



Восьмой объединенный всероссийский
метеорологический и гидрологический съезд



300
ЛЕТ СПбГУ



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОРЫВОВ ВОДОЕМОВ ПОДПРУЖЕННЫХ ДАМБАМИ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Г.В. Пряхина, В.А. Распутина, Д.С. Зырянова, М.Р. Кузнецова

Санкт-Петербургский государственный университет

g65@mail.ru

Санкт-Петербург,
29–31 октября 2024 года

Постановка проблемы

- Отступление горных ледников, наблюдающееся в настоящее время в результате глобального изменения климата, приводит к увеличению площади горных озёр и росту опасности прорыва моренных озёр.
- Большинство моделей рассматривают формирование прорывного паводка при разрушении только искусственной однородной плотины (Visser, 1998; Wahl, 1998; Tingsanchali & Chinnarasri, 2001; Morris & Hassan, 2005; Zagonjoli, 2007; Пономарчук, 2011; Жайнаков и Курбаналиев, 2013; Luo, 2014; Ma & Chi, 2016; Mohamed & El-Ghorab, 2016; Жарницкий, Андреев, 2016; Sánchez-Cordero et al, 2017; Juliastuti & Setyandito, 2017; Богославчик, 2018 и т.д.)
- Активное хозяйственное развитие горных территорий требует мониторинга потенциально прорывоопасных водоёмов.



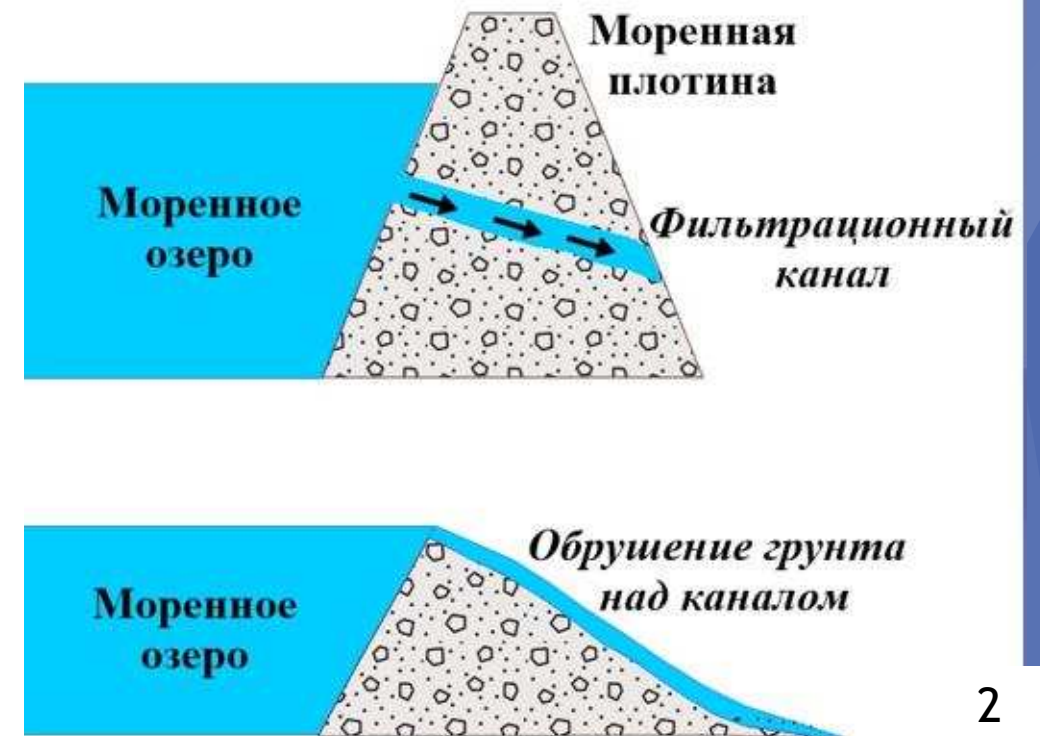
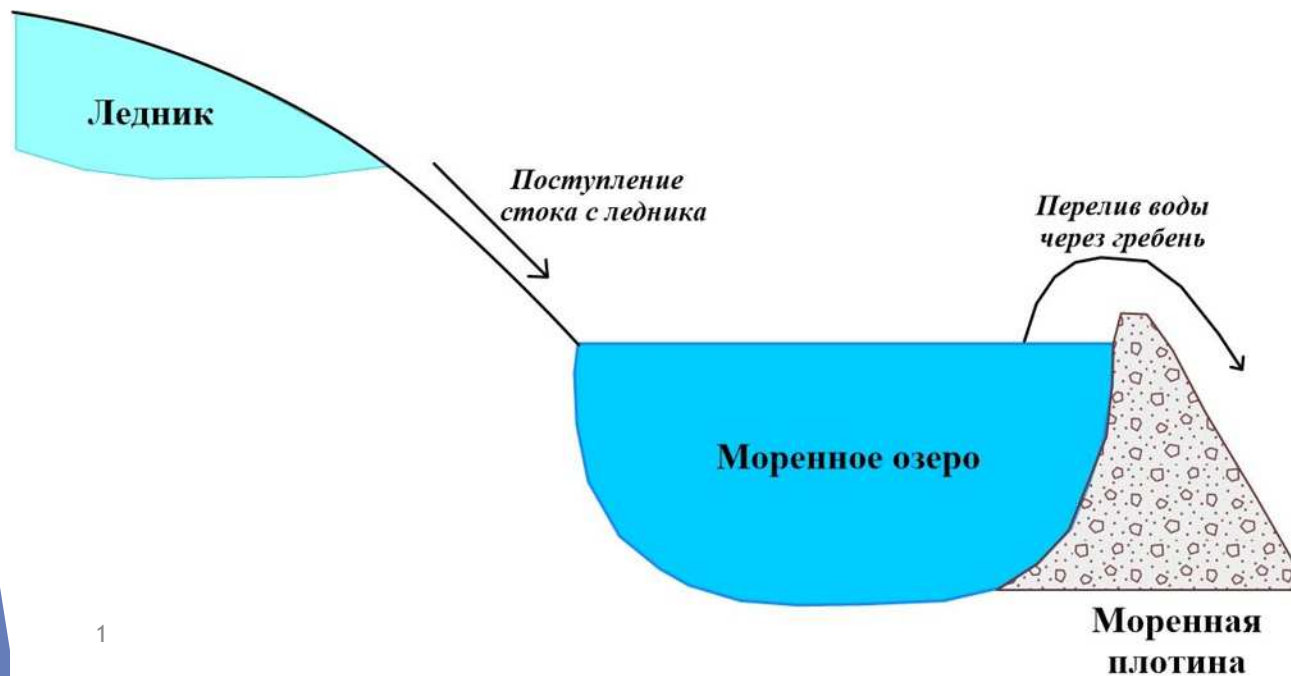
Оз. Маашей до и после прорыва

Алгоритм и методика расчёта характеристик прорывных паводков

Расчет притока воды к озеру

Расчет перелива через гребень плотины

Расчет размыва фильтрационного канала



Алгоритм и методика расчёта характеристик прорывных паводков

Преимущества:

- Рассчитывает суточные уровни воды
- Неоднородный состав плотины
- Учитывается распределение скорости потока по глубине
- Форма поперечного сечения прорана задается в зависимости от изменения скоростей потока

Допущения:

- в плотине уже имеется начальное нарушение в центральной части (канал либо углубление малого размера)
- скорость не меняется по ширине потока
- Площадь поперечного сечения потока аппроксимируется трапецией
- процесс размыва фильтрационного канала прекращается, когда диаметр канала достигнет $1/5$ высоты плотины (Протодьяконов, 1933)

Результат расчета: гидрограф прорывного паводка, скорость течения, изменение уровня воды и объёма водоёма, а также диаметра канала/размеры прорана.

