

*Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: тр. VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 30 мая – 2 июня 2019 г.): в 3 т. Т.3: Управление водными ресурсами. Гидробиология и ихтиология. Вопросы гидрологии и геоэкологии (секция молодых ученых) / науч. ред. А.Б. Китаев, О.В. Ларченко, М.А. Бакланов, В.Г. Калинин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2019. – 250 с.: ил.*

1. Электронный ресурс [www.ardupilot.org]
2. Электронный ресурс [www.geoscan.aero]
3. Васильев А.В., Шмидт С.В. Водно-технические изыскания. Гидрометеоиздат, Л.: Применение аэрометодов в гидрометрии, 1987. 287 с.
4. Alfredsen Knut, Haas Christian, Tuhtan Jeffrey A., Zinkei Peggy. Brief / Communication: Mapping river ice using drones and structure from motion. The Cryosphere journal. Discussion started: 9 October 2017, pp. 1-12.

УДК 556

В.А. Распутина<sup>1</sup>, А.С. Боронина<sup>1</sup>, Г.В. Пряхина<sup>1</sup>, С.В. Попов<sup>2,1</sup>  
lerasputina88@gmail.com

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Полярная морская геологоразведочная экспедиция, г. Санкт-Петербург

## **ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПРОРЫВНЫХ ПАВОДКОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДОВЫХ И ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН**

Изучение процесса разрушения снежно-ледовых и грунтовых плотин является важной прикладной задачей, связанной с исследованием и прогнозированием опасных природных явлений. Поскольку организовать наблюдения за данными явлениями практически невозможно, то для их понимания используются методы физического и математического моделирования. В настоящей работе представлены результаты натурных физических экспериментов разрушения грунтовой и снежной плотины, а также результаты математического моделирования прорыва озера со снежно-ледянной перемычкой.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, математическое моделирование, прорывные паводки.

V. Rasputina<sup>1</sup>, A. Boronina<sup>1</sup>, G. Pryakhina<sup>1</sup>, S. Popov<sup>2,1</sup>  
lerasputina88@gmail.com

<sup>1</sup>St. Petersburg State University, Saint Petersburg

<sup>2</sup>Polar Marine Geosurvey Expedition, Saint Petersburg

## **METHODS FOR ASSESSING OUTBURST FLOODS DUE TO THE DESTRUCTION OF SNOW-ICE AND EARTH DAMS**

Research of the snow-ice and earth dams destruction process is important task which connected with investigation and forecast natural hazards. So far as extremely difficult set

---

© Распутина В.А., Боронина А.С., Пряхина Г.В., Попов С.В., 2019

Научное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00421

observations of these phenomena, methods of physical and math modeling are used for understanding these processes. The results of physical experiments of earth and snow-ice dams destructions and results of math modeling of outburst of snow-ice dammed lake are presented in this paper.

*Keywords:* physical modeling, math modeling, outburst floods.

## ***Введение***

Понимание процесса разрушения снежно-ледовых и грунтовых плотин, подпруживающих водоёмы, является важной прикладной задачей, тесно связанной с изучением формирования и развития опасных гидрологических явлений, в частности селевых потоков. Наиболее значимым результатом мог бы служить точный прогноз наступления этих катастрофических событий. Особенно это актуально сейчас, в период глобального потепления на нашей планете. Поскольку именно его считают ведущим фактором, влияющим на климатические изменения, которые приводят к интенсивному таянию ледников и оттаиванию многолетней мерзлоты [10]. Авторы отмечают, что опасные природные явления стали активнее, чем когда-либо, проявляясь в Полярных регионах. В качестве примера можно привести прорыв озера Спартаковское на одном из островов архипелага Северная Земля [5]. Аналогичные события происходят и в Южной полярной области. В течении последних двух лет в районе станции Прогресс и полевой базы Молодёжная (Восточная Антарктида) произошли масштабные катастрофические прорывы внутриледниковых и приледниковых озёр, которые нанесли весьма ощутимый ущерб инфраструктуре Российской антарктической экспедиции [1;6;9].

