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // Доклады РАН. 2010. Т. 433. № 5. С. 693—698.
- [18] *Михалев М. А.* Физическое моделирование гидравлических явлений. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. 443 с.
- [19] *Парамзин А. С., Ежиков И. С., Рачкова А. Н., Большианов Д. Ю.* Уникальное ледниковое событие на Архипелаге Северная Земля // Российские полярные исследования. 2017. № 4 (30). С. 47—49.
- [20] *Пономарчук К. Р.* Разработка методики оценки параметров процесса формирования проранов при прорывах грунтовых плотин. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. М.: Мос. гос. ун-т природообустройства, 2001. 120 с.
- [21] *Попов С. В., Черноглазов Ю. Б.* Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы // Лед и снег. 2011. № 1 (113). С. 13—24.
- [22] *Попов С. В., Попков А. М.* Сейморрадиолокационные исследования района подледникового озера Пионерское, Восточная Антарктида // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 107—113.
- [23] *Попов С. В., Боронина А. С., Пряхина Г. В., Григорьева С. Д., Суханова А. А., Тюрин С. В.* Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида), в 2017—2018 гг. // Геориск. 2018. Т. XII. № 3. С. 56—67.
- [24] *Сейнова И. Б.* Селевые процессы бассейна р. Баксан в последнем тысячелетии (Центральный Кавказ). М.: ВИНТИ, 1997. 295 с.
- [25] *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., Севернюк Е. А., Смирнов А. М.* Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70—80.

- [26] Björnsson H. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland // *Glob. Planet. Change*. 2003. Vol. 35. N 3—4. P. 255—271.
- [27] Fowler A. C. Dynamics of subglacial floods // *Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences*. 2009. Vol. 465. N 2106. P. 1809—1828.
- [28] Fricker H. A., Scambos T., Bindschadler R., Padman L. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space // *Science*. 2007. Vol. 315. P. 1544—1548.
- [29] Gjetvaj G. Mogućnosti povećanja stabilnosti hidrotehničkih nasipa // 5 Hrvatska konferencija vodama. Opatija, 2011. P. 761—769.
- [30] Hanson G. J., Cook K. R., Hunt S. L. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments // *Transactions of the ASABE*. 2005. Vol. 48 (5). P. 1783—1794.
- [31] Mohamed M. M. A., El-Ghorab E. A. S. Investigating scale effects on breach evolution of overtopped sand embankments // *Water Science*. 2016. Vol. 30. P. 84—95.
- [32] Morris M., Hassan M. IMPACT: Investigation of extreme flood processes and uncertainty — a European research project // *Proc. of the 40th Defra Flood and Coastal Management Conference*, 2005. P. 1—17.
- [33] Popov S. V., Masolov V. N. Forty-seven new subglacial lakes in the 0—110°E sector of East Antarctica // *J. Glaciol.* 2007. Vol. 53. N 181. P. 289—297.
- [34] Popov S. V., Pryakhin S. S., Bliakharskii D. P., Pryakhina G. V., Tyurin S. V. Vast ice depression in Dâlk Glacier, East Antarctica // *Ice and Snow*. 2017. Vol. 57. N 3. P. 427—432.
- [35] Robin G. Ice movement and temperature distribution in glaciers and ice sheets // *J. of Glaciol.* 1955. Vol. 2. N 18. P. 523—532.
- [36] Siegert M. J., Le Brocq A., Payne A. J. Hydrological connections between Antarctic subglacial lakes, the flow of water beneath the East Antarctic Ice Sheet and implications for sedimentary processes // *Glacial sedimentary processes and products* (eds I. Montanez, M. J. Hambrey, P. Christoffersen, N. F. Glasser and B. Hubbard). 2009. P. 3—10.
- [37] Studinger M., Bell R., Karner G. D., Tikku A. A., Holt J. W., Morse D. L., Richter T. G., Kempf S. D., Peters M. E., Blankenship D. D., Sweeney R. E., Rystrom V. L. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // *EPSL*. 2003. Vol. 205. P. 195—210.
- [38] Tabacco I. E., Bianchi C., Zirizzotti A., Zuccheretti E., Forieri A., Della Vedova A. Airborne radar survey above Vostok region, east-central Antarctica: ice thickness and Lake Vostok geometry // *J. Glaciol.* 2002. Vol. 48 (160). P. 62—69.
- [39] Tingsanchali T., Hoai H. C. Numerical modelling of dam surface erosion due to flow overtopping // *Advances in Hydrosience and Engineering*. 1993. Vol. 1. P. 883—890.
- [40] Tingsanchali T., Chinnarasri C. Numerical modelling of dam failure due to flow overtopping // *Hydrological Sciences Journal*. 2001. Vol. 46. N 1. P. 113—130.
- [41] Tinney E. R., Hsu H. Y. Mechanics of washout of an erodible fuse plug // *Journal of the Hydraulics Division*. 1961. Vol. 87. N 3. P. 1—29.
- [42] Vaskinn K. A., Løvoll A., Höeg K., Morris M., Hanson G., Hassan M. A. A. M. Physical modeling of breach formation: large scale field tests. Association of State Dam Safety Officials: Dam Safety Conference. Phoenix, Arizona, US, 2004.
- [43] Visser P. J., Vrijling J. K., Verhagen H. J. A field experiment on breach growth in sand-dikes // *Proc. of the 22nd Int. Conf. Coastal Eng. Delft, The Netherlands*. 1991. P. 2087—2100.
- [44] Wingham D. J., Siegert M. J., Shepherd A., Muir A. S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // *Nature*. 2006. Vol. 440. N 7087. P. 1033—1036.
- [45] Wright A., Siegert M. J. The identification and physiographical setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data for Subglacial Antarctic // *AGU Geophysical Monograph 192*. Washington DC. 2011. P. 9—26.

