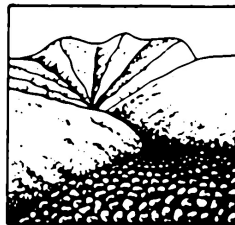


Труды Международной конференции

# **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: Geografgiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-5-91266-010-8

© Селевая ассоциация  
© Институт «Севкавгипроводхоз»

© Debris Flow Association  
© Sevkavgirovodkhoz Institute



## Дистанционный мониторинг прорывоопасных высокогорных озер на Памире

В.Г. Коновалов

*Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия*

## Remote sensing monitoring of the outburst-hazardous high mountain lakes in Pamir

V.G. Konovalov

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Изложен метод определения с помощью дистанционной информации важных характеристик режима прорывоопасных высокогорных озер: площадь, объем, максимальный расход прорывной волны. На основе морфометрических характеристик по 141 высокогорному озеру, дифференцированных на 4 группы в зависимости от размеров площади, получены эмпирические формулы для расчета объема озера как функции его площади и средней глубины. Определение максимального расхода прорывной волны для ряда озер, расположенных в бассейне р. Гунт и представляющих потенциальную угрозу городу Хорог и другим населенным пунктам, выполнено по формуле Коста (1985).

The paper describes a method of using remote sensing data to determine important characteristics for potentially dangerous mountain lakes: their area, volume and maximum discharge of the outburst wave. Empirical formulae for computation of lake volume as a function of its area and mean depth were obtained on the base of initial data for 141 lakes distributed into four groups. Maximum discharges of outburst wave were determined for a set of lakes located in the Gunt River basin on the basis of formulae of Costa (1985). These lakes could be the source of debris flows or flash floods which are potentially dangerous for Horog city and other settlements.

Опыт работы исследователей в различных странах показывает, что подавляющее большинство высокогорных озер имеют характерные признаки и достаточно легко идентифицируются на цветных изображениях горных областей со спутников LANDSAT, TERRA, IRS и других. Весьма трудоемкий процесс поиска небольших по площади озер и оцифровки их контуров поддается автоматизации после несложной предварительной обработки спутниковых изображений, как показано в работе (Батыров, Яковлев, 2004). В настоящее время в странах Азиатского материка с развитым современным оледенением (Китай, Индия, Непал, Бутан, Пакистан) в ряде речных бассейнов проведена сплошная каталогизация высокогорных озер и получены данные об их расположении, площади, и длине (Mool, Vajracharya, 2003; Mool et al, 2004; Horstmann, 2004;). По состоянию на 2001 год число этих озер равнялось 6391, а общая площадь 234.6 км<sup>2</sup>. В Швейцарии, США и Канаде многие годы выполняются исследования прорывоопасных гляциальных озер с целью совершенствования методов расчета их режима (Costa, 1985; Huggel, et al, 2003; Huggel, Kääb, Salzmann, 2004; Huggel, 2004; Lindsey, 2003; McKillop, 2006; Sakai et al, 2000). В России комплексные работы с применением современных методов получения и обработки данных о режиме ледниковых, моренных и моренно-ледниковых озер проводятся на Кавказе (Зимницкий, 2004-2005; Зимницкий, Николайчук, 2006; Черноморец, Петраков и др., 2007а, 2007б). Разнообразная информация о высокогорных озерах на территории Центральной Азии и Казахстана (в границах бывшего СССР) содержится в работах (Батыров, Яковлев, 2004; Виноградов, 1977, 1980; Шнитников, 1980; Никитин, 1977, 1986; Тукеев, 2002; Усубалиев, Ерохин, 2006) и дру-

гих авторов. Для территории Памира установлено (Тукеев, 2002), что в общем числе селевых явлений доля гляциальных селей составляет 22%, причем последствия их схода бывают наиболее разрушительными. Аналогичная картина наблюдается и в горах Казахстана. Характерной особенностью регрессивной фазы состояния современного горного оледенения Земли является наличие большого числа эфемерных ледниковых и моренно-ледниковых озер, служащих потенциальным источником гляциальных селей.

Одна из задач изучения опасных природных явлений, связанных с режимом оледенения в бассейнах рек Вахш и Пяндж, состояла в том чтобы выявить новые возможности использования спутниковых изображений для получения следующего состава характеристик высокогорных озер: площадь, объем, максимальный расход прорывной волны. Для целей каталогизации и мониторинга прорывоопасных озер Памира средствами аэрокосмического зондирования, наиболее подходящим является упрощенный метод расчета максимального расхода прорывной волны  $Q_{\max}$ , как эмпирической функции индекса подпруживания (dam-factor) равного произведению объема озера на высоту плотины (Costa, 1985). В работах (Huggel et al, 2002, 2004; Huggel, 2004) предлагается находить объем озера в зависимости только от его площади, которая легко определяется по данным дистанционного зондирования. Однако анализ результатов показывает, что одномерные зависимости  $V=f(F)$  и  $Q_{\max}=f(V)$ , то есть фактически  $Q_{\max}=f(F)$ , не обеспечивают удовлетворительное качество расчета  $Q_{\max}$ . Здесь  $F$  – площадь озера и  $V$  – его объем. Кроме того, статистические выборки, использованные в работах (Huggel et al., 2002, 2004; Huggel, 2004) для получения эмпирических зависимостей  $V=f(F)$  и  $Q_{\max}=f(V)$ , представляются недостаточно репрезентативными по составу и размеру. В связи с этим был предпринят поиск морфометрических характеристик прорывоопасных высокогорных озер гляциального генезиса в опубликованных материалах. В итоге была собрана представительная база данных по 141 озеру. База данных включает следующие характеристики озер: расположение, длина, ширина, средняя  $H_{\text{mean}}$  и максимальная глубина  $H_{\text{max}}$ , площадь, объем, ряд обобщенных параметров формы объекта (отношения: длины к максимальной глубине, длины к ширине, средней глубины к максимальной), высота над уровнем моря. Диапазон изменения площади от 0,00004 км<sup>2</sup> до 12 км<sup>2</sup>, объема от 0,00004 млн. м<sup>3</sup> до 500 млн. м<sup>3</sup>, средней глубины от 0,4 м до 83,3 м.

С целью определения объема озера как функции морфометрических характеристик были использованы одномерные и многомерные, линейные и нелинейные варианты аналитической аппроксимации. Поиск был проведен для исходных данных, распределенных на 4 группы, согласно условиям:  $F < 0.01$ ,  $0.01 \leq F < 0.2$ ,  $0.2 \leq F < 1.0$ ,  $1.0 \leq F \leq 12.0$ . Здесь  $F$  – площадь озера в км<sup>2</sup>. В итоге установлено, что кусочно-линейная аппроксимация обеспечивает наилучшее приближение функции  $V=f(H_{\text{mean}}, F)$  во всех четырех группах. Для малых значений аргументов в первой группе, когда возможны отрицательные значения функции, получены одномерные формулы  $V=f(F)$ .

Определение средней глубины  $H_{\text{mean}}$  и максимального расхода прорывной волны при катастрофическом сбросе воды из озера состоит из следующих этапов.

а) Идентификация контура озера на снимке со спутников LANDSAT 7 ETM+ или TERRA и оцифровка его в географических координатах;

б) Наложение контура на цифровую модель рельефа и определение с помощью ГИС площади озера  $F$ , его длины  $L$  и абсолютной высоты: уреза воды у плотины ( $Z_2$ ), верхней ( $Z_1$ ) и нижней ( $Z_3$ ) отметок плотины, разность которых дает высоту плотины  $\Delta Z = Z_1 - Z_3$ ;

в) Расчет средней глубины озера по формуле:

$$H = \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{\text{tg}(\arctg(L/H_2))} \quad (1)$$

где  $H_2 = Z_2 - Z_3$ .

г) Определение объема озера:  $V = F \bar{H}$  и

д) Расчет максимального расхода прорывной волны по формуле (Costa, 1985):

$$Q_{\max} = 3.8(\Delta Z V)^{0.61} \quad (2)$$

Коэффициент детерминации уравнения (2) равен 0.79.

Определение длины озера  $L$  и высоты подпруживающей плотины  $\Delta Z$  следует выполнять с помощью программных модулей ГИС ENVI путем наложения векторного контура озера на SRTM изображение местности, содержащее абсолютные высоты рельефа. В результате для выбранной части территории речного бассейна получаем вертикальный профиль высот рельефа, на котором хорошо видны поверхность озера, подпруживающая плотина и участки бассейна выше и ниже озера. Для расчета площади озера по его заданному контуру следует использовать стандартные программы, имеющиеся в составе различных ГИС. Далее, в зависимости от площади озера, выбираем подходящую формулу и находим объем озера.

Исследование распространения высокогорных гляциогенных озер в верховье Амударьи показало, что одним из наиболее подходящих применений системы мониторинга этих озер является защита города Хорог – столицы Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана от последствий катастрофического сброса воды из многочисленных озер в бассейне р. Гунт. Повсеместно здесь на склонах и в поймах рек в состоянии значительной гравитационной неустойчивости находятся рыхлые и слабоцементированные отложения, которые при избыточном увлажнении служат благоприятной средой для развития оползней и селей. Эти явления создают угрозу для населения и экономики сами по себе, независимо от существования озер. Например, мощный сель в начале августа 1962 года, который временно перекрыл реку Гунт с расходом воды  $176 \text{ м}^3/\text{сек}$  (Тукеев, 2002). Известно (Виноградов, 1977; Тукеев, 2002), что причиной прорыва гляциогенных озер может быть разрушение плотины, вследствие экстремального притока талой воды, а также попадания в озеро лавинных, селевых и оползневых масс. Следовательно, наличие озер может служить как основным фактором образования прорывной волны и (или) селя, так и многократно усиливать селевой процесс, разрушивший озерную плотину. В том и другом случае задачей системы защиты г. Хорог является оценка максимального расхода прорывной волны при разрушении плотины одного или нескольких вышерасположенных гляциогенных озер. Эти сведения для ряда озер в бассейне Гунта получены путем применения изложенных выше методов и приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчет максимального расхода прорывной волны.

| Озеро        | F, км <sup>2</sup> | h <sub>max</sub> , м | V, млн. м <sup>3</sup> | Q <sub>max</sub> , м <sup>3</sup> /с |
|--------------|--------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Турумтайкуль | 10,275             | 53,5                 | 80,869                 | 627,81                               |
| Зарашкуль    | 5,731              | 28,5                 | 41,894                 | 286,26                               |
| Чандара      | 3,285              | 37,5                 | 36,375                 | 310,48                               |
| 24           | 1,982              | 8,0                  | 9,809                  | 54,39                                |
| 25           | 1,198              | 7,0                  | 4,925                  | 32,94                                |
| Риванкуль    | 1,134              | 67,0                 | 37,980                 | 454,17                               |
| 34           | 1,093              | 24,0                 | 13,793                 | 130,89                               |
| 18           | 0,810              | 65,0                 | 6,857                  | 156,93                               |
| 27           | 0,734              | 12,0                 | 2,053                  | 26,83                                |
| 14           | 0,549              | 13,0                 | 2,106                  | 28,61                                |

Примечание: F – площадь озера, h<sub>max</sub> – максимальная глубина, V – объем, Q<sub>max</sub> – максимальный расход прорывной волны.

Впервые полученные оценки объема и максимального расхода прорывной волны для высокогорных озер в бассейне Гунта показывают, что эти водоемы представляют реальную угрозу для города Хорог и других населенных пунктов Горно-Бадахшанской автономной области Республики Таджикистан. Максимальный расход прорывной волны сравним, и даже превышает, максимальные значения расхода воды р. Гунт (гидропост Хорог) в июне, июле, августе, равные соответственно 468, 552 и 335 м<sup>3</sup>/с. Все населенные пункты в бассейне Гунта расположены в пределах досягаемости прорывной волны, которая, как известно (Horstmann, 2004; Sakai, 2000), распространяется с сохранением разрушительной силы на расстояние до 100 км и более.

Изложенная методика расчета параметров потенциально прорывоопасных высокогорных озер открывает новые возможности для совершенствования системы превен-

тивных мер по уменьшению ущерба от стихийных природных явлений в бассейнах рек Памира. Исследование проведено при поддержке гранта РФФИ № 05-05-64296.

### References

- Батыров Р.С., Яковлев А.В. Использование цифровых космических снимков ASTER TERRA для определения гляциальных озер. – Труды НИИ Ташкент, Гляциология горных областей, вып. 3 (248), 2004, с. 14–21.
- Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Ленинград: Гидрометеоздат, 1977, 155 с.
- Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Ленинград: Гидрометеоздат, 1980, 144 с.
- Зимницкий А.В., Николайчук А.В. Современное оледенение и приледниковые озера в верховьях Малки (Центральный Кавказ). – Изменения природной среды на рубеже тысячелетий. Труды международной электронной конференции. Тбилиси-Москва: Полиграф, 2006, с. 35–40.
- Зимницкий А.В. Формирование, распространение и динамика приледниковых озер Западного и Центрального Кавказа. Автореферат канд. дисс. Краснодар, 2005.
- Зимницкий А.В. Современное состояние и динамика приледниковых озер бассейна р. Баксан. – Тезисы докладов XIII Гляциологического симпозиума "Сокращение гляциосферы: факты и анализ". Санкт-Петербург, 24-28 мая 2004.
- Никитин А.М. Водные ресурсы и водный баланс озер и водохранилищ Средней Азии. – Труды САРНИГМИ, 1986, вып. 108 (189), 95 с.
- Никитин А.М. Морфометрия и морфология озер Средней Азии. – Труды САРНИГМИ, 1977, вып. 50 (131), с. 4–21.
- Тукеев О.В. Селевые явления Памира: Катастрофа, закономерности, прогноз. М., 2002, 176 с.
- Усубалиев Р.А., Ерохин С.А. Высокогорные озера как следствие деградации современного оледенения. – Гляциология в канун Международного полярного года. Симпозиум 9-12 октября 2006 г. Пушкинские Горы Псковской области. Тезисы докладов. Москва: Гляциологическая Ассоциация. 2006.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Тарбеева А.М. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-су (Кавказ). – Криосфера Земли, 2007 а, т. XI, № 1, с. 72–84.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Сейнова И.Б., Крыленко И.В. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия. – Материалы гляциологических исследований, вып. 102, 2007 б, с. 225–229.
- Шнитников А.В. (ред.) Озера Тянь-Шаня и их история. Ленинград: Наука, 1980, 230 с.
- Costa J. E. Floods from dam failures. Open-File Report 85-560. Denver, Colorado 1985, 54 p.
- Horstmann Britta. Glacial lake outburst floods in Nepal and Switzerland. – New Threats Due to Climate Change. Germanwatch, 2004. 12 p.
- Huggel C., Kääh A., Haeblerli W., Krummenacher B. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. – Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003, No. 3, p. 647–662.
- Huggel C., Kääh A., Haeblerli W., Teysseire P., and Paul F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. – Canadian Geotechnical Journal, 2002, No. 39, p. 316–330.
- Huggel C., Kääh A., Salzmann N. GIS-based modeling of glacial hazards and their interactions using Landsat-TM and IKONOS imagery. – Norwegian Journal of Geography, vol. 58, 2004, p. 61–73.
- Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and Glacial Lakes Outburst Floods. 2002, International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD) and United Nations Environment Programme (UNEP RRC.AP) ISBN:92 8115 3591.
- Lindsay D. Englacial Hydrology Related to an Outburst Flood from Hidden Creek Lake, a Glacially-dammed Lake in Alaska. Thesis for the Master of Science in Geology. Portland State University, 2003, 111 p.
- McKillop R.J. Objective preliminary assessment of outburst flood hazard from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia. MS Thesis. Simon Fraser University, 2005, 153 p.
- Mool P. K., Bajracharya S. R. Tista Basin, Sikkim Himalaya. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan region, ICIMOD, 2003, 145 p.
- Mool, P.K., Bajarachaya, S.R., Roohi, R., Asraf, A., Hussain, S.A. 2004. Upper Indus, Jhelum, Shingo, Shyok, and Shigar River basins. Pakistan Himalaya. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan region. 354 p.
- Sakai A., Chikita K., Yamada T. Expansion of a moraine-dammed glacial lake, Tsho Rolpa, in Rolwal-ing Himal, Nepal Himalaya. – Limnol. Oceanogr., vol. 45, No. 6, 2000, p. 1401–1408.