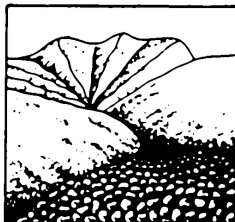


Труды Международной конференции

# **СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита**

---

Пятигорск, Россия, 22-29 сентября 2008 г.



Ответственный редактор  
С.С. Черноморец

---

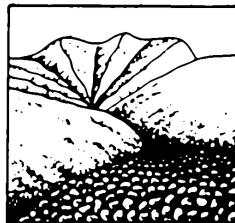
Институт «Севкавгипроводхоз»  
Пятигорск 2008

Proceedings of the International Conference

# **DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection**

---

Pyatigorsk, Russia, 22-29 September 2008



Edited by  
S.S. Chernomorets

---

Sevkavgirovodkhoz Institute  
Pyatigorsk 2008

УДК 551.311.8  
ББК 26.823

**Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита.** Труды Международной конференции. Пятигорск, Россия, 22-29 сентября 2008 г. – Отв. ред. С.С. Черноморец. – Пятигорск: Институт «Севкавгипроводхоз», 2008, 396 с.

**Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection.** Proceedings of the International Conference. Pyatigorsk, Russia, 22-29 September 2008. – Ed. by S.S. Chernomorets. – Pyatigorsk: Sevkavgirovodkhoz Institute, 2008, 396 p.

Ответственный редактор: С.С. Черноморец  
Edited by S.S. Chernomorets

Редакция английских аннотаций: К. Маттар и О. Тутубалина  
English versions of abstracts edited by K. Mattar and O. Tutubalina

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).  
Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-5-91266-010-8

© Селевая ассоциация  
© Институт «Севкавгипроводхоз»

© Debris Flow Association  
© Sevkavgirovodkhoz Institute



## Селевая опасность ледниковых озер и оценка вероятности их прорыва

Д.А. Петраков

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия*

## Debris flow hazard of glacial lakes and assessment of their outburst risk

D.A. Petrakov

*M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

Одним из главных источников селевой опасности в высокогорных районах являются ледниковые озера. Из-за отступления ледников в последние десятилетия сформировалось множество новых озер, степень опасности которых не определена. Предложена новая схема оценки вероятности прорыва ледниковых озер, основанная на многофакторном анализе и использовании интервальной шкалы.

Glacial lakes are among the main sources of debris flow hazard in high mountains. Due to rapid glacier shrinkage many new lakes have formed in recent decades, and their hazard potential has not yet been identified. We propose a new approach to assess the risk of glacial lakes outbursts, on the basis of a multi-criterion analysis and the usage of an interval range.

Глобальное потепление способствует возрастанию частоты и интенсивности большинства опасных природных процессов. В горных районах наблюдается рост темпов деградации оледенения. Отступление ледников приводит к активизации процесса формирования гляциальных озер. Подпруженные неустойчивыми моренными или ледяными дамбами, эти озера становятся одним из основных источников селевой опасности для расположенных ниже территорий. Прорывные паводки и селевые потоки проходят десятки (иногда – сотни) километров, унося человеческие жизни и уничтожая инфраструктуру. Во многих странах детальные исследования селевой опасности ледниковых озер проблематичны из-за их труднодоступности и недостатка финансирования. Быстрое развитие озер (за несколько лет до опасного состояния), отсутствие доступной информации о них приводит к тому, что прорывные сели часто случаются внезапно, в результате ни власти, ни население не успевают подготовиться к грозящей опасности. Из громадного количества ледниковых озер (например, в Бутане их 2674 (Mool et al., 2001)) важно быстро выделить наиболее опасные объекты и сконцентрировать на них усилия специалистов. Целью исследования является разработка метода формальной оценки прорывной опасности ледниковых озер, основанной на небольшом количестве входящей информации.