Однако тематика разрушения снежно-ледовых и грунтовых плотин представляет не только практический интерес. Она также важна для изучения субгляциальных процессов, происходящих как внутри ледника, так и на его контакте с каменным основанием. При этом ведущую роль играют гидрологические процессы, поскольку именно водная эрозия является основным фактором экзогенных денудационных процессов, оказывающих наибольшее влияние на изменение морфологии подлёдного рельефа [4]. Помимо этого, именно субгляциальные гидрологические процессы привели к появлению таких уникальных природных объектов, изучение которых сейчас находится на острие современной науки, как подледниковые водоёмы [8;14], самым большим, из которых является озеро Восток [7], расположенное в Восточной Антарктиде.

Понимание процесса в практическом аспекте означает описание его посредством математических уравнений, а на завершающем этапе – в качестве компьютерной программы. Однако, как показывает мировой опыт, физическое моделирование является наиболее эффективным способом не только подбора параметров в математические модели, но и формирования её самой. Имея возможность наблюдать за протеканием процесса, исследователь начинает лучше понимать его формирование, выявлять ведущие факторы, что, в конечном итоге, поможет создать более обоснованную математическую модель с позиций законов физики. В связи с этим, для решения поставленной задачи авторский коллектив начал работать в двух, с одной стороны самостоятельных, но с другой

– тесно связанных между собой направлениях физического и математического моделирования.

### ***Материалы и методы исследования***

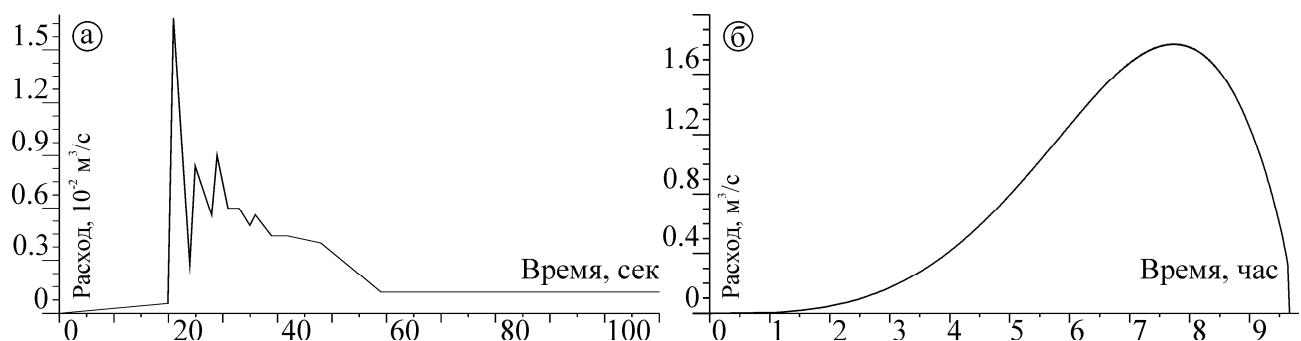
Первые эксперименты по физическому моделированию были направлены на изучение процесса формирования прорывных паводков на озёрах, подпруженных мореной дамбой и снежником. Эксперимент с прорывом грунтовой плотины выполнялся в июле 2018 г. в прибрежной зоне озера Башкара (Эльбрусский район, Кабардино-Балкарская Республика). Его уникальность была связана с тем, что он проводился непосредственно в условиях формирования опасных гидрологических явлений. Для строительства искусственной плотины использовался материал из окружающих водоём морен, близкий по структурным, гранулометрическим и фильтрационным характеристикам к естественным. Участок для физического моделирования располагался в русле одного из рукавов ручья, берущего начало в леднике Башкара. Плотина была сооружена на плотной песчано-галечной подушке естественного происхождения. Её сечение 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 0,05 м. Вода на модельный участок подавалась самотёком. Измерение уровней воды водоёма производилось по водомерной рейке, а дискретность выбиралась исходя из характера колебания водной поверхности. Фото- и видеозапись процесса работы позволила не только проследить детальное изменение уровня воды в модельном водоёме, но и пронаблюдать за процессом разрушения дамбы.

