

## Моделирование экстремальных гидрологических событий в бассейне р. Баксан

Е.Д.Корнилова<sup>1,2\*</sup>, И.Н. Крыленко<sup>1,2</sup>, Е.П. Рец<sup>2</sup>, Е.М. Богаченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Кабардино-Балкарский ЦГМС, Нальчик, Россия

\*ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

**Аннотация.** Высокогорные территории подвержены различным природным рискам, в том числе экстремальным гидрологическим событиям, исследование которых особенно важно для бассейнов рек с высокой долей ледникового питания в условиях деградации оледенения. Природные риски тесно связаны с социально-экономическими, что обуславливает необходимость контроля и оценки опасности наводнений, особенно в высокогорных районах, где формирование стока рек происходит в результате сочетания многих факторов.

Данное исследование позволит детально изучить механизм образования и развития экстремальных гидрологических событий и покажет возможность использования математического моделирования в речных бассейнах с высокой долей ледникового питания (на примере бассейна р. Баксан).

**Ключевые слова:** горная гидрология, гидродинамическое моделирование, селевые потоки, прорыв горных озер, опасные гидрологические процессы, моделирование стока рек горных территорий.

## Modeling of extreme hydrological events in the Baksan basin

E.D. Kornilova<sup>1,2\*</sup>, I.N. Krylenko<sup>1,2</sup>, E.P. Rets<sup>2</sup>, E.M. Bogachenko

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Kabardino-Balkarian center for hydrometeorology and environmental monitoring, Nalchik, Russia

\*ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

**Abstract.** Alpine territories are subject to various natural risks, including extreme hydrological events, the study of which is especially important for river basins with a large part of nourishment due to streams issuing from glaciers in conditions of glaciation degradation. Natural risks are closely related to socio-economic risks, which necessitates monitoring and assessing the risk of floods, especially in high mountain regions, where river runoff is formed as a result of a combination of many factors.

This study will allow to understand in detail the mechanism of formation and development of extreme hydrological events and show the possibility of using mathematical modeling in river basins with a high proportion of glacial nutrition (for example, the Baksan River basin).

**Keywords:** mountain hydrology, hydrodynamic modeling, debris flow, glacial lake outburst flood, extreme hydrological processes.

## **Введение**

В качестве объекта исследования был выбран бассейн реки Баксан, в том числе бассейн ее притока – реки Адыл-Су, где 1 сентября 2017 года наблюдался прорыв системы приледниковых Башкаринских озер, который повлек за собой крупный селевой паводок. Не меньшими по масштабам разрушений являлись события, обусловленные селевыми потоками р. Герхожан-Су, известной как самая селеопасная долина Кабардино-Балкарской Республики.

Наиболее перспективным методом для исследования формирования стока рек в условиях разреженной сети гидрометеорологических постов, являются математические модели. Также их использование позволяет перейти к различным сценариям с учетом изменения климатических характеристик и подстилающей поверхности.

## **Материалы и методы исследования**

Все расчёты характеристик стока проводились с помощью ИМК ECOMAG (ECOLOGical Model for Applied Geophysics), разработанного под руководством Ю.Г. Мотовилова [3]. ECOMAG является моделью с распределенными параметрами, где поверхность бассейна разделяется регулярной или нерегулярной сеткой на отдельные ландшафтные элементы (элементарные водосборы). Всем элементарным водосборам передается информация о типах почв и ландшафтов и в дальнейшем усредняются с учетом весовых коэффициентов по занимаемой ими площади.

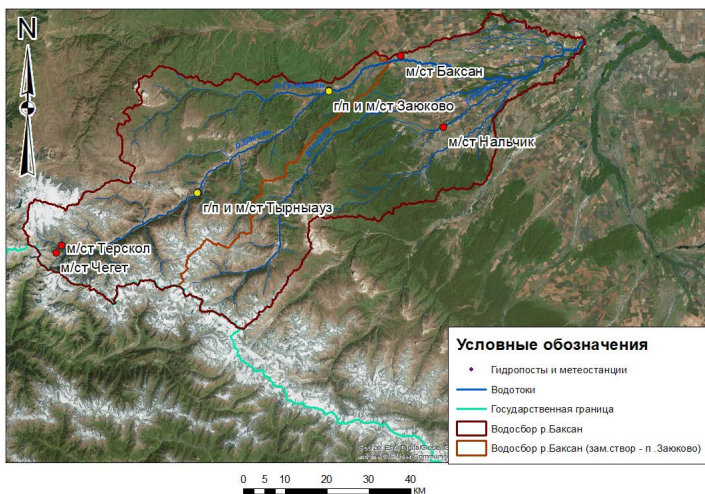
В связи с небольшой площадью бассейна, для получения удовлетворительных результатов моделирования необходимо применение цифровых моделей с пространственным разрешением 90 м и детальнее. Поэтому в качестве основы для моделирования формирования стока р. Баксан использовалась ЦМР SRTM (Shuttle radar topographic mission), разрешение которой составляет 30 м.