Алгоритм и методика расчёта характеристик прорывных паводков

$$W_{\text{пр},i} - W_{\text{от},i} = \Delta W_{\text{оз},i}$$

$$W_{\text{пр},i} = W_{\text{л},i} + W_{\text{сн},i} + W_{\text{м},i} + W_{\text{пл},i} + W_{(p-e),i}$$

$$W_{\text{л},i} = \sum_{j=1}^m [A_{\text{л},j} \cdot 10^{-3} \cdot (h_{\text{л},i,j} + P_i - E_{\text{л},i,j})]$$

$$W_{\text{сн},i} = \sum_{j=1}^m [A_{\text{сн},i,j} \cdot 10^{-3} \cdot (h_{\text{сн},i,j} + P_i - E_{\text{сн},i,j})]$$

$$W_{\text{м},i} = \sum_{j=1}^m [A_{\text{м},i,j} \cdot 10^{-3} \cdot (P_i - E_{\text{м},i,j})]$$

$$W_{(p-e),i} = \sum_{j=1}^m [A_{\text{оз},j} \cdot (P_i - E_{\text{оз},i,j}) \cdot 10^{-3}]$$

$$W_{\text{пл},i} = \sum_{j=1}^m [A_{\text{пл},j} \cdot h_{\text{пл},i,j} \cdot 10^{-3}]$$

$W_{\text{от},i}$ рассчитывался через зависимость расхода воды от уровня

Суточный слой таяния снега и льда, а также испарения с поверхности снега и льда рассчитывался по уравнению П.П. Кузьмина.

Для расчета испарения с лишенной растительности внеледниковой поверхности использовалась формула А.Р. Константинова. Испарение воды с поверхности озера рассчитывается с использованием формулы ГГИ. Слой суточного таяния погребенного льда, определяется по формуле, основанной на уравнении теплового баланса (Кузьмин П.П., 1961; Резепкин А. А., 2012).

(1), $W_{\text{л},i}, W_{\text{сн},i}$ – приток от таяния ледникового

(2), льда и таяния снега на водосборе, соответственно, м³;

(3), $W_{\text{м},i}$ – приток воды с внеледниковой части водосбора, м³;

(4), $W_{\text{пл},i}$ – приток от таяния погребенного льда, м³;

(5), $W_{(p-e),i}$ – разность между объемами выпадающих на акваторию осадков и испарения, м³.

(6), $A_{\text{л},j}, A_{\text{сн},i,j}, A_{\text{м},i,j}, A_{\text{пл},j}$ – площадь ледникового льда, снега, внеледниковой поверхности, перекрытого погребенного льда в высотном интервале j , м²;

(9), $h_{\text{л},i,j}, h_{\text{сн},i,j}, h_{\text{пл},i,j}$ – слой таяния льда, снега, погребенного льда, мм водного эквивалента;

P_i – слой осадков, мм; льда, снега, внеледниковой поверхности, мм.

$E_{\text{л},i,j}, E_{\text{сн},i,j}, E_{\text{м},i,j}$ – слой испарения с поверхности

Расчет притока воды к озеру

Алгоритм и методика расчёта характеристик прорывных паводков

Уравнение водного баланса для водоёма

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{IN}\Delta t - Q_B\Delta t$$

Расчёт расходов воды через проран

$$Q_B(t) = M\omega(t)\sqrt{z_w(t) - z_B(t)}$$

Распределение скоростей потока
по глубине

$$v_B = \bar{v} \times \sqrt{1 - \left(0.57 + \frac{3.3}{C}\right) \frac{z}{R(t)}}$$

Расчёт скорости эрозии

$$\Delta l(t) = E(t)\Delta t =$$

$$Cons_1 K_1 ([\tau_1(t) - \tau_{c1}]) \Delta t + Cons_2 K_2 ([\tau_2(t) - \tau_{c2}]) \Delta t$$

Отметка воды z_W находится по
уравнению зависимости объёма от
глубины

$$z_W(t) = F[V(t)]$$

Расчет перелива через гребень плотины

$\frac{\partial V}{\partial t}$ – изменение объёма воды
во времени, м³

Q_{in} – приток воды к озеру, м³/с

Q_b – отток воды через проран, м³/с

$\omega(t)$ – площадь поперечного сечения потока,
м²

$z_w(t)$ – отметка воды, м

$z_b(t)$ – отметка дна прорана, м

$v_b(t)$ – придонная скорость потока, м/с

$\bar{v}$ – средняя скорость потока, м/с

$R(t)$ – гидравл. радиус, м

Δl – приращение прорана, м

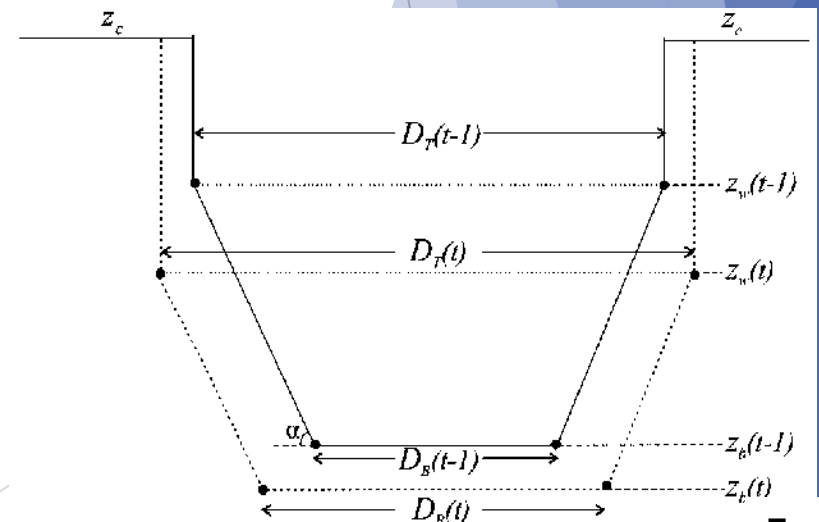
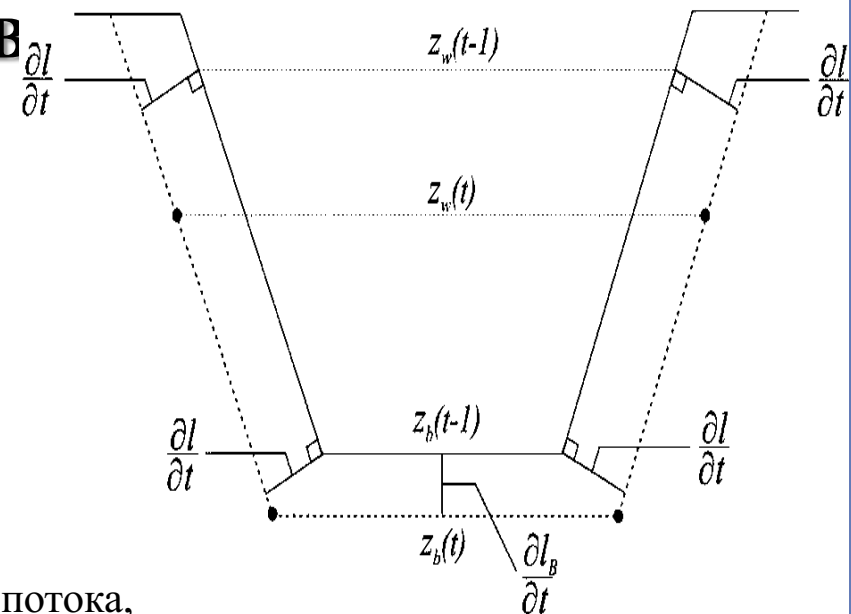
$E(t)$ – скорость эрозии, м/с