Второй натурный пробный эксперимент проводился в феврале 2019 г. с целью моделирования прорывного потока, возникающего в результате разрушения снежной перемычки. Участок для осуществления физического моделирования располагался на берегу Финского залива чуть западнее г. Зеленогорск (Ленинградская область). Конструкция представляла собой прямоугольный канал длиной 2,9 м и шириной около 1 м, высота стенок составила 0,4 м. Стенки канала состояли из снежного материала, а дно было песчаным. На расстоянии 1 м от его начала была установлена снежная перемычка высотой 0,6 м и шириной около 0,5 м. Таким образом, искусственный водоём имел размеры  $0,4 \times 1 \times 1$  м. С целью предотвращения фильтрации воды в песчаное дно и плавления бортов водоёма основание и боковые стенки были залиты строительным алебастром. Измерение уровня воды проводилось по жёстко закреплённой водомерной рейке. Также, с 4-х сторон осуществлялась видеозапись выполнения эксперимента.

Как указывалось выше, наряду с физическим моделированием осуществлялось и математическое моделирование. Для расчёта прорывного паводка через снежно-ледовую перемычку за основу была взята математическая модель, предложенная Ю.Б. Виноградовым [3], в которой дополнительно учтено возможное наличие ледникового покрова над водоёмом. Эта модель опробована на примере расчёта прорыва внутриледникового водоёма [1] и показала хорошие результаты.

## *Результаты и их обсуждение*

В процессе эксперимента прорыва моренного водоёма получены: ход уровня воды в верхнем бьефе, расходы воды через проран и его размеры. Изменение уровня воды характеризовались асимметричностью: плавным нарастанием и резким падением, что обычно и наблюдается при прорыве озёр. Анализ гидрографа паводка (рис. *a*) свидетельствует о стремительном увеличении расходов воды с момента начала перелива, после чего их значения постепенно снижаются. Однако, на графике отчетливо заметны периодически возникающие пики. Полагается, что подобные локальные увеличения расхода обусловлены обрушением моренного материала с боковых стенок прорана, что в приводило к мгновенному расширению русла. При проведении эксперимента по прорыву снежной плотины дно, залитое строительным алебастром, оказалось не настолько прочным, чтобы выдержать необходимый объём водной массы. Алебастр начал разрушаться, и вода интенсивно фильтровалась в песчаное дно, в результате чего прорыв образовался не в средней части плотины, как это изначально планировалось, а у её нижнего основания, и остатки воды просочились через снег в виде слоя. Несмотря на это, авторам по указанной ранее математической модели удалось рассчитать гидрограф прорыва реального запрудного озера Дискашн (рис. *б*), расположенного в восточной части оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида). Прорыв озера происходил по тоннелю, образованному в снежно-ледовой перемычке. Его размеры изменяются в широких пределах при наибольшей высоте около 3 м и ширине более 8 м. В ходе рекогносцировочного обследования было установлено, что сток озерных вод по указанному пути происходит довольно часто, и что максимальные размеры тоннеля сформировались потоком предыдущих лет, а отток воды нынешнего сезона не носил катастрофического характера. Выдвинутое предположение отлично подтверждается результатами моделирования. При анализе полученного гидрографа, можно заметить, что он характеризуется плавной формой, без резких изменений расхода воды. Максимальный расход оценивается в  $1.8 \text{ м}^3/\text{с}$  и достигается через 7 часов 37 минут после начала истечения. Объем воды, пошедший на формирование паводка составляет  $26\ 750 \text{ м}^3$ . Общее время истечения потока оценено в 9 часов 40 минут.



Наблюденный гидрограф прорывного паводка модельного водоёма (*а*) и рассчитанный гидрограф при прорыве озера Дискашн (*б*)

## **Выводы**

Коротко представленная выше работа, проделанная авторским коллективом является первым шагом на пути понимания процессов разрушения снежно-ледовых и грунтовых плотин. Планы на будущее в части математического моделирования ему видятся в создании модели на основе модели Дж. Ная [11]. Её преимущество, по отношению к остальным, заключается в учёте явления всплытия ледника под действием Архимедовой силы, что может описывать зарегистрированные явления изменения высот поверхности ледника над подледниковыми водоёмами, не только значительных размеров [12], но и малых в процессе подледникового паводка [13].

