

СОВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПРИЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАВКАЗ, РОССИЯ)

Д.А.Петраков¹, А.А.Алейников², В.М.Кидяева¹, И.Н.Крыленко¹, С.В.Норин¹, И.Б.Сейнова², О.В.Тутубалина¹, С.С.Черноморец², М.С.Шахмина²

¹ – Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова;

² – Университетский центр инженерной геодинамики и мониторинга (УЦИГМ)

Прорывы прогляциальных озер известны человечеству с давних времен. Первые сведения о них в альпийских летописях относятся к концу XVI в., когда из-за прорыва озера у ледника Гьетро в Швейцарии погибло 140 человек [1]. 13 декабря 1941 г. прорыв озера Палькаоча в Перу привел к гибели 6000 человек и уничтожению части города Уарас [2]. Анонсированная средствами массовой информации угроза повторного прорыва в 2003 г. привела к убыткам в 20 млн. долларов из-за сокращения туристического потока [3]. Прорыв озера Диг Тшо в Непале (1985) нанес до 500 млн.\$ убытков из-за разрушения гидроэлектростанции и отказа от планов по сооружению более мощной ГЭС [4]. Рост темпов деградации оледенения, наблюдающийся в большинстве горных районах в последние годы, приводит к возрастанию количества опасных приледниковых озер [5]. От появления озера до его прорыва может пройти всего несколько лет, в результате ни власти, ни население не успевают подготовиться к грозящей опасности. Именно поэтому важно проводить мониторинг ледниковых озер от момента их образования до прорыва или заполнения наносами.

Объектом наших исследований стали приледниковые озера в Приэльбрусье. Несмотря на сравнительно небольшие площади и объемы озер в этом районе, их прорывы происходили неоднократно и приводили к разрушению инфраструктуры [6]. Целью работы было изучение изменений приледниковых озер в последние годы, оценка вероятности и моделирование потенциальных прорывов, зонирование риска и разработка системы раннего оповещения нижележащих территорий.

Опорным участком работ стала группа озер у края ледника Башкара (верховья р.Адылсу, рис.1), наблюдения за ними проводятся нами 1999 г. [7]. В программу мониторинга озер были включены ежегодные батиметрические съемки и картографирование береговой линии (с 2001 г.), повторные фототеодолитные съемки (1999, 2005 и 2007 гг.), наблюдения за ходом уровня воды в озерах (в теплый период, начиная с 1999 г.). Контуры береговой линии озер определялись как посредством тахеометрической съемки теодолитом Theo 010 В, так и при обходе озер по периметру с GPS-приемником "Garmin eTrex Summit". Промеры глубин выполнялись с надувной лодки по поперечникам через 15-30 м промерным комплексом "Garmin GPSmap 188 Sounder", в котором совмещены спутниковый навигатор и двухлучевой эхолот, работающий на глубинах от 0.5 до 100 м. Наблюдения за уровнем воды проводятся на временных уровневых постах. Съемка и промеры проводились в системе координат UTM (универсальная поперечная проекция Меркатора) на эллипсоиде WGS84. Дальнейшее построение карт, расчеты объемов воды в озерах и деформаций дна были выполнены в программах Surfer 8.0 и ArcView 3.2. Для оценки изменений площади оз. Лапа в 2006 и 2007 гг. помимо традиционных методов использовались космические снимки высокого разрешения (2 м/пикс.) EROS. Кроме того, летом 2007 г. при помощи доплеровского измерителя скоростей течения воды «Aanderaa» была исследована структура течений в озере Башкара. Начиная с 2008 г., для батиметрических съемок используется эхолот Lowrance 525CF, дающий информацию о глубине воды в виде эхограмм. Тогда же на оз. Башкара была установлена система раннего оповещения о прорыве, основанная на автоматическом датчике уровня воды АДУ-02. Оценка параметров возможного прорывного паводка по долине р. Адылсу проводилась на основе двумерных математических моделей движения водных

потоков River [8] и FLO-2D [9,10]. Для моделирования использовались: цифровая модель рельефа (ЦМР) долины р. Адылсу, составленная по карте 1957 г. масштаба 1:25000 и обновленная в прирусловой части долины летом 2008 г. по данным кинематической съемки с помощью дифференциальных GPS; космические снимки ASTER (15 м/пикс.) и EROS (2 м/пикс.) на исследуемую территорию; гидрограф прорыва озер, рассчитанный специалистами ОАО «Севкавгипроводхоз» по модели Ю.Б.Виноградова [11]. На других озерах проводились рекогносцировочные обследования, батиметрические и картографо-геодезические измерения. Для оценки изменений озер в последние десятилетия использовались топографические карты, разновременные аэро- и космические снимки.