Physical modelling of the destruction of reservoir ground dam in consequence of the overflow of water body

© G. V. Pryakhina^{*,1}, A. S. Boronina^{*,2}, S. V. Popov^{**,*3}, V. A. Rasputina^{*,4},
A. E. Voinarovskii^{***,*5}

* Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

** Polar Marine Geosurvey Expedition, Saint Petersburg, Russia

*** «Photogrammetry» Ltd., Saint Petersburg, Russia

E-mail: ¹ g65@mail.ru

² al.b.s@yandex.ru

³ spopov67@yandex.ru

⁴ lerasputina88@gmail.com

⁵ aw@photogrammetria.com

The destruction of ground dams, of natural and artificial origin, is caused by certain critical conditions. The main reasons for this are the overflow of water over the crest of a dam, the filtration of water through its body, or mechanical destruction. The processes of destruction of ground dams of moraine lakes are very frequent phenomena for mountain regions and can often occur there. In addition, the outburst of ground dams can take place under the thickness of the cover and mountain glaciers that leads to the formation of the subglacial hydrographic drainage system. Because of the dam destruction, outburst floods, which are accompanied by significant destruction and even human losses, are formed. Considering that, it is extremely difficult and unsafe to investigate the outburst process directly at the time of its natural occurrence, the researchers turn to alternative methods, like physical modeling. In this paper, the results of physical modeling of the outburst of the moraine model reservoir are presented. The experiment was carried out near the coastline of the outburst glacier lake Bashkara (Central Caucasus, Elbrus Region, Russia). Therefore, the artificial dam, consisting of material of moraines surrounding the lake, was created. This leads to a possibility to recreate the experimental conditions closest to natural. During the research photography and video filming of the outburst of the model reservoir were carried out. The results of physical modeling are in complete agreement with previously published data of outburst of ground dams and do not contradict with the physical essence of the process.

Keywords: destruction of dams, outburst of lakes, physical modeling, hazardous hydrological phenomena.

References

- [1] Baklanova D. V. Faktory, vliiaushchie na vzniknovenie avariinykh situatsii na krupnykh kanalakh // Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii. 2011. № 3 (03). P. 1—9.
- [2] Boronina A. S., Popov S. V., Priakhina G. V. Modelirovanie podlednikovyykh pavodkov na primere katastroficheskogo proryva vodoema v lednike Dolk (poluostrov Broknes, Vostochnaia Antarktida) // Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Tret'i Vinogradovskie chteniia. Grani gidrologii», Sankt-Peterburg, 28—30 marta 2018 g. S. 854—859.
- [3] Vinogradov Yu. B. Metod rascheta gidrografa pavodka pri proryve podpruzhennogo lednikom ozera // Selevye potoki. Sb. 1. 1976. S. 138—153.
- [4] Gnezdilov Iu. A., Ivashchenko E. N., Krasnykh N. Iu. Otsenka gipoteticheskogo proryva ozera Bashkara // Sbornik nauchnykh trudov Severo-Kavkazskogo instituta po proektirovaniu vodokhoziaistvennogo i meliorativnogo stroitel'stva (OAO «Sevkavgiprovodkhoz»). 2007. Vyp. 17. S. 122—145.
- [5] Dubinskii G. P., Snegur I. P. Fiziko — geograficheskie osobennosti verkhov'ev r. Baksan i meteorologicheskie nabliudeniia na lednike Bashkara // Materialy Kavkaz. ekspeditsii (po programme MGG). T. III. Khar'kov: Izd-vo Khar'k. un-ta, 1961. S. 215—285.
- [6] Zotikov I. A. Teplovoi rezhim lednika Tsentral'noi Antarktity // Biull. SAE, 1961. Vyp. 28. S. 16—21.
- [7] Zotikov I. A. O temperaturakh v tolshche lednikov Antarktity // Antarktika. 1963. S. 61—105.
- [8] Zotikov I. A., Kapitsa A. P., Sorokhtin O. G. Teplovoi rezhim lednikovogo pokrova Tsentral'noi Antarktity // Biull. SAE. 1965. Vyp. 51. S. 27—32.

