

Колебания уровня воды в горных ледниковых озерах Приэльбрусья

Water level fluctuations in mountain glacier lakes in the Elbrus region

КИДЯЕВА В.М.

Аспирант научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, veramkid@gmail.com

КРЫЛЕНКО И.Н.

Научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. геогр. наук, г. Москва

КРЫЛЕНКО И.В.

Научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. геогр. наук, г. Москва, makkaveev-lab@yandex.ru

ПЕТРАКОВ Д.А.

Старший научный сотрудник кафедры криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. геогр. наук, г. Москва, glaciarc@mail.ru

ЧЕРНОМОРЕЦ С.С.

Старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. геогр. наук, Москва, devdorak@gmail.com

KIDYAEVA V.M.

Postgraduate student of the Research Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows of the faculty of geography of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, veramkid@gmail.com

KRYLENKO I.N.

Scientist of the land hydrology department of the faculty of geography of the Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geography), Moscow

KRYLENKO I.V.

Scientist of the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and River Bed Evolution of the faculty of geography of the Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geography), Moscow, makkaveev-lab@yandex.ru

PETRAKOV D.A.

Senior scientist of the department of cryolithology and glaciology of the faculty of geography of the Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geography), Moscow, glaciarc@mail.ru

CHERNOMORETS S.S.

Senior scientist of the Research Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows of the faculty of geography of the Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geography), Moscow, devdorak@gmail.com

Ключевые слова: Приэльбрусье; ледниковое озеро; колебания уровня воды; водный баланс; абляция; температура воздуха; прорывы ледниковых озёр.

Аннотация: в статье рассмотрены многолетние, сезонные и суточные колебания уровня воды в некоторых ледниковых озерах Приэльбрусья (Центральный Кавказ, Россия). Оценены генетические составляющие колебаний уровня воды и их влияние на потенциальную опасность прорывов ледниковых озёр.

Key words: Elbrus region; glacier lake; water level fluctuations; water balance; ablation; air temperature; glacier lakes outbursts.

Abstract: long-term, seasonal and daily water level fluctuations in some glacier lakes in the Elbrus region (the Central Caucasus, Russia) are analyzed. Genetic components of the water level fluctuations and their influence on the potential hazard of the glacier lakes outbursts are evaluated.

Введение

Возникновение, активная деятельность, прорывы и исчезновение ледниковых озёр в горах являются естественными и закономерными проявлениями динамики оледенения [4]. Являясь сравнительно молодыми водными объектами, эти озера (рис. 1) развиваются динамично, иногда проходя стадии от формирования до прорыва за несколько лет.

Прорывы ледниковых озёр очень сложно прогнозировать. При этом их последствия — водные, селевые паводки и сели — могут нести большие разрушения ниже по долинам. Особенно это актуально там, где основная хозяйственная деятельность концентрируется в узких частях долин вдоль русел рек. В мировой истории известны случаи катастрофических прорывов горных озёр, ведущих к большому количеству жертв [4, 17] и высоким экономическим потерям [18].

Актуальность изучения ледниковых озёр определяется не только потенциальной опасностью их прорывов и формирования при этом разрушительных паводков и селей, но и возможностью их использования в хозяйственных и рекреационных целях. С учетом труднодоступности, большой изменчивости и слабой изученности таких озёр описание их гидрологического режима представляет научный интерес.

Объектом данного исследования были горные озера, которые имеют преимущественно ледниковое и подземное питание и подпружены ледниками и моренными отложениями. Предметом исследования стал их уровень режим, который рассматривается на примере некоторых озёр Приэльбрусья (Центральный Кавказ, Россия).

Приэльбрусье является популярным туристическим регионом, в горных долинах ниже изучаемых озёр находятся альплагеря и базы отдыха, а временные стоянки и ту-

ристические тропы имеются практически во всех долинах.

В данной статье рассмотрены колебания уровня воды как отражение разнообразных процессов, происходящих в ледниковых озерах, часть из которых может привести к прорывам. Цели исследования заключаются в анализе факторов, влияющих на многолетние, сезонные и суточные колебания уровня воды в этих озерах, и в оценке их вклада в фактический уровень, а также в выявлении связи между его колебаниями и опасностью прорывов.

Понимание природы изменчивости уровня воды даст представление о тенденциях развития ледниковых озёр и позволит усовершенствовать способы оценки вероятности их потенциальных прорывов.