Изменения площади и объема оз. Башкара за рассматриваемый период были обусловлены колебаниями уровня воды и зависели главным образом от времени проведения батиметрической съемки. Площадь озера изменялась в диапазоне 60-70 тыс.м², а объем – 675-1000 тыс.м³. Объем озера при постоянном уровне воды, приведенном к нулю временного уровня поста изменялся от 750 до 800 тыс. м³. Максимальные глубины озера составляют 34 м. Участок наибольших глубин имеет слабовытянутую форму и смещен к ледяному юго-западному берегу озера (рис. 2), здесь же находится участок дна с наибольшими уклонами. В отличие от оз. Башкара, нижние озёра в последнее время быстро разрастаются. В 2001 г. оз. Лапа имело размеры 120 на 90 м и максимальные глубины до 8 м, к 2006 г. его площадь увеличилась втрое, объем – в 5 раз, а максимальная глубина достигла 14 м (рис.2,3). Оз. Мизинчик, в 2001 г. имевшее близкие к оз.Лапа морфометрические параметры, заносилось флювиогляциальными отложениями и практически исчезло к 2005 г. По той же причине в 2008 г. объем воды в оз. Лапа уменьшился на 20% по сравнению с 2006 г. (рис.3). Быстрое разрастание оз. Лапа за 4 последних года привело к уменьшению ширины ледяной дамбы, подпруживающей оз. Башкара, с 500 до 250 м. Сезонная амплитуда колебаний уровней оз. Башкара обычно составляет 1.5 – 2 м. Наиболее высокие уровни наблюдаются в начале лета. К концу июня уровни незначительно понижаются и в течение лета остаются квазистабильны, в конце августа – начала сентября начинается быстрый спад уровня, в течение периода аккумуляции (октябрь – май) уровни минимальны. Суточный ход уровня оз. Башкара в летний период составляет в среднем 7-8 см при вечернем максимуме, обильные осадки могут повысить уровень на 20 см. За рассматриваемый период (1999 – 2008 гг.) наблюдалась тенденция к росту уровня воды в озере Башкара как летом, так и осенью. В 1999 - 2002 гг. уровни за соответствующие даты в летний период отличались незначительно, летом 2003 г. уровни воды в озере были на 0.4–0.5 м, а в 2005 г. на 1 м выше наблюдавшихся ранее. В 2006-2007 гг. роста уровня не наблюдалось, а 2008 г. он поднялся на 2 м выше предыдущего максимума, что привело к переливу воды через моренную плотину во внутриледниковую дренажную систему. Колебания уровня озера Лапа в течение летнего периода составляют 10-15 см, величина осеннего спада не превышает 30 см. Амплитуда колебаний уровней оз. Лапа в течение суток в летом достигает 10-15 см, в многолетнем плане уровень оз. Лапа достаточно стабилен.

Путем моделирования было установлено, что движение прорывной волны по долине р. Адылсу в случае формирования водного паводка или несвязного селя будет достаточно быстрым. Пик паводка достигнет устья реки (8 км от места прорыва) за 30 мин., до альплагеря «Джантуган» и палаточного городка – за 15 минут. Наибольшие глубины (до 9 м) будут наблюдаться в сужениях долины с крутыми берегами, каких достаточно много в среднем течении реки. Там же наблюдаются максимальные скорости течения (до 12,8 м/с при моделировании селевого потока и до 10 –12 м/с для водного). Большая часть внеусловных участков днища долины затопливается в среднем на 0,5 –1,5 м при средних скоростях течения 0,7-1,5 м/с. В сужениях поток заполняет все днище долины на ширину 20-30 м. При увеличении расхода площадь затопления изменяется здесь крайне незначительно. В расширениях днища в среднем и нижнем течении реки возможно растекание потока на 100-150 м (рис.4). В русле реки возможно разрушение опор мостов, а на внеусловных участках – разрушение легких деревянных строений. Жилые корпуса альплагеря

«Джантуган» и приюта «Очаг» находятся за пределами опасной зоны, а кемпинг напротив альплагеря может быть частично уничтожен селем.

По нашим данным, на 2005 г. площадь приледниковых озер в Приэльбрусье составляла около 500 тыс. м². В последние 50 лет в Приэльбрусье наблюдался четко выраженный тренд на возрастание площади приледниковых озер. На этом фоне выделяются озера Сылтранкель и Донгузорункель, площадь которых не увеличивалась. Наибольшие изменения за последние десятилетия претерпели приледниковые озера в верховьях р.Малка: по нашим данным, их площадь с 1957 по 2005 гг. выросла более чем в 6 раз и достигла 250 тыс. м² (рис.5). Динамичное развитие озер, наблюдавшееся здесь вследствие быстрого отступления ледников Бирджалычиран и Чунгурчатчиран, привело к прорывам некоторых из них. Так, между 2001 и 2005 гг. прорвалось озеро площадью около 80 тыс. м², но, по всей вероятности, объем воды в нем был невелик и формирования крупного селя не произошло. Летом 2006 г. нами был спрогнозирован прорыв озера площадью около 90 тыс. м² и объемом 550 тыс. м³. 11 августа произошел сброс 400 тыс. м³ воды, сформировавшийся селевой поток уничтожил инфраструктуру народного курорта Джилысу ниже по течению реки. На месте озера остались 4 небольших озера площадью около 13 тыс. м² [12].