- [9] Zubov N. N. O predel'noi tolshchine morskikh i materikovykh l'dov // Meteorologiya i gidrologiya. 1959. № 2. S. 22—27.
- [10] Isanina E. V., Krupnova N. A., Popov S. V., Masolov V. N., Lukin V. V. O glubinnom stroenii kotloviny Vostok (Vostochnaia Antarktida) po materialam seismologicheskikh nabliudeniï // Geotektonika. 2009. № 3. S. 45—50.
- [11] Karashev A. V. Teoriia i metody rascheta rechnykh nanosov. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 271 s.
- [12] Kidiaeva V. M., Petrakov D. A., Krylenko I. N., Aleinikov A. A., Shtoffel M., Graf K. Opyt modelirovaniia proryva Bashkarinskikh ozer // Georisk. 2018. T. XII. № 2. S. 38—46.
- [13] Kovalev P. V. O seliakh na severnom sklone Tsentral'nogo Kavkaza // Materialy Kavkaz. ekspeditsii (po programme MGG). Tom III. Khar'kov: Izd-vo Khar'k. un-ta, 1961. S. 149—161.
- [14] Leichenko G. L., Beliatskii B. V., Popkov A. M., Popov S. V. Geologicheskaiia priroda podlednikovogo ozera Vostok v Vostochnoi Antarktide // Materialy gliatsiol. issled. 2005. Vyp. 98. S. 81—91.
- [15] Lukin V. V., Masolov V. N., Mironov A. V., Popkov A. M., Popov S. V., Sheremet'ev A. N., Verkulich S. R., Kuz'mina I. N. Rezul'taty geofizicheskikh issledovaniï podlednikovogo ozera Vostok (Antarktida) v 1995—1999 gg. // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2000. № 72. S. 237—248.
- [16] Mandrikova D. V., Lipenkov V. Ya., Popov S. V. Stroenie lednikovogo pokrova v raione ozera Vostok (Vostochnaia Antarktida) po dannym radiolokatsionnogo profilirovaniia // Materialy gliatsiol. issled. 2005. Vyp. 98. S. 65—72.
- [17] Masolov V. N., Popov S. V., Lukin V. V., Popkov A. M. Kharakter rel'efa dna i vodnogo tela podlednikovogo ozera Vostok, Vostochnaia Antarktida // Doklady RAN. 2010. T. 433. № 5. S. 693—698.
- [18] Mikhalev M. A. Fizicheskoe modelirovanie gidravlicheskikh iavlenii. SPb.: Izd-vo Politekhniceskogo un-ta, 2010. 443 s.
- [19] Paramzin A. S., Ezhikov I. S., Rachkova A. N., Bol'shiianov D. Yu. Unikal'noe lednikovoe sobytie na Arhipelage Severnaia Zemlia // Rossiiskie poliarnye issledovaniia. 2017. № 4 (30). S. 47—49.
- [20] Ponomarchuk K. R. Razrabotka metodiki otsenki parametrov protsessa formirovaniia proranov pri proryvakh gruntovykh plotin. Dis. na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk. M.: Mos. gos. un-t prirodobustroistva, 2001. 120 s.
- [21] Popov S. V., Chernoglazov Iu. B. Podlednikovoe ozero Vostok, Vostochnaia Antarktida: beregovaia liniia i okruzhaiushchie vodoemy // Led i sneg. 2011. № 1 (113). S. 13—24.
- [22] Popov S. V., Popkov A. M. Seismoradiolokatsionnye issledovaniia raiona podlednikovogo ozera Pionerskoe, Vostochnaia Antarktida // Kriosfera Zemli. 2015. T. XIX. № 2. S. 107—113.
- [23] Popov S. V., Boronina A. S., Priakhina G. V., Grigor'eva S. D., Sukhanova A. A., Tiurin S. V. Proryvy lednikovyykh i podlednikovyykh ozer v raione kholmov Larsemann (Vostochnaia Antarktida), v 2017—2018 gg. // Georisk. 2018. T. XII. № 3. S. 56—67.
- [24] Seinova I. B. Selevye protsessy basseina r. Baksan v poslednem tysiacheletii (Tsentral'nyi Kavkaz). M.: VINITI, 1997. 295 s.
- [25] Chernomorets S. S., Petrakov D. A., Aleinikov A. A., Bekkiev M. Yu., Viskhadzhiyeva K. S., Dokukin M. D., Kalov R. Kh., Kidiaeva V. M., Krylenko V. V., Krylenko I. V., Krylenko I. N., Rets E. P., Saverniuk E. A., Smirnov A. M. Proryv ozera Bashkara (Tsentral'nyi Kavkaz, Rossiia) 1 sentiabria 2017 goda // Kriosfera Zemli. 2018. T. 22. № 2. C. 70—80.
- [26] Björnsson H. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland // Glob. Planet. Change. 2003. Vol. 35. N 3—4. P. 255—271.
- [27] Fowler A. C. Dynamics of subglacial floods // Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences. 2009. Vol. 465. N 2106. P. 1809—1828.