Результаты исследования могут быть использованы для обоснования необходимости осуществления мониторинга наиболее опасных объектов и для настройки параметров системы оперативного дистанционного мониторинга их уровней.

Теоретический анализ. Генетические составляющие изменчивости уровня воды

В гидрологии принято выделять два основных типа колебаний уровня воды в озере — объёмные (водно-балансовые) и деформационные [9]. Однако при таком подходе не учитываются значимые для водоемов высокогорных районов изменения котловин под действием геодинамических процессов. На колебания уровней ледниковых озёр существенно влияют такие характерные для горных условий процессы,

как возникновение обвалов пород и льда, лавин, оползней, сейсмические толчки, формирование моренных отложений, а на озерах с ледовыми берегами — движение массивов прилегающих ледников, образование айсбергов, термоэрозия.

С учетом данных особенностей для анализа колебаний уровней ледниковых озер в работе был использован подход, аналогичный генетическому анализу изменчивости уровней воды в реках [1].

Разделим изменчивость уровней воды в ледниковых озерах на генетические составляющие: геодинамическую (включая гляциодинамическую), водно-балансовую, деформационную, биогенную и антропогенную. Биогенная и антропогенная составляющие практически не влияют на исследуемый тип водных объектов, поэтому в дальнейшем анализе не рассматриваются.

Изменение уровня воды в ледниковом озере в некоторый момент времени определяется по формуле:

$$\Delta H(t) = \pm \Delta H_{\text{геодинам}} \pm \Delta H_{\text{вод.баланс}} \pm \Delta H_{\text{деформ}} \quad (1)$$

где $\pm \Delta H_{\text{геодинам}}$, $\pm \Delta H_{\text{вод.баланс}}$, $\pm \Delta H_{\text{деформ}}$ — геодинамическая, водно-балансовая и деформационная составляющие уровня воды соответственно.

Геодинамическая составляющая определяется следующим образом:

$$\Delta H_{\text{геодинам}} = \pm \Delta H_{\text{тектон}} \pm \Delta H_{\text{термоэроз}} \pm \Delta H_{\text{седим}} \pm \Delta H_{\text{грав}} \quad (2)$$

где $\pm \Delta H_{\text{тектон}}$, $\pm \Delta H_{\text{термоэроз}}$, $\pm \Delta H_{\text{седим}}$, $\pm \Delta H_{\text{грав}}$ — тектоническая, термоэрозионная, седиментационная и гравитационная составляющие уровня воды соответственно.

Водно-балансовая составляющая записывается так:

$$\Delta H_{\text{вод.баланс}} = \Delta H_{\text{ледник}} + \Delta H_{\text{снег}} + \Delta H_{\text{дожд}} - \Delta H_{\text{сток}} - \Delta H_{\text{фильтр}} - \Delta H_{\text{испар}} \quad (2)$$

где $\Delta H_{\text{ледник}}$, $\Delta H_{\text{снег}}$, $\Delta H_{\text{дожд}}$, $\Delta H_{\text{сток}}$, $\Delta H_{\text{фильтр}}$, $\Delta H_{\text{испар}}$ — ледниковая, снеговая, дождевая, стоковая, фильтрационная и обеспечиваемая испарением составляющие уровня воды соответственно.

Под деформационной составляющей ($\pm \Delta H_{\text{деформ}}$) понимаются колебания уровня воды под воздействием ветра, атмосферного давления, образования или таяния ледяного покрова.

Объекты и методы исследований

По данным, полученным авторами в 2009 г., в Приэльбрусье в верховьях бассейнов рек Баксан и Малка (бассейн реки Терек) насчитывается около 36 ледниковых озер, расположенных на абсолютных высотах от 2000 до 3500 м (рис. 2). Наиболее крупными из них являются озера Сылтранкель, Донгуз-Орункуль, Малое Азау¹ (в долине реки Баксан), группа озер у ледника Башкара, группы озер в долине реки Малка



Рис. 1. Ледниковое озеро у ледника Бирджалычиран (фото В.М. Кидяевой, 2009 г.)

у ледников Бирджалычиран, Чунгурчатчиран и Микельчиран. Преобладающее большинство озер (30) — моренно-запрудные, Сылтранкель, Джаловчат и оба озера у ледника Кюкюртлю — каровые, Малое Азау — карово-моренное, Башкара — ледниково-запрудное. В регионе также периодически возникают и исчезают небольшие эфемерные наледниковые озера.