## **Библиографический список**

1. Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Моделирование подледниковых паводков на примере катастрофического прорыва водоёма в леднике Долк (полуостров Брокнес, Восточная Антарктида) // Третий Виноградовские чтения. Границы гидрологии: сб. докладов междунар. науч. конф. Санкт-Петербург, 2018. С. 854-859.
2. Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Прорывы ледниковых и внутриледниковых водоёмов в районе российской станции Прогресс и полевой базы Молодёжная (Восточная Антарктида) // Природная среда Антарктики: экологические проблемы и охрана: мат. III Междунар. науч.-прак. конф. Беларусь, 2018. С. 84–91.
3. Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // Селевые потоки. 1976. Сб. 1. С. 138–153.
4. Ласточкин А.Н., Лукин В.В., Масолов В.Н., Попов С.В. Содержание, задачи и практическое значение геоморфологических исследований Антарктики. Известия РАН. Серия Географическая. 2004. №3. С. 48–59.
5. Парамзин А.С., Ёжиков И.С., Рачкова А.Н., Большаков Д.Ю. Уникальное ледниковое событие на архипелаге Северная Земля // Российские полярные исследования. 2017. № 4(30). С. 47–49.
6. 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.
7. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лёд и снег. 2012. №4(120). С. 31–38.
8. Попов С.В., Попков А.М. Сейсморадиолокационные исследования района подледникового озера Пионерское, Восточная Антарктида // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. №2. С. 107–113.
9. Попов С.В., Пряхин С.С., Бляхарский Д.П., Пряхина Г.В., Тюрин С.В. Обширная депрессия в леднике Долк, Восточная Антарктида // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3
10. Anthony K.W., von Deimling T.S., Nitze I., Frolking S., Emond A., Daanen, R., Anthony P., Lindgren P., Jones B., Grosse, G. 21st-century modeled permafrost

carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes // Nature communications. 2018. 9(1).

11. Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins // J. Glaciol. 1976. Vol. 17. No 76. P. 181–207.

12. Richter A, Fedorov D.V., Fritzsche M., Popov S.V., Lukin V.V., Matveev A.Yu., Ekyakin A.A., Lipenkov V.Ya., Schröder L., Dietrich R. Height changes over subglacial Lake Vostok, East Antarctica: Insights from GNSS observations // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2014. V. 119. No. 11. P. 2460–2480.

13. Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // Nature. 2006. Vol. 440. No 7087. P. 1033–1036.

14. Wright A and Siegert M A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes. Antarct. Sci. 2012. 24(06). P. 659–664

УДК 556

Н.А. Решин, reshinn@yandex.ru, Ю.С. Власов, ys.seaman@mail.ru,  
Л.А. Тимофеева, tilarisa@gmail.com, А.В. Сикан, sikan07@yandex.ru

*Российский государственный гидрометеорологический университет,  
г. Санкт-Петербург*

## **ОЦЕНКА ПЛОЩАДИ ВОДОСБОРА ВОДОЁМОВ С ПОМОЩЬЮ ГИС**

Гидрологическая изученность многих водоёмов и их водосборов недостаточна. Оценена возможность применения геоинформационной системы ArcGIS и цифровой модели рельефа STRM для надёжного определения важной характеристики водоёмов – площади водосбора. Результаты исследования 47 водоёмов показали, что она может быть надёжно оценена для водосборов, превышающих 100 км<sup>2</sup>. Предложенная методика может быть применена для оценки площадей водосборов неизученных водоёмов.

*Ключевые слова:* водохранилище, озеро, площадь водосбора, ArcGIS, цифровая модель рельефа.

N. Reshin, reshinn@yandex.ru, Y. Vlasov, ys.seaman@mail.ru,  
L. Timofeeva, tilarisa@gmail.com, A. Sikan, sikan07@yandex.ru  
*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg*

## **ESTIMATION OF CATCHMENT AREAS OF WATER RESERVOIRS WITH THE USE OF GIS**

Many water bodies and their catchments are not studied enough. ArcGIS and the digital elevation model STRM can be used to estimate their important characteristic, catchment area. Total, 47 water reservoirs and lakes were studied. The results show that reliable estimates can be obtained for the catchments, which exceed 100 km<sup>2</sup>. The approach proposed can be applied to estimate catchment areas of unstudied water bodies.

*Keywords:* reservoir, lake, catchment area, ArcGIS, digital elevation model.