В качестве картографической информации использовались почвенная и ландшафтная карты из Атласа Кабардино-Балкарской Республики в масштабе 1:750 000. Карты цифровались вручную и внедрялись в ГИС-проект по подготовке исходных данных.

Основными метеорологическими характеристиками необходимыми для расчета по модели являются среднесуточные осадки, температура воздуха и дефицит влажности. Гидрологическая информация содержит в себе данные о среднесуточных расходах воды на постах и служит для проверки результатов моделирования стока воды. Гидрометеорологические станции, расположенные в пределах бассейна реки Баксан представлены на Рис.1.

Для исследования прорыва ледникового озера использовалась двумерная гидродинамическая модель STREAM\_2D [2], основанная на численном решении двумерных уравнений Сен-Венана в приближении мелкой воды. Данный программный комплекс позволяет строить гибридные треугольно-четырёхугольные сетки с переменным шагом. В центры ячеек расчетной сетки интерполируется информация о рельефе пойм и русел, и для этих же ячеек модель дает на выходе отметки водной поверхности, глубины потока, векторное поле осредненных по глубине скоростей течения.

Исходными данными для применения гидродинамической модели являлись цифровые модели рельефа и результаты батиметрических съемок. Рельеф моделируемого участка строился на основе цифровой модели рельефа с высоким разрешением – 3 метра, полученной в результате обработки данных дистанционного зондирования спутника SPOT.

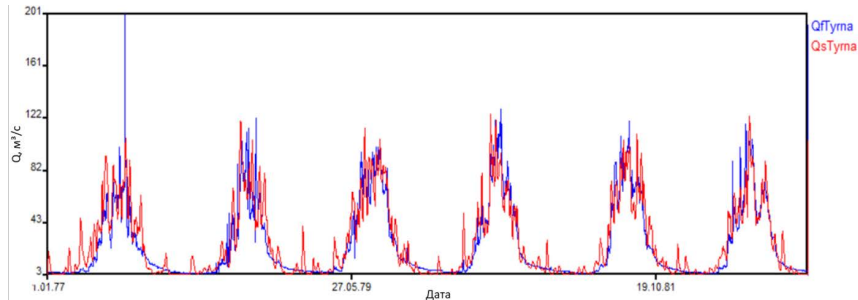


**Рис. 1** Расположение метеорологических станций в бассейне р. Баксан.

Основным калибровочным параметром в уравнениях Сен-Венана является коэффициент шероховатости. Перед расчетом задается типичное значение шероховатости для данного типа русла и поймы [1], затем, после расчета, калибруют, корректируя коэффициент шероховатости.

### Результаты и выводы

**Моделирование формирования стока.** Для проверки совпадения смоделированных и фактических гидрографов учитывается визуальное совпадение гидрографов и проводится оценка качества моделирования на основе статистических критериев. Главным образом, на основе критерия эффективности моделирования Нэша-Сатклифа (NSE), показывающего долю дисперсии исследуемой характеристики, объясняемую рассматриваемой моделью. За калибровочный период были выбраны 1977-1988 гг. Критерий NSE составил 0,6, что является удовлетворительным результатом. На Рис. 2 представлено несколько смоделированных лет.

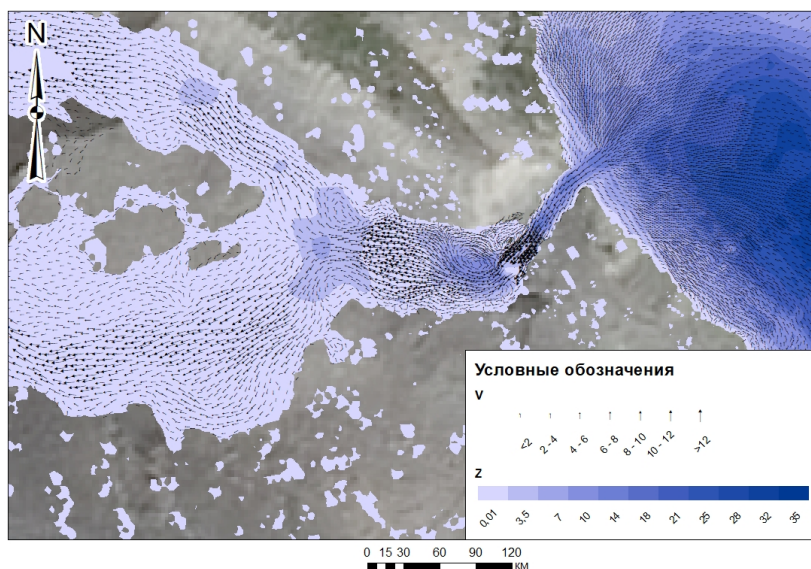


**Рис. 2** Визуальное сравнение фактических (синий) и смоделированных (красный) рядов расходов воды по результатам калибровки (по данным гидропоста Тирныауз).