$\tau(t)$ – сдвиговое напряжение

τ_c – критическое напряжение

$Cons$ – доля фракции

$V(t)$ – объём воды, м³



Алгоритм и методика расчёта характеристик прорывных паводков

Уравнение водного баланса

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{IN}\Delta t - Q_B\Delta t$$

Расчёт расходов воды через фильтрационный канал

$$Q_f(t) = \omega_f(t) \sqrt{\frac{2g(z_w(t) - z_{pip})}{h_f(t)}}$$

Расчёт скорости эрозии

$$\Delta l(t) = E(t) =$$

$$Cons_1 K_1([\tau_1(t) - \tau_{c_1}]) + Cons_2 K_2([\tau_2(t) - \tau_{c_2}])$$

Отметка воды z_w находится по уравнению зависимости объёма от глубины

$$z_w(t) = F[V(t)]$$

Расчет размыва
фильтрационного канала

$\frac{\partial V}{\partial t}$ — изменение объёма воды во времени, м³

Q_{in} — приток воды к озеру, м³/с

Q_b — отток воды через проран, м³/с

$\omega_f(t)$ — площадь поперечного сечения канала, м²

$z_w(t)$ — отметка воды, м

$z_{pip}(t)$ — отметка середины канала, м

Δl — приращение прорана, м

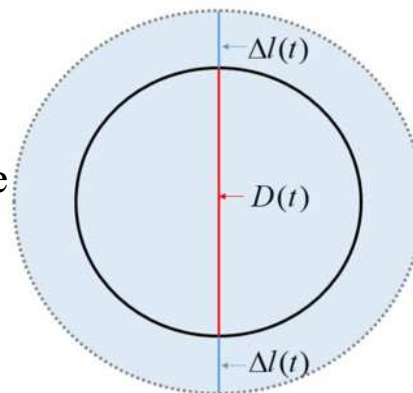
$E(t)$ — скорость эрозии, м/с

$\tau(t)$ — сдвиговое напряжение

τ_c — критическое напряжение

$Cons$ — доля фракции

$V(t)$ — объём воды, м³



Формирование канала происходит в центральной части дамбы.

Канал постепенно расширяется в результате эрозии.

При достижении критического значения ширины прорана (1/5 от высоты плотины) происходит обрушение грунта над каналом (Протодьяконов, 1933).

Обрушившийся грунт выносится потоком воды.

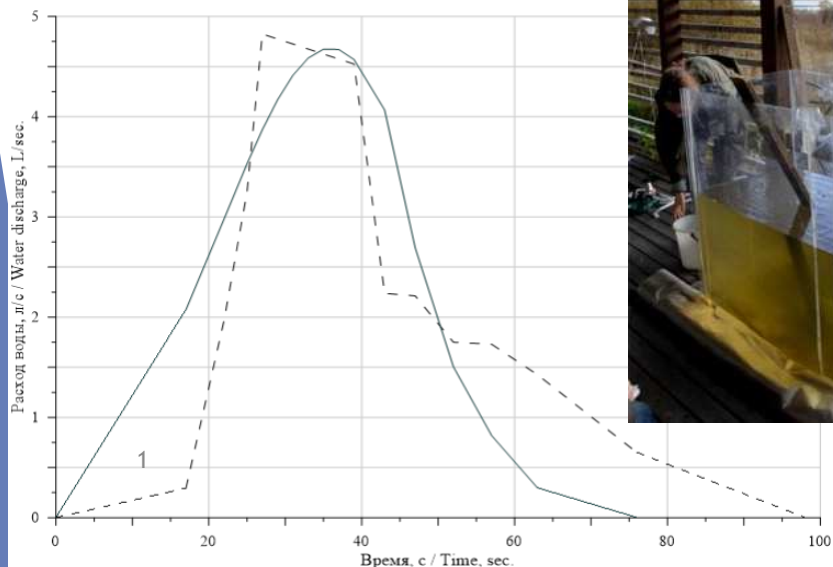
Далее расчёт осуществляется как при переливе.

Алгоритм и методика расчёта характеристик прорывных паводков

Верификация отдельных блоков модели была выполнена с помощью физического и численного моделирования

1.Пряхина Г.В., Попов С.В., Распутина В.А., Кашкевич М.П.,
Свиридов С.С., Боронина А.С., Акилов Е.В

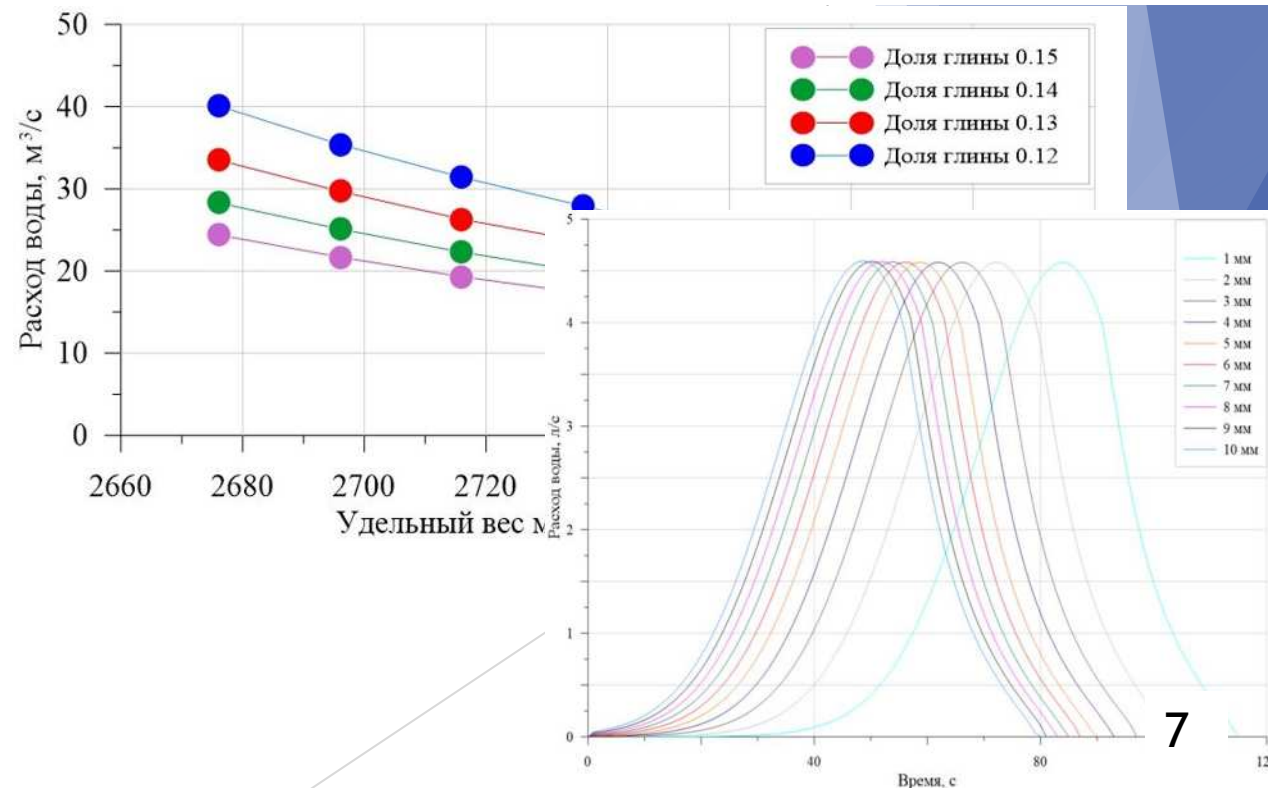
**Физическое моделирование разрушение
грунтовой дамбы-опыт эксперимента в рамках
научно-исследовательской практики магистра.** В
сборнике: ГЕОЛОГИЯ И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ КРЫМА. ПОЛЕВЫЕ
ПРАКТИКИ В СИСТЕМЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ. Материалы Шестой
Всероссийской конференции. ООО "Водный центр СПбГУ", МОО
"Крымская Академия наук". 2022. С. 198-201.