Гляциальные сели прорывного генезиса известны человечеству с давних времен. Первые сведения о них в альпийских летописях относятся к концу XVI в., когда из-за прорывного селя от ледника Гьетро в Швейцарии погибло 140 человек (Richard, Gay, 2003). 13 декабря 1941 г. прорыв озера Палькакоча в Перу привел к гибели 6000 человек и уничтожению части города Уарас (табл. 1). Сель запрудил реку Санта на 2 дня, прорывной паводок дошел до Тихого океана. В результате была создана Комиссия по контролю за озерами Кордильеры Бланка. Прорыв озера Диг Тшо в Непале (1985) нанес громадные убытки из-за разрушения гидроэлектростанции и отказа от планов по сооружению более мощной ГЭС (Richardson, Reynolds, 2000). В Альпах из-за прорывов

ледниковых озер с середины XVI века погиб 421 человек (Richard, Gay, 2003), в Андах количество жертв прорывных селей приближается к 10000 человек.

Таблица 1. Сведения о прорывах некоторых ледниковых озер. По материалам (Виноградов, 1977; Яфязова, 2007; Liboutry et al, 1977; Richardson, Reynolds, 2000).

Место и дата прорыва	Количество жертв, ущерб	Объем перемещенного материала	Длина пути, км	Причины прорыва
15.07.1973, Малая Алматинка, Казахстан	70 чел.	3.8 млн.м <sup>3</sup>	8 до плотины	переполнение озера из-за жары
13.12.1941, Уарас, Кордильера Бланка, Перу	Более 6000 чел., уничтожена треть города	10-17 млн.м <sup>3</sup>	23 + 220	ледяная лавина, или оползень со склона морены
20.10.1950, Уайлас, Кордильера Бланка	200-500 чел., ГЭС, авто- и ж/д	до 10 млн.м <sup>3</sup>	20	инженерные ошибки при понижении уровня
24.12.1953, Руапеху, Новая Зеландия	159 чел., ж/д мост	менее 1 млн.м <sup>3</sup>	28	таяние ледяной плотины
04.08.1985, Диг Тшо, Непал	5 чел., 500 млн. долл.	6-10 млн.м <sup>3</sup>	90	обвал языка ледника

Ледниковые озера можно разделить на 3 основные группы. Озера, образованные ледниковой экзарацией (каровые, троговые) стабильны, обычно подпружены коренными породами и могут быть селеопасны в редких случаях. Озера, образованные ледниковой аккумуляцией (моренные) формируются преимущественно позади легко разрушаемых стадияльных морен, маркирующих прошлые наступания ледников. Как правило, они следуют за ледником по мере его отступления: после прорыва моренно-подпрудное озеро образуется в новом месте близ фронта ледника. Скорость роста этих озер зависит от темпов отступления ледника и скорости протаивания мертвых льдов за счет термокарста. Как правило, она не превышает первых десятков м/год (табл. 2). Моренно-подпрудные озера часто формируются из наледниковых и подледниковых озер по мере их роста. Селеопасность моренных озер обычно возрастает по мере увеличения их размеров. На современном этапе деградации оледенения именно моренно-подпрудные озера являются наиболее распространенным источником прорывных гляциальных селей. Ледниково-подпрудные озера могут формироваться как при отступании ледников (приток отходит от главного ледника), так и в результате подпруживания боковых долин при подвижках или климатически обусловленном наступании ледников, а также при ледниковых и селевых катастрофах. В этом случае темпы их роста бывают очень велики, от начала формирования озера до его прорыва может пройти менее месяца (табл.2). Ледниково-подпрудные озера зачастую имеют сезонные циклы наполнения/опорожнения (оз. Мерцбахера, Тянь-Шань).

Таблица 2. Темпы формирования ледниковых озер. По материалам (Виноградов, 1977; Käab, Naeberli, 2001; Huggel et al, 2004).

Регион, озеро	Время и причина начала формирования	Площадь (объем) на момент изменений или прорыва
Кавказ, Лапа	Начало 1990-х гг., термокарст	30 тыс. м <sup>2</sup> , 150 тыс. м <sup>3</sup> , 2007 г.
Альпы, Грубен	Середина 1960-х гг., термокарст	10 тыс. м <sup>2</sup> , 50 тыс. м <sup>3</sup> в 1995 г.
Гималаи, Тшо Рольпа	Конец 1950-х гг., термокарст	1760 тыс. м <sup>2</sup> , 76600 тыс. м <sup>3</sup> , 1994 г.
Памир, Абдукагор	19.06.1973, подвижка ледника Медвежий	15000 тыс. м <sup>3</sup> накопилось до 03.07.