По-видимому, основным механизмом водообмена оз. Башкара с ледником долгое время являлась медленная фильтрация воды. В ходе работ по исследованию структуры течений в озере летом 2007 г. значительных по пропускной способности каналов стока не было обнаружено. В связи с этим ход уровней озера в годовом разрезе определяется главным образом водообменом в системе "ледник – озеро" - накоплением воды в теле ледника и заполнением внутрiledниковых полостей в начале периода абляции и водоотдачей из тела ледника в последующий период, а не метеорологическими факторами (повышением температур воздуха, снеготаянием и абляцией). Рост уровня воды в озере за период наблюдений связан, вероятно, с перестройкой внутрiledниковой дренажной системы. Резкое увеличение темпов разрастания оз. Лапа в начале XXI века стало результатом закономерного отклика ледника Башкара на климатические аномалии на рубеже веков. Модель «River» проще в использовании, в то время как с помощью FLO-2D возможен учет многих местных факторов, таких как дороги, здания и т.д. Результаты моделирования движения водного паводка с помощью двух моделей отличаются слабо, что позволяет надеяться на реальность модельной картины. Можно предположить, что заиливание приледниковых озер флювиогляциальными отложениями или отход их от ледника и переход к квазистабильному состоянию более типичны, чем прорыв.

На сегодняшний день наиболее опасными в Приэльбрусье являются Башкаринские озера. Уровень воды в оз. Башкара изменяется на 1.5-4 м в течение года и зависит главным образом от особенностей водообмена между озером и ледником. Уровень оз. Лапа изменяется на порядок меньше и зависит преимущественно от абляции ледника, жидких осадков и температуры воздуха. Ложе оз. Башкара в последние годы стабильно, а объем воды в озере зависит от колебаний уровня. Площадь оз. Лапа с 2001 по 2008 гг. увеличилась в три, а объем в четыре раза вследствие отступления ледника Башкара и термокарста на мертвых льдах. В связи с риском для жизни людей, находящихся на опасных участках, установлены предупреждающие плакаты, разработана и апробирована система раннего оповещения о прорыве озера. Вероятность прорыва остальных приледниковых озер Приэльбрусья существенно ниже, а риск для инфраструктуры и жизни людей невелик. Не стоит, однако, забывать, что приледниковые озера – крайне динамичные объекты, поэтому следует продолжать их мониторинг.

Работы выполнены при поддержке РФФИ (проекты 09-05-00934, 07-05-00172, 08-05-92206 ГФЕН) и программы Science for Peace (проект 982143).

Литература

1. 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>
2. 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, pp. 239–254.
3. 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.
4. Richardson S.D., Reynolds J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas. // *Quaternary International*, 65/66, 2000, pp. 31-47.
5. Zemp M., van Woerden, J. (eds.) *Global Glacier Changes: facts and figures*. UNEP-WGMS, 2008, 88 p.
6. Petrakov D.A., Krylenko I.V., Chernomorets S.S., Tutubalina O.V., Krylenko I.N., Shakhmina M.S. Debris flow hazard of glacial lakes in the Central Caucasus. // In: D. Rickenmann and C. Chen, Editors, 4th Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, Chengdu, China. Rotterdam: Millpress, 2007, pp.703-714.
7. Беликов В.В., Милитеев А.Н. Двуслойная математическая модель катастрофических паводков. // В сб. "Вычислительные технологии", т.1. №3. Новосибирск. 1992, с.167-174.
8. Гнездилов Ю.А., Иващенко Е.Н., Красных Н.Ю. Оценка гипотетического прорыва озера Башкара. // Сб. трудов ОАО "Севкавгипроводхоз", вып.17, 2007, с.123-144.
9. 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*, т. XI, № 1, 2007а, с. 72-84.
10. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Сейнова И.Б., Крыленко И.В. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне г. Эльбрус 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия. // *Материалы гляциологических исследований*, вып. 102, 2007б, с. 211-215.
11. García R., López J.L., Noya M., Bello M.E., Bello M.T., González N., Paredes G., Vivas M.I., O'Brien J.S. Hazard mapping for debris flow events in the alluvial fans of northern Venezuela. // In: D. Rickenmann and C. Chen, Editors, 3rd Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, Davos. Millpress, 2003, pp. 589–599.
12. O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. // *Journal of Hydraulic Engineering*, 119, 2, 1993, pp. 244–261.

Подписи к рисункам.

Рис.1. Башкаринские озера в 2004 г. Оз. Башкара (а), оз. Лапа (большое слева) и Мизинчик (маленькое справа) (б).

Рис. 2. Батиметрическая схема оз. Башкара (а) и оз. Лапа (б) по состоянию на август 2005 г.

Рис. 3. Изменение площади и объема оз. Лапа за 2001-2008 гг.

Рис. 4. Схема возможных разрушений в долине р. Адылсу при потенциальном прорыве Башкаринских озер.

Рис. 5. Изменения приледниковых озер в верховья р.Малка в 1957 - 2005 гг. 1 - озера в 2005 г., 2 - озера в 1957 г., 3 - ледники в 2005 г., 4 - ледники в 1957 г., 5 - реки в 2005 г. (составлено по аэрофотоснимку 22 августа 1957 г. и космическому снимку МКС Kodak DCS760C 19 августа 2005 г.).