2.Распутина В.А., Пряхина Г.В., Попов С.В.

**Опыт моделирования гидрографа прорывного
паводка при разрушении грунтовых плотин в
результате перелива**

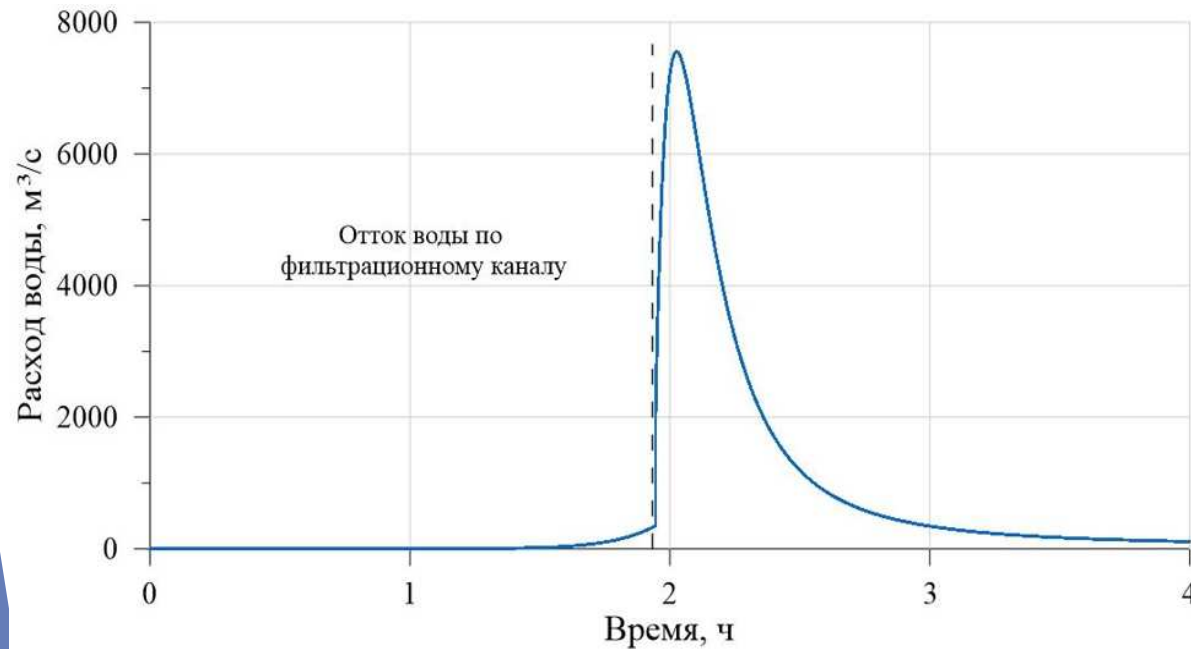
Успехи современного естествознания. 2021. №12. С. 194-204.



Апробация методики расчёта на данных реальных прорывов моренных озёр

Озеро Jinwuso (Тибет)

	Ширина прорана		Объём прорывного паводка
	По гребню	По дну	
Опубликованные ¹	80 м	40 м	10 млн м ³
Расчётная по методике	70 м	38 м	9.9 млн м ³

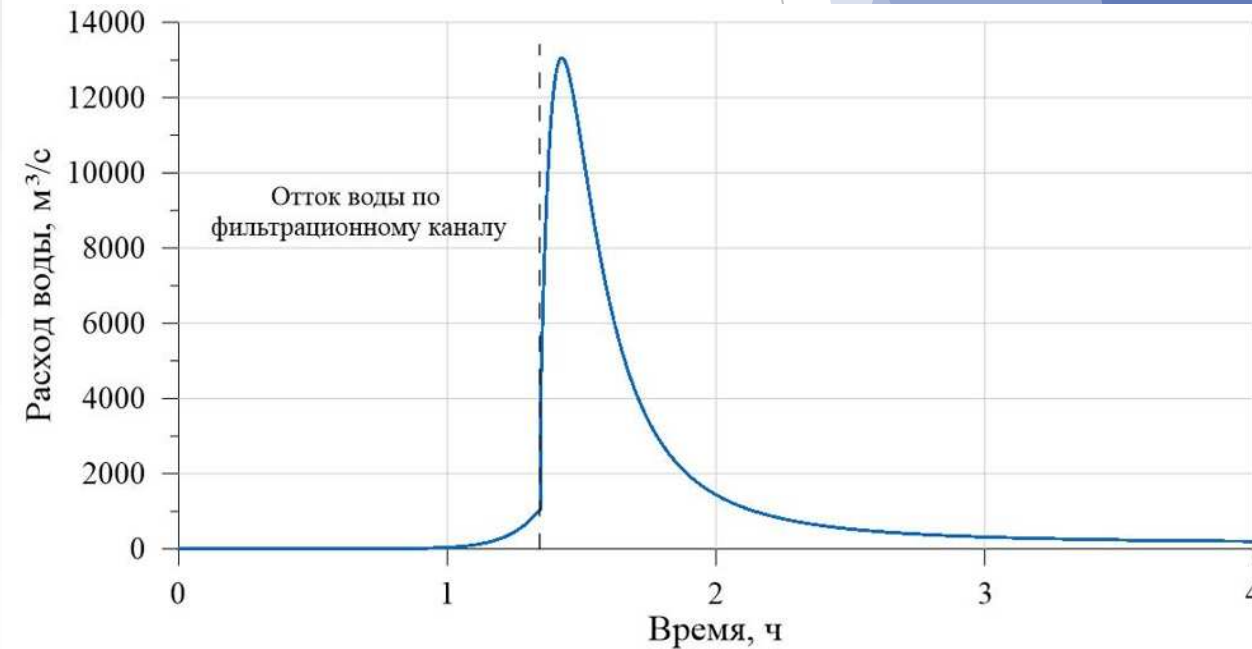


Расчётный по методике гидрограф прорыва оз. Jinwuso

¹ Zheng G., Mergili M., Emmer A., Allen S., Bao A., Guo H., Stoffel M. The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuso, Tibet: causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment // The Cryosphere. 2021. Vol. 15. P. 3159–3180.