Оценку вероятности прорыва ледниковых озер можно проводить по следующему алгоритму: выявление озера и прогноз развития озера - оценка площади и объема - оценка типа плотины (коренные породы, морена или лед) - оценка и прогноз ее устой-

чивости. Селевой риск для нижележащих территорий зависит главным образом от продольного профиля русла, литологии прирусловой части, гидрографа прорыва и возможности вторичных подпруживаний.

Одной из главных проблем при изучении ледниковых озер является их своевременное выявление (до прорывов) и оценка изменений морфометрии уже существующих озер. Для этого преимущественно используются дистанционные методы. Так, Каталог ледниковых озер Бутана был составлен после анализа аэро- и космических снимков (Mool et al., 2001). Предложены способы автоматического выявления озер по космическим снимкам (Huggel et al., 2002). Полезной может оказаться информация от местного населения и туристов. Для прогноза развития озер важно оценить темпы колебаний фронта прилегающих ледников, скорость изменения высоты ледниковой поверхности и ее уклон.

Одной из главных характеристик селевой опасности озера является объем воды в нем. Существуют эмпирические зависимости между объемом и площадью озера, но точность такой оценки невелика. Объем больших озер может быть занижен на 80% (Huggel et al., 2004), а малых - завышен на 50%. Если озеро признается опасным, то на нем следует провести батиметрическую съемку. Объем воды и глубина озера вместе с типом плотины определяют гидрограф и объем прорыва.

Факторы устойчивости моренных и ледяных плотин и причин их прорыва в разных регионах рассмотрены во многих работах (Виноградов, 1977; Голубев, 1976; Clague, Evans, 1994; Huggel et al., 2004; и др.). Так, в Гималаях 53 % прорывов озер были вызваны ледяными лавинами или айсбергами, 8 % - каменными лавинами, 12 % - обрушением морен из-за инфильтрации воды, 4 % - из-за таяния ледяного ядра морен, а причины 23 % прорывов остались неизвестны (Richardson, Reynolds, 2000). Кроме того, прорыв может быть вызван экстремально высокими температурами и/или жидкими осадками, сползанием в озеро внутреннего склона морены, перестройкой внутри- и подледниковой дренажной системы, началом перелива по поверхности льда и даже ошибками при проведении инженерных работ.

Одной из главных задач на первом этапе изучения ледниковых озер является их ранжирование по степени прорывной опасности. Для этого используются методы балльной оценки (Huggel et al., 2004; Reynolds, 2003). Их несомненным плюсом является возможность выделения опасных объектов при наличии общей информации, после визуального осмотра плотины и озера. Недостатком является использование одинаковой балльной шкалы для факторов, оказывающих разное влияние на вероятность прорыва и субъективизм при ранжировании. Для трудно совмещаемых шкал измерения лучше использовать интервальную шкалу в соответствии с методикой Ю.Г. Симонова (1997). Каждый фактор прорыва в этом случае может иметь вес в интервале от 0 (не влияет) до 100 (полностью определяет).

Вероятность прорыва ледникового озера – функция устойчивости плотины и результата воздействия внешнего триггера (Richardson, Reynolds, 2000). Устойчивость плотины в основном зависит от:

- типа плотины (скала – 0, морена – 20, морена с ледяным ядром – 50, лед – 80);
- высоты низшей точки плотины над урезом ( $> 10$  м – 10, 1-10 м – 40,  $< 1$  м – 90);
- отношения ширины плотины к ее высоте ( $> 0.5$  – 0, 0.2 – 0.5 – 30;  $< 0.2$  – 70);
- характер стока через плотину (сток через морену по руслу с отмошкой – 10, сток по дренажной системе ледника – 30, фильтрация через морену – 60, сток отсутствует – 80, сток по поверхности льда – 100);
- объема озера ( $< 100$  тыс.м<sup>3</sup> – 10, 100 тыс.м<sup>3</sup> – 1 млн.м<sup>3</sup> – 20, более 1 млн.м<sup>3</sup> – 30).

Для ледяной плотины следует также учесть возможность ее всплытия (+ 100 баллов). Воздействие внешнего триггера может проявиться в виде:

- волн из-за ледяных и каменных лавин, оползней и откола айсбергов (1) (волны намного ниже плотины – 10, высота волн сопоставима с высотой плотины – 50, волны существенно выше плотины – 100);
- экстремальной жары/дождей (2) (один из факторов – 10, ливень после продолжительной жары – 30).