В статье использованы материалы исследований ледниковых озер, собранные с 1999 года учеными и специалистами географического факультета МГУ [8, 11-14,

16]. Данные озера также изучались сотрудниками Кубанского государственного университета [7] и Высокогорного геофизического института [2, 5]. При данном исследовании приоритетными объектами были озера у ледников Башкара и Бирджалычиран.

Ежегодные наблюдения за озерами Башкара и Лапа (в долине правого притока реки Баксан — р. Адылсу) были начаты в 1999-2000 гг. На озерах у ледника Бирджалычиран проводились экспедиционные исследования в 2006, 2009 гг. и рекогносцировоч-

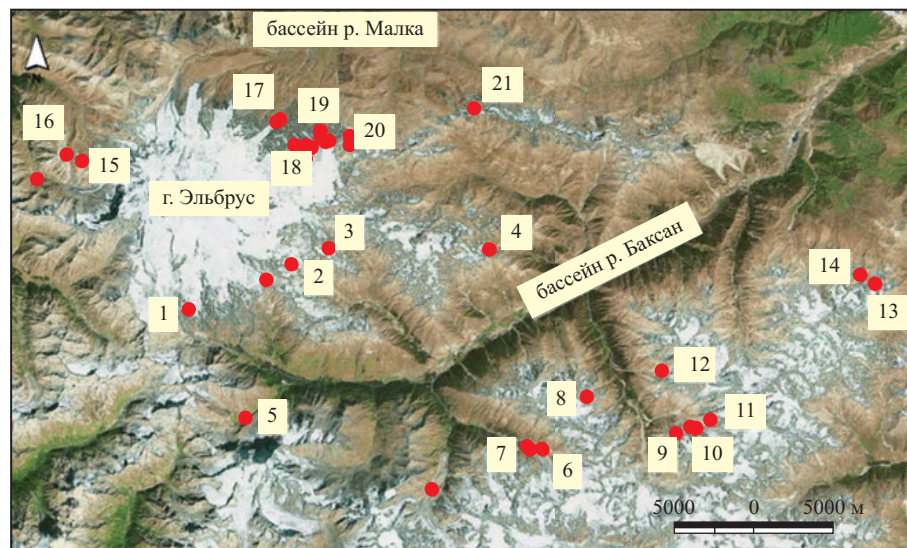


Рис. 2. Расположение ледниковых озер Приэльбрусья (основа схемы — космический снимок Landsat ETM+, 1999 г.): 1 — Малое Азау; 2 — Ирик; 3 — Ирикчат; 4 — Сылтранкель; 5 — Донгуз-Орункуль; 6 — Башкара; 7 — Лапа; 8 — Джаловчат; 9 — Азот; 10 — Кичкидарские озера (верхнее и нижнее); 11 — Юном; 12 — Суллакуль; 13 — Верхнее Сакашил; 14 — Нижнее Сакашил; 15 — Верхнее Кюкюртлю; 16 — Нижнее Кюкюртлю; 17 — Микельчиран; 18 — группа озер Бирджалычиран; 19 — группа озер Чунгурчатчиран; 20 — группа озер Балыксубаши; 21 — Карангуколь

ные обследования в 2010 г. Для изучения некоторых объектов (озер Малое Азау, Донгуз-Орункель, Сылтранкель, Азот, Микельчиран и др.) были организованы отдельные полевые экспедиции, остальные изучались дистанционно с использованием разновременных космо- и аэрофотоснимков высокого разрешения.

Колебания уровня воды фиксировались по закрепленным стационарным футштокам, представляющим собой расположенные на берегах озер маркированные крупные камни с известными отметками высот. При исследовании также велись наблюдения за метками высоких вод, которые остаются на берегах в процессе сезонных колебаний уровней объектов с высокой мутностью.

Кроме отметок уровней были собраны данные по морфометрии озер, построены батиграфические кривые, описано состояние водоудерживающих перемычек и пр. [8, 12]. Морфометрические характеристики некоторых изученных озер приведены в табл. 1.

По озерам Башкара и Лапа имеются наиболее полные гидрометрические и гидрологические данные благодаря более чем десятилетнему периоду наблюдений. По результатам повторных батиметрических съемок были описаны ежегодные изменения их котловин, по результатам геофизических съемок — изменения языка ледника Башкара и моренных отложений, была изучена структура течений, проведено гидрофизическое зондирование водной массы и другие исследования [16].