Озеро Tam Pokhari (Гималаи)

	Ширина прорана		Объём прорывного паводка
	По гребню	По дну	
Опубликованные ²	100 м	25 м	18 млн м ³
Расчётная по методике	102 м	58 м	17.3 млн м ³



Расчётный по методике гидрограф прорыва оз. Tam Pokhari

² 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. 2943–2951.

Апробация методики расчёта на данных полевых исследований моренных озёр



Схема расположения исследуемых озёр.

Комплексные экспедиции Института наук о Земле СПбГУ на Алтае
2019-2024

Апробация методики расчёта на данных полевых исследований моренных озёр

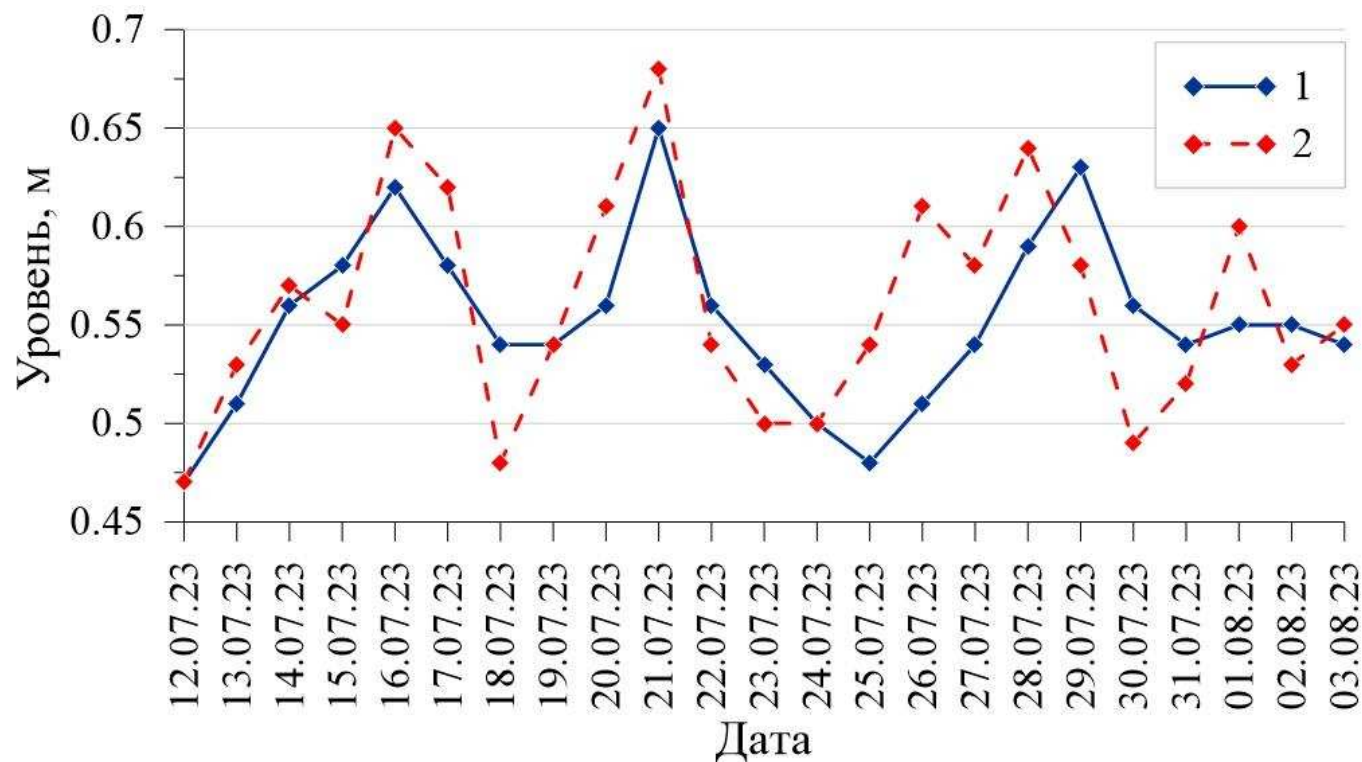
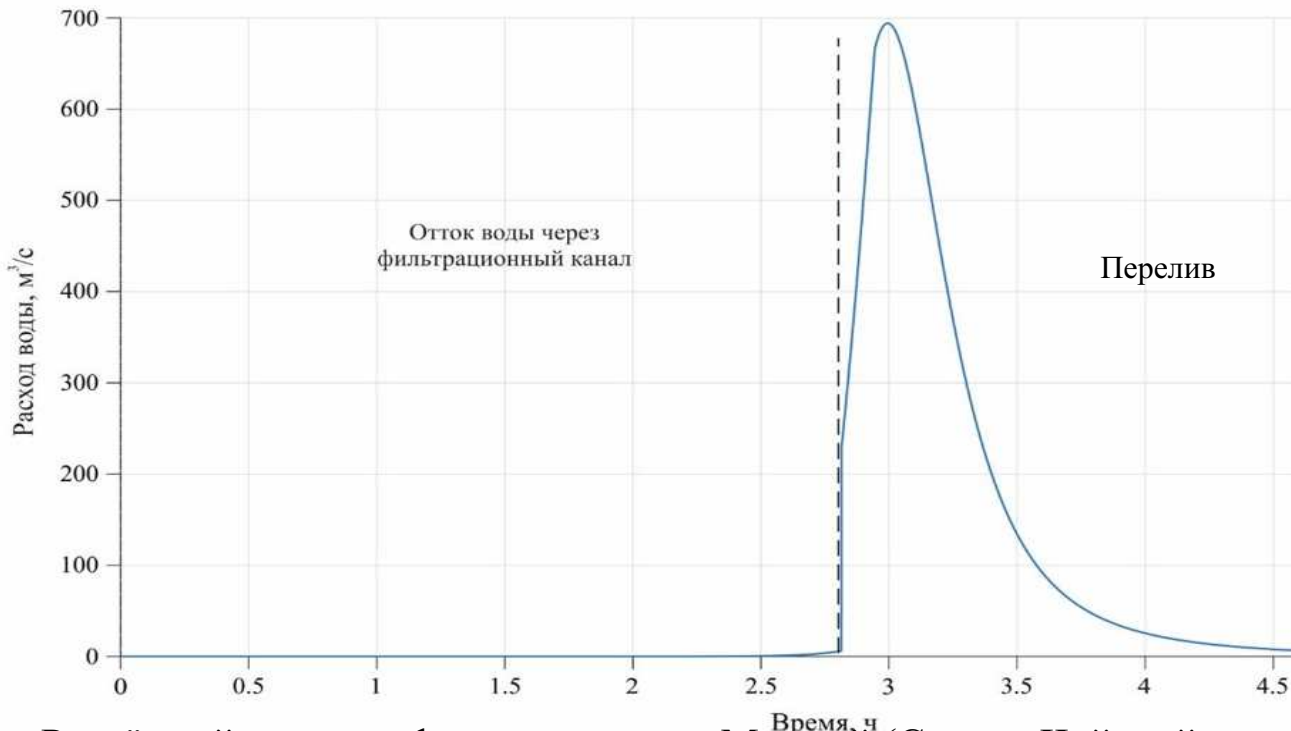


График хода уровней оз.Таможенного; 1-наблюденные, 2-расчетные



Оз. «Таможенное», северный склон Южно-Чуйского хребта (Алтай). Фото *Распутиной В.А.*

Апробация методики расчёта на данных реальных прорывов моренных озёр



Максимальный расход воды: $694 \text{ м}^3/\text{с}$;
Площадь прорана: 476 м^2 (наблюдённая 415 м^2);
Глубина: 10 м ;
Средняя ширина прорана: 47.5 м (наблюдённая 41.5 м).



Расчётный гидрограф прорыва озера Маашей (Северо-Чуйский хребет, Алтай)

Проран в теле моренной плотины. Фото *Распутиной В.А.*

Прорыв озера произошёл в июле 2012 г.

Восстановлена батиметрическая схема озера по результатам полевых работ, выполненных в сентябре 2022 г. Восстановлены морфометрические характеристики озера перед прорывом:

Площадь: 259 тыс. м^2 ; **Объём:** 1.21 млн м^3 ; **Длина:** 1325 м ; **Максимальная глубина:** 7.5 м .

Численный эксперимент



Озеро Нурган. Фото Попова С.В.

Для озера Нурган были проведены численные эксперименты. Предполагалось, что поверхностный отток воды заблокировался, в результате чего талые ледниковые воды начали накапливаться в котловине озера.

Морфометрические характеристики озера:

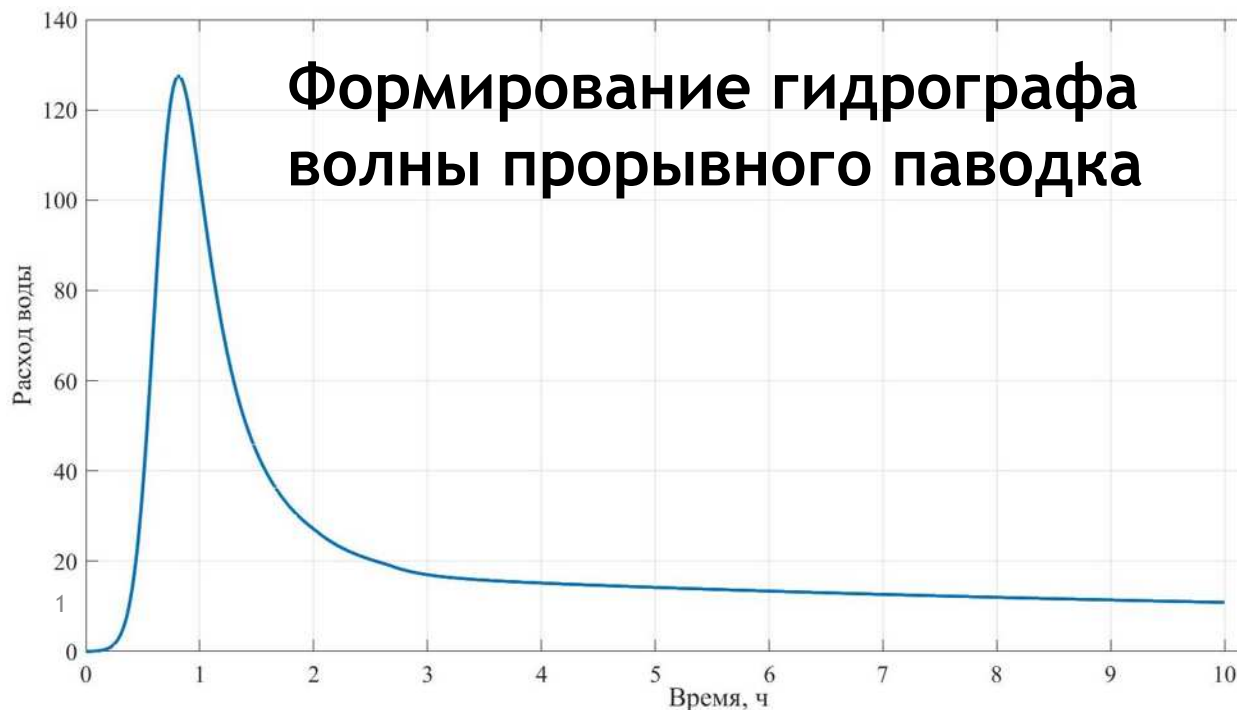
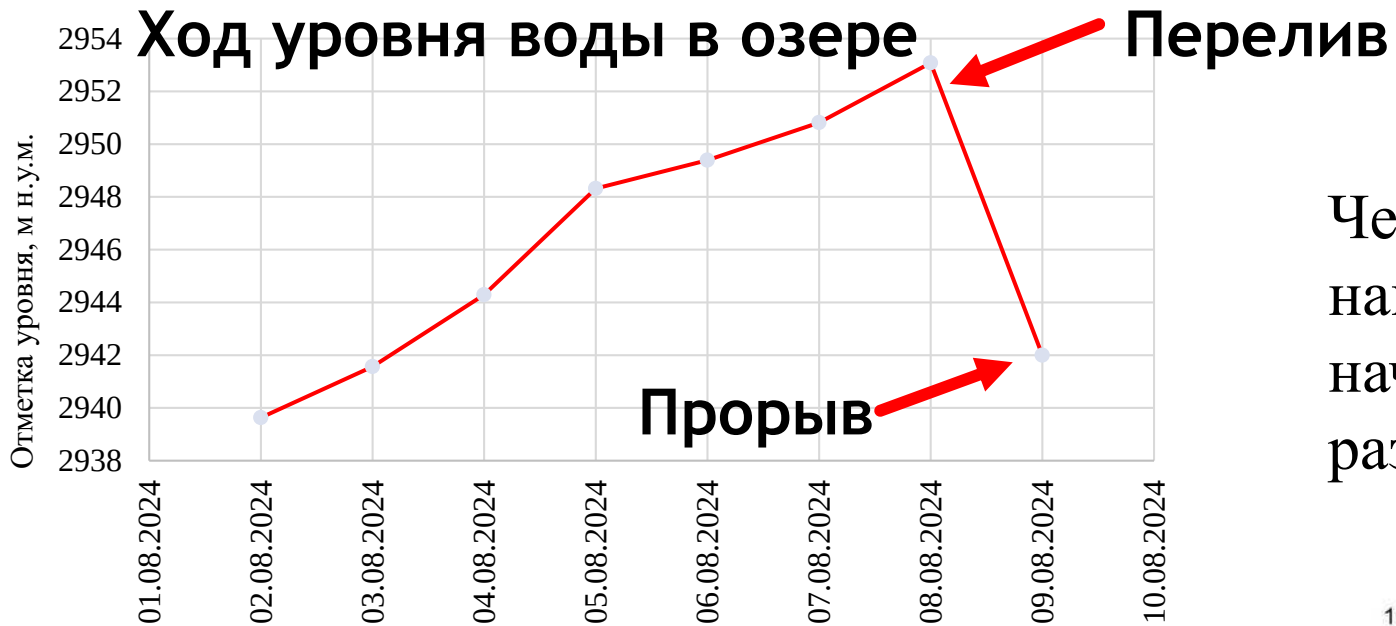
Объём до прорыва: 1.08 млн. м³;