- [28] Fricker H. A., Scambos T., Bindshadler R., Padman L. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space // *Science*. 2007. Vol. 315. P. 1544—1548.
- [29] Gjetvaj G. Mogućnosti povećanja stabilnosti hidrotehničkih nasipa // 5 Hrvatska konferencija vodama. Opatija, 2011. P. 761—769.
- [30] Hanson G. J., Cook K. R., Hunt S. L. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments // *Transactions of the ASABE*. 2005. Vol. 48 (5). P. 1783—1794.
- [31] Mohamed M. M. A., El-Ghorab E. A. S. Investigating scale effects on breach evolution of overtopped sand embankments // *Water Science*. 2016. Vol. 30. P. 84—95.
- [32] Morris M., Hassan M. IMPACT: Investigation of extreme flood processes and uncertainty — a European research project // *Proc. of the 40th Defra Flood and Coastal Management Conference*, 2005. P. 1—17.
- [33] Popov S. V., Masolov V. N. Forty-seven new subglacial lakes in the 0—110°E sector of East Antarctica // *J. Glaciol.* 2007. Vol. 53. N 181. P. 289—297.
- [34] Popov S. V., Pryakhin S. S., Bliakharskii D. P., Pryakhina G. V., Tyurin S. V. Vast ice depression in Dălk Glacier, East Antarctica // *Ice and Snow*. 2017. Vol. 57. N 3. P. 427—432.
- [35] Robin G. Ice movement and temperature distribution in glaciers and ice sheets // *J. of Glaciol.* 1955. Vol. 2. N 18. P. 523—532.
- [36] Siegert M. J., Le Brocq A., Payne A. J. Hydrological connections between Antarctic subglacial lakes, the flow of water beneath the East Antarctic Ice Sheet and implications for sedimentary processes // *Glacial sedimentary processes and products* (eds I. Montañez, M. J. Hambrey, P. Christoffersen, N. F. Glasser and B. Hubbard). 2009. P. 3—10.
- [37] Studinger M., Bell R., Karner G. D., Tikku A. A., Holt J. W., Morse D. L., Richter T. G., Kempf S. D., Peters M. E., Blankenship D. D., Sweeney R. E., Rystrom V. L. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // *EPSL*. 2003. Vol. 205. P. 195—210.
- [38] Tabacco I. E., Bianchi C., Zirizzotti A., Zuccheretti E., Forieri A., Della Vedova A. Airborne radar survey above Vostok region, east-central Antarctica: ice thickness and Lake Vostok geometry // *J. Glaciol.* 2002. Vol. 48 (160). P. 62—69.
- [39] Tingsanchali T., Hoai H. C. Numerical modelling of dam surface erosion due to flow overtopping // *Advances in Hydroscience and Engineering*. 1993. Vol. 1. P. 883—890.
- [40] Tingsanchali T., Chinnarasri C. Numerical modelling of dam failure due to flow overtopping // *Hydrological Sciences Journal*. 2001. Vol. 46. N 1. P. 113—130.
- [41] Tinney E. R., Hsu H. Y. Mechanics of washout of an erodible fuse plug // *Journal of the Hydraulics Division*. 1961. Vol. 87. N 3. P. 1—29.
- [42] Vaskinn K. A., Løvoll A., Höeg K., Morris M., Hanson G., Hassan M. A. A. M. Physical modeling of breach formation: large scale field tests. Association of State Dam Safety Officials: Dam Safety Conference. Phoenix, Arizona, US, 2004.
- [43] Visser P. J., Vrijling J. K., Verhagen H. J. A field experiment on breach growth in sand-dikes // *Proc. of the 22nd Int. Conf. Coastal Eng. Delft, The Netherlands*. 1991. P. 2087—2100.
- [44] Wingham D. J., Siegert M. J., Shepherd A., Muir A. S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // *Nature*. 2006. Vol. 440. N 7087. P. 1033—1036.
- [45] Wright A., Siegert M. J. The identification and physiographical setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data for Subglacial Antarctic // *AGU Geophysical Monograph* 192. Washington DC. 2011. P. 9—26.

Поступила в редакцию 14.01.2019 г.
 После доработки 15.02.2019 г.
 Принята к публикации 21.02.2019 г.