Важным этапом будущих работ с моделью формирования стока ECOMAG в бассейне р. Баксан станет оценка фоновых расходов воды р. Адыл-су и р. Баксан во время паводка 2017 года. Ведь они были очень существенные, и даже без прорыва озера Башкара могли бы быть ущербы. Особенно это важно для ущербов уже не в долине р. Адыл-су, а в долине р. Баксан.

**Моделирование прорыва оз. Башкара 1 сентября 2017 года.** Для детального изучения механизма прорыва было построено две модели – на систему Башкаринских озер (верхняя) и на долину реки Адыл-Су (нижняя).

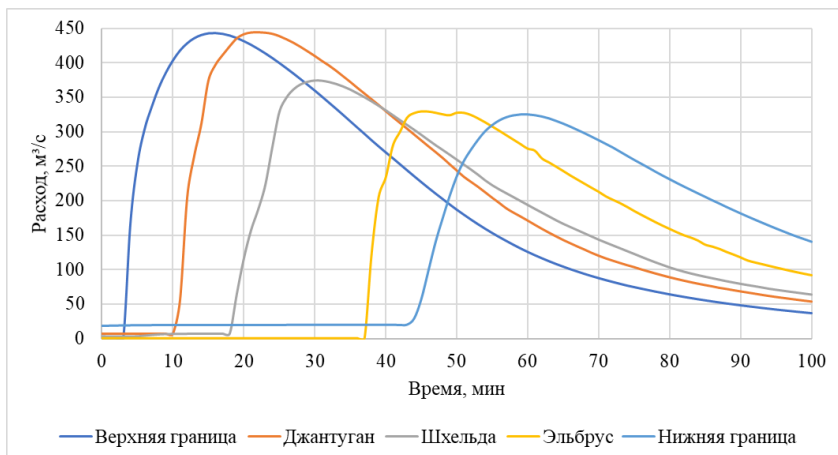
Верхняя модель позволила смоделировать гидрограф прорыва, основываясь на данных о предпрорывных уровнях воды и морфологии сформировавшегося прорана. Важно понимать, что механизм исследуемого прорыва был крайне сложным. Паводок, возникший в результате обрушения морены верхнего озера, перемещался по языку ледника Башкара, затем трансформировался при движении по нижнему озеру Лапа и только потом начал двигаться по долине р. Адыл-Су (Рис. 3).



**Рис. 3** Результаты моделирования прорыва Башкаринского озера.

Для калибровки верхней модели использовался гидрограф, полученный на основе оценки максимального расхода воды во время прохождения паводка по результатам рекогносцировки и данных о форме прорывного паводка.

Полученный на выходе из нижнего Башкаринского озера гидрограф использовался как входные данные для нижней модели долины р. Адыл-Су. Калибровка выполнялась путем сопоставления времени добегания волны прорывного паводка на основе опросов местных жителей и моделирования. Результаты представлены в Табл. и на Рис. 4.



**Рис. 4 Трансформация волны прорывного паводка по результатам моделирования.**

**Табл. Сопоставления времени добега волн прорывного паводка на основе опросов местных жителей и моделирования.**

Местоположение	Время, ч	
	Опросы	Модель
Проран	1:00	1:00
Шхельда	1:20	1:18
Эльбрус	1:30	1:36

В результате методом численного моделирования получена наглядная схема прохождения паводка от места прорыва до впадения р. Адыл-Су в р. Баксан. Работа показала, что гидродинамические модели способны достоверно описывать механизмы такого рода. Важным этапом будущих работ с программным комплексом STREAM\_2D станет моделирование эрозионных процессов при прохождении прорывного паводка. Для этой цели 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.

#### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность центру по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Кабардино-Балкарской Республики за предоставленную гидрометеорологическую информацию.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ 20-35-70024.

#### **Acknowledgments**

The authors thank to the center for hydrometeorology and environmental monitoring of the Kabardino-Balkarian Republic.

The work was supported by project RFBR 20-35-70024.

### Список литературы

1. Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел – СПб: изд-во РГГМУ, 2003. – 147 с.
2. Беликов В.В., Кочетков В.В. Программный комплекс STREAM\_2D для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках // Роспатент. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014612181. М., 2014.
3. Motovilov Yu., Gottschalk, K.Engeland and A.Belokurov. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series no.105, May 1999 (b), 88 p.