Объём в августе 2019 г.: 513 тыс. м³;

Площадь: 62 тыс. м²;

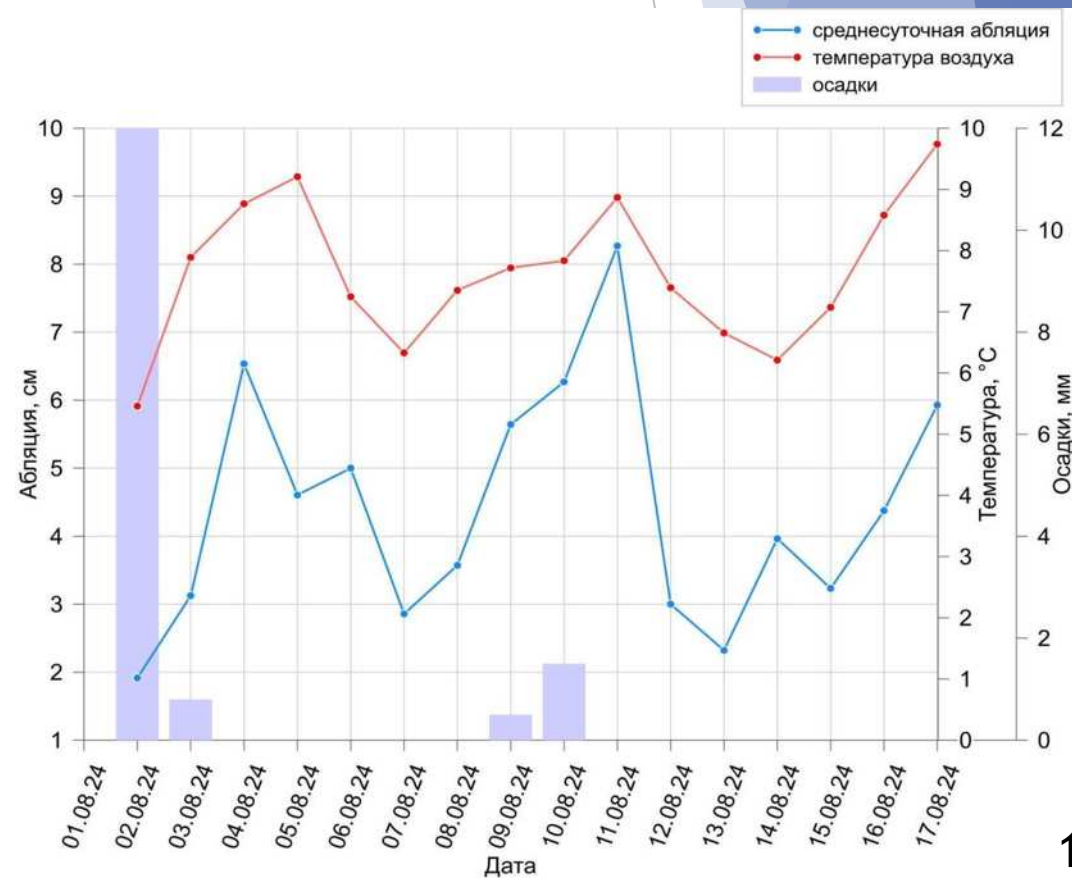
Длина: 350 м;

Максимальная глубина: 31.5 м.



Численный эксперимент

Через 6 суток уровень воды поднялся до наименьшей отметки гребня плотины и начался перелив воды с последующим разрушением моренной перемычки.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Входные данные для модели

Характеристики грунта:

- Удельный вес грунта, кг/м^3
- Процент глины в грунте, %
- Пористость грунта, %
- Индекс пластичности

Характеристики потока:

- Коэффициент шероховатости
- Расход водосброса, $\text{м}^3/\text{с}$
- Расход притока, $\text{м}^3/\text{с}$

Характеристики плотины и водоёма:

- Длина и высота плотины, м
- Отметка гребня, мБС
- Отметка воды, мБС
- Начальная отметка дна прорана, мБС
- Начальный объём водоёма, м^3
- Коэффициенты кривой объёмов
- Длина канала внутри плотины, м
- Начальный диаметр канала, м
- Отметка высоты центра канала, мБС

Расчёт прорывного паводка с учётом неоднородного состава грунта

Если грунт сложен из 2-х фракций, то вводятся их доли (например, доля песка 0.4, а доля суглинка 0.6). Для каждой фракции должны быть рассчитаны коэффициенты эрозии и критические напряжения.

Скорость эрозии рассчитывается для этого случая как:

$$E(t) = 0.4[\tau_{\text{песок}}(t) - \tau_{c_{\text{песок}}}] + 0.6[\tau_{\text{суглинок}}(t) - \tau_{c_{\text{суглинок}}}]$$

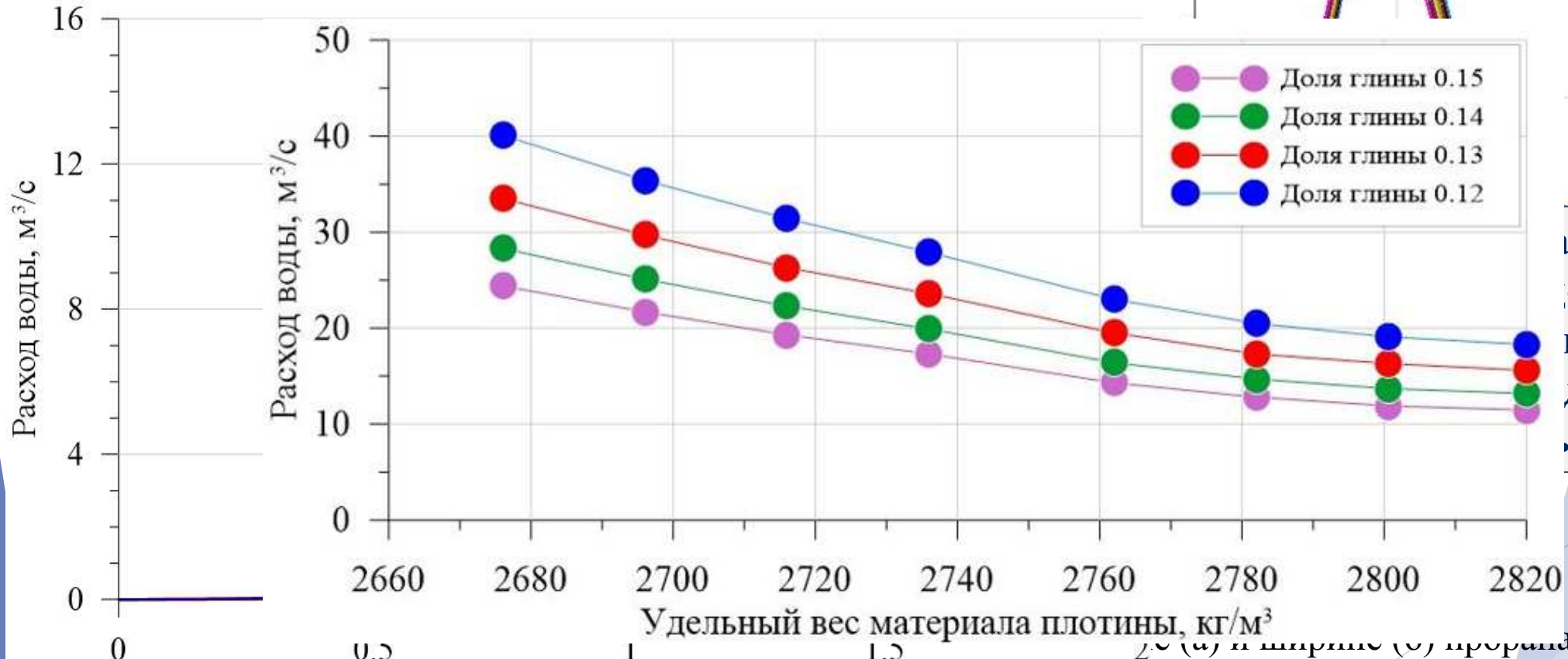
И далее идут расчёты уже с новой скоростью эрозии.

При этом при прорыве пока не учитывается влияние крупных валунов на прорыв.

предложен количественный критерий выбора размеров начального прорана.
 проведён анализ чувствительности модели.

Для прс
 экспери

► Для
 ► Для



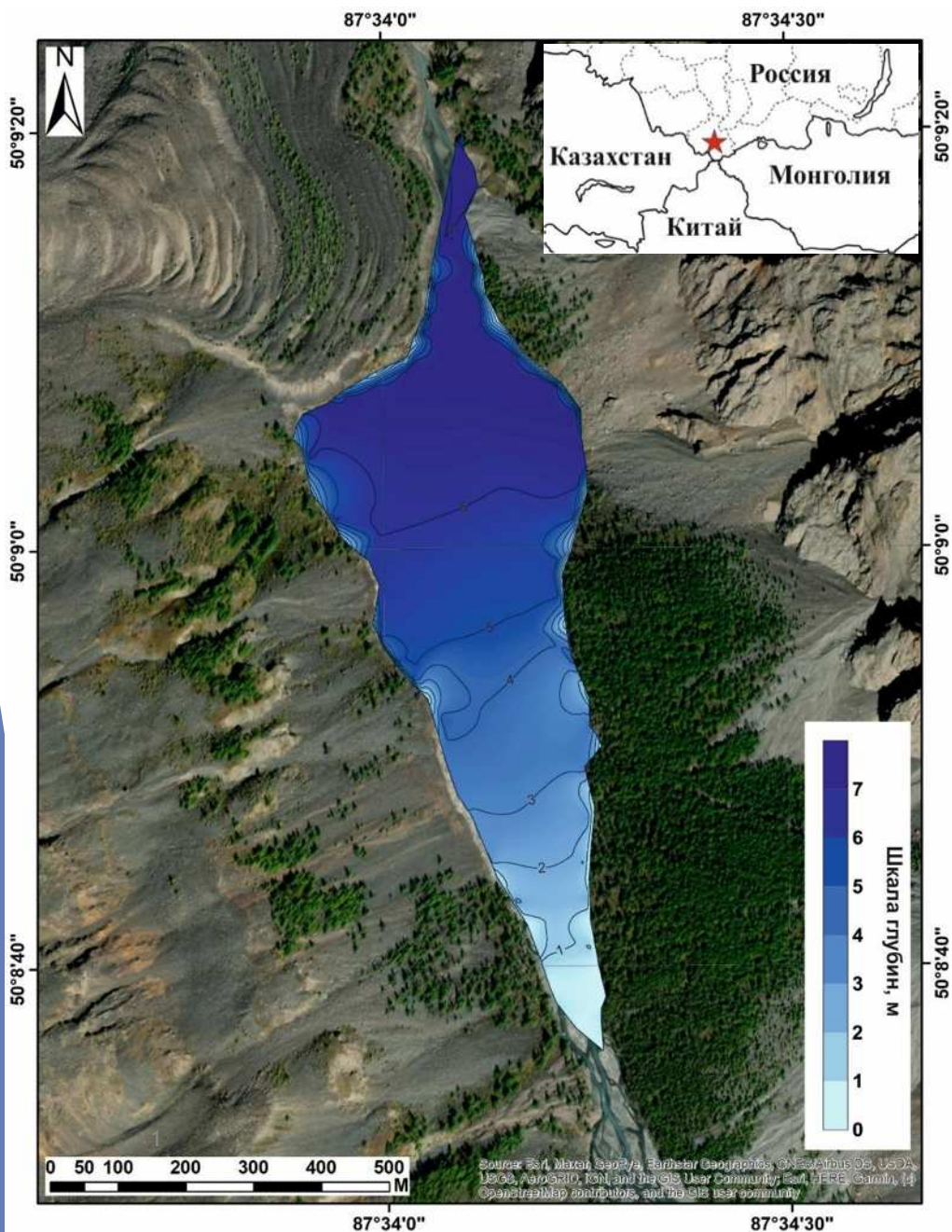
альных условий
 должна быть не
 ны плотины, а
 диаметр канала –
 лсоты плотины.

Зависимость максимального расхода воды от удельного веса материала плотины и

Гидрографы прорыва при разном начальном диаметре канала в теле
 моренной перемычки.

Результаты математического моделирования характеристик реальных и потенциальных прорывов моренных озёр

Озеро Маашей (Северо-Чуйский хребет)



Прорыв озера произошёл в июле 2012 г.

Восстановлена батиметрическая схема озера по результатам полевых работ, выполненных в сентябре 2022 г.

Восстановлены морфометрические характеристики озера перед прорывом:

Площадь: 259 тыс. м²; Объём: 1.21 млн м³; Длина: 1325 м;
Максимальная глубина: 7.5 м.

Получены размеры образовавшегося прорана.

Площадь: 415 м²; средняя ширина: 41.5 м; высота: 10 м.



Проран в теле моренной плотины. Фото *Распутиной В.А.*

Математическое моделирование прорыва озера Нурган (горный массив Цамбаргав, Северо-Западная Монголия)

90°44'10" в.д.

90°44'20" в.д.

90°44'30" в.д.

Россия

48°43'0" с.ш.



**Прорыв озера произошёл в
периоде 1948-1968 гг.**

**Морфометрические
характеристики озера:**

Объём до прорыва: 1.08 млн. м³;
Объём в августе 2019 г.: 513 тыс. м³;
Площадь: 62 тыс. м²;
Длина: 350 м;
Максимальная глубина: 31.5 м.

**Морфометрические
характеристики прорана:**

Площадь: 1640 м²;
Высота: 17 м;
Средняя ширина: 96 м.

Северный склон котловины оз. Нурган. Фото Полова С.В.

Батиметрическая схема озера Нурган на начало августа 2019 г.