На рис. 1 показана принципиальная схема использования предлагаемого метода. По оси абсцисс откладывается сумма баллов, показывающая устойчивость плотины, по оси ординат - сумма баллов по возможному триггеру. Чем больше сумма баллов по ка-

ждой из категорий, тем выше вероятность прорыва. Самопроизвольное разрушение плотины возможно при большой сумме баллов, действие триггера понижает порог опасности. Если вероятность прорыва высокая, то он возможен в любое время. Тестирование предлагаемой схемы для ретроспективной оценки прорывов ряда озер дало удовлетворительные результаты, все прорывы находились в зоне высокой вероятности. Вероятность самопроизвольного разрушения плотины озера Башкара можно оценить пока (на 2007 г.) как среднюю (190 баллов), но ее рост в последние годы свидетельствует о возможности прорыва в ближайшем будущем.

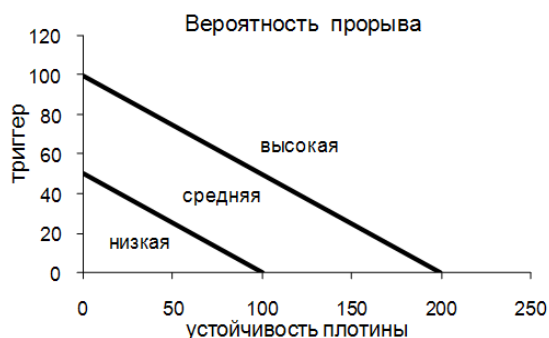


Рис. 1. Вероятность прорыва ледникового озера в зависимости от состояния плотины и действия триггерного механизма.

Предложенный метод можно использовать только как указатель опасных озер. При высокой вероятности прорыва или тенденции ее роста необходимо проведение детальных исследований, направленных на выявление параметров возможного селя и оценку опасных зон. Органам власти можно рекомендовать проведение предупредительных мероприятий на опасных объектах. Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект 06-05-64787 и программы Science for Peace, проект 982143.

#### Список литературы

- Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Ленинград: Гидрометеоздат, 1977, 154 с.
- Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Ленинград: Гидрометеоздат, 1976, 247 с.
- Симонов Ю.Г. Балльные оценки в прикладных географических исследованиях и пути их совершенствования. - Вестник Московского ун-та, сер. 5, география, №4, 1997, с.7-10.
- Яфязова Р.К. Природа селей Заилийского Алатау. Проблемы адаптации. Алматы, 2007, 158 с.
- Clague J.J., Evans S.G. 1994. Formation and failure of natural dams in the Canadian Cordillera. – Geological Survey of Canada, Bulletin 464, Ottawa, 35 p.
- Huggel C., Kääh A., Haerberli W., Teyssere P., Paul F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. – Canadian Geotechnical Journal, vol. 39, 2002, p. 316-330.
- Huggel C., Haerberli W., Kääh A., Bieri D., Richardson S. Assessment procedures for glacial hazards in the Swiss Alps. – Canadian Geotechnical Journal, vol. 41, No. 6, 2004, p.1068-1083.
- Lliboutry L., Morales Arnao B., Schneider B. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. – Journal of Glaciology, vol. 18, No. 79, 1977, p. 239-254.
- Kääh A., Haerberli W. Evolution of a high mountain thermokarst lake in the Swiss Alps. – Arctic, Antarctic and Alpine Research, vol. 33, 2001, p. 385-390.
- Mool P.K., Wangda D., Bajracharya S.R., Kunzang K., Gurung D.R., Joshi S.P. Inventory of glaciers, glacial lakes and Glacial Lake Outburst Floods. Bhutan. ICIMOD in cooperation with UNEP/RRC-AP, Kathmandu, Nepal, 2001.
- Richard D., Gay, M. 2003. GLACIORISK. Survey and prevention of extreme glaciological hazards in European mountainous regions. EVG1 2000 00512 Final report (01.01.2001 – 31.12.2003). <http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>
- Richardson S.D., Reynolds J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas. – Quaternary International, 65/66, 2000, p. 31-47.
- Reynolds J.M. (ed.). Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment. Report No R7816, Reynolds Geo-Sciences LTD, UK, 2003, 36 p.