В 2008 г. на озере Башкара был впервые установлен автоматический уровнемер АДУ-02 (точность 0,01 м), работающий по гидростатическому принципу (измерение давления, создаваемого столбом жидкости над датчиком) с дистанционной передачей данных через систему радиомодемов. Запись измеренных значений

уровня осуществлялась круглосуточно с периодичностью 1 ч, что позволило выявить его внутрисуточные колебания в безледный период.

Для выявления связи между колебаниями уровня воды и температурой воздуха использовались данные откалиброванных температурных датчиков-логгеров UTL (точность 0,1°C) и IButton (точность 0,5°C), установленных на берегу озера Башкара. Измерение и запись приземной температуры воздуха датчики проводили каждые 4 ч в течение года. Для анализа были использованы следующие ряды: (1) по уровню воды — с 23.06.2008 г. по 30.09.2008 г. и с 21.06.2009 г. по 26.09.2009 г.; (2) по температуре воздуха — с 24.07.2008 г. по 21.07.2009 г.

Среднесуточные значения температуры и уровня были нормированы по формуле линейного масштабирования, которая позволяет ранжировать величины от 0 до 1 путем вычитания из каждой минимального значения внутри ряда и деления результата на разницу между максимальным и минимальным значениями [6]. Затем были удалены линейные тренды посредством выполнения процедуры простой регрессии — путем вычитания из каждой величины ряда соответствующей ей расчетной величины, полученной из линейного уравнения тренда. Остатки были проанализированы с помощью метода, аналогичного методу соответственных уровней, то есть сопоставлялись даты наступления локальных минимумов и максимумов рассматриваемых характеристик. По значениям локальных экстремумов были рассчитаны диапазоны изменений температур и уровней. Им были присвоены соответственно положительные или отрицательные знаки для учета направлений колебаний. По полученным значениям была построена зависимость размаха колебаний уровня воды от размаха колебаний температуры.

Результаты исследований

Многолетние колебания уровня воды

На стадии образования ледниковых озер существует многолетняя тенденция роста уровня воды, что является естественным процессом, который продолжается до тех пор, пока не появится устойчивый поверхностный, подземный или подледный канал стока или не произойдет прорыв. Озёра с такой тенденцией располагаются, например, у ледника Бирджалычиран (оз. Бирджалычиран-2 и др.).

Водоёмы с отсутствием поверхностного стока испытывают значительные по размаху (до 2-4 м) многолетние колебания уровня. После образования устойчивого канала стока они стабилизируются.

Анализ наблюдений за уровнем нижнего озера (оз. Лапа) у ледника Башкара с 1999 по 2011 г. показал, что в многолетнем плане размах его колебаний не превышает 1 м благодаря устойчивому каналу стока. Данный тип колебаний уровня характерен для большинства сточных и периодически сточных ледниковых озер Приэльбрусья.

На этапе стабилизации режима значительную роль в ледниковых озерах начинает играть процесс седиментации, результатом которого становится уменьшение глубин, понижение уровня воды и постепенная трансформация озера в флювиогляциальный заандр. Тенденция к такому развитию наблюдается, например, для озер Донгуз-Орункель и у ледника Микельчиран.

Для некоторых ледниковых озер можно проследить цикличность развития. Для колебаний многолетних уровней воды в них характерны сменяющие друг друга периоды роста и стабилизации. Примером может служить озеро у ледника Малый Азау, многолетний уровень которого увеличивался с момента образования до прорыва в 1978 г. После прорыва наблюдался период стабильности до начала 2000-х гг., а затем

Таблица 1

Характеристики некоторых ледниковых озер Приэльбрусья								
Название озера	Дата полевого обследования	Высотная отметка уреза воды, м (над уров. моря)	Площадь зеркала F, тыс. м²	Объем W, тыс. м³	Длина L, м	Ширина B, м	Сред. глубина h _{ср} , м	Макс. глубина, h _{max} , м
Сылтранкель	26.08.2005	3186	149,4	2114,8	575	260,0	14,2	36,2
Башкара	26.08.2012	2568	58,8	767,8	341	172,0	13,1	33,2
Донгуз-Орункель	29.09.2004	2515	59,7	440,6	598	100,0	7,4	15,6
Бирджалычиран-4	11.08.2009	3170	51,8	184,6	394	131,5	3,6	10,4
Лапа	26.06.2012	2482	42,2	242,9	408	103,4	5,8	16,1
Азот	06.08.2009	3197	20,6	128,1	270	76,3	6,2	19,3
Малое Азау	26.06.2011	3264	26,0	67,7	279	93,0	2,6	7,8
Бирджалычиран-2	10.08.2009	3307	27,0	56,9	298	90,6	2,1	6,3
Микельчиран	13.08.2009	3262	10,3	17,9	156	66,0	1,7	4,5

опять начался рост уровней, который в сочетании с термоэрозией привел к прорыву в 2011 г.

Прорыв озера у ледника Малый Азау в 1978 г. был вызван падением в водоем ледового блока с языка ледника [11]. Другие масштабные гравитационные события, приводящие к изменениям режимов многолетних уровней, на исследованных озерах обнаружены не были.

Термоэрозия в сочетании с очень высокой температурой озера стала причиной прорыва ледникового озера в восточной части предполья ледника Бирджалычиран в 2006 г. [13]. После протаивания и последующего размыва перемычки, сложенной мертвым льдом, озеро перестало существовать.

Отдельно следует отметить озера, на многолетние колебания уровней воды в которых большое влияние оказывают процессы, происходящие в близлежащих ледниках. Так, на озере Башкара в 2008 г. произошла перестройка каналов стока, изменившая его уровеньный режим. До 2008 г. у него не было поверхностного стока, вода стекала по внутриледным или подледным каналам ледника Башкара и частично фильтровалась. Затем произошли изменения в процессе водообмена ледника и озера (вероятно, закупорка внутриледниковых каналов стока), которые вызвали значительное повышение уровня и образование поверхностного перелива воды. В 2008 г. было отмечено повышение среднемноголетнего уровня на 2 м по сравнению с наблюдениями за период с 1999 по 2007 г. (рис. 3). Максимальный уровень воды составил 2590,65 м над уровнем моря, что на 4 м больше предыдущего максимума. В последующие годы уровень озера был недостаточен для поверхностного перелива, но устойчивая фильтрация через моренную глыбовую запруду продолжилась. Сток обнаруживался на расстоянии около 20-30 м от озера и на 3-5 м ниже отметки уреза воды.

Сезонные колебания уровня воды

В большинстве ледниковых озер Приэльбрусья сезонные колебания уровня воды не превышают 3 м. По результатам обследования в августе 2009 г. было установлено, что отметки высоких вод озер Азот, Юном, Верхнее Кичкидарское, Нижнее Кичкидарское расположены на высоте 1,6; 0,2-0,3; 0,15; 1,0-1,2 м от уреза воды соответственно. Метки высоких вод озера Чунгурчатчиран находились на высоте 3 м от уреза, были хорошо видны обсохшие береговые отмели (рис. 4).

На озере Башкара сезонные колебания уровня составляют около 3 м. В начале периода абляции оно наполняется водой и его уровень повышается по сравнению с межженным на 2-3 м. Максимальные уровни воды наблюдаются в конце мая — начале июня. С середины июня начинается их постепенный спад. Более выраженный характер уровень принимает в последней декаде августа. В начале межженного периода он минимален (рис. 5). Ледостав начинается при минимальных отметках около 2584 м. Колебания уровня воды в течение 2008 г.

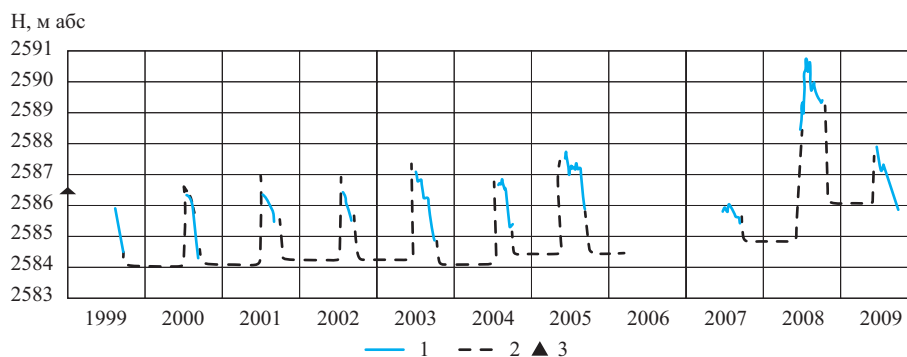


Рис. 3. Многолетние колебания уровня воды в озере Башкара с 1999 по 2009 г.: 1 — измеренные отметки уровня в летний период (июнь-октябрь); 2 — гипотетический ход уровня в зимний период (ноябрь-май); 3 — нуль футштока 2586,55 м над уровнем моря

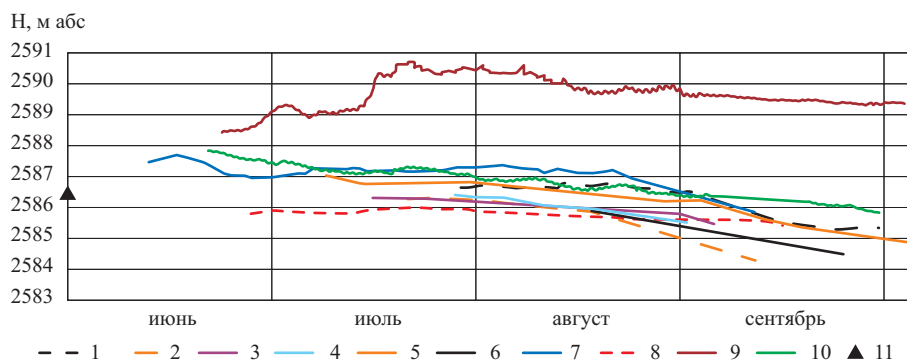


Рис. 4. Сезонные колебания уровня воды в озере Башкара в теплый период (июнь-октябрь) за годы: 1 — 1999; 2 — 2000; 3 — 2001; 4 — 2002; 5 — 2003; 6 — 2004; 7 — 2005; 8 — 2007; 9 — 2008; 10 — 2009 (11 — нуль футштока 2586,55 м над уровнем моря)



Рис. 5. Обсохшие береговые отмели озера у ледника Чунгурчатчиран (фото В.М. Кидяевой, 2009 г.)

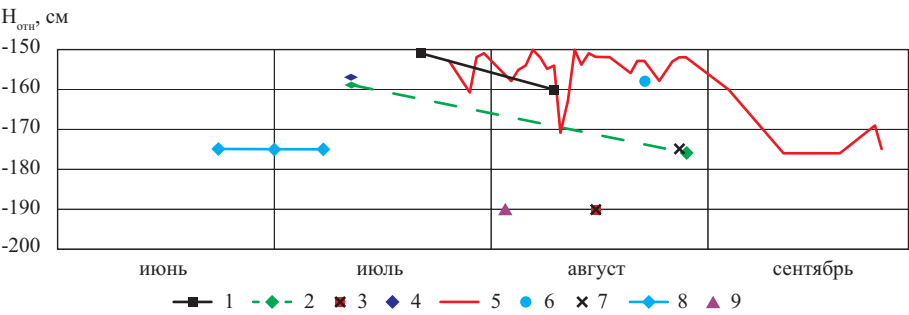


Рисунок 6. Сезонные колебания уровня в озере Лапа в теплый период (июнь–сентябрь) за годы: 1 – 2000; 2 – 2001; 3 – 2002; 4 – 2003; 5 – 2004; 6 – 2005; 7 – 2006; 8 – 2008; 9 – 2009. Наблюдения за уровнем имели непостоянный характер. Точками отмечены единичные результаты его измерения в отдельные годы. Уровень воды представлен в сантиметрах относительно условного нуля футштока, расположенного на берегу озера

были нетипичными для этого озера: рост уровня воды впервые за период наблюдений продолжался до середины лета, достигнув максимума в середине июля. Размах сезонных колебаний уровня воды в озере Лапа значительно меньше, чем у Башкары в связи с наличием устойчивого канала стока. Колебания уровня в течение летнего периода составляют 0,10–0,15 м, величина сезонного осеннего спада не превышает 0,3 м (рис. 6). Сопоставление графиков колебаний уровня воды в озере Башкара и температуры воздуха с суточным осреднением показало наличие связи между этими характеристиками. Для анализа были выбраны периоды плавной сезонной сработки озера в периоды абляции в 2008 и 2009 гг. (рис. 7). На основной тренд сезонного понижения уровня накладываются периодиче-

ские колебания, зависящие от метеорологических факторов — изменений температуры воздуха, количества выпавших осадков, облачности. Цикличность колебаний данного генезиса для исследованных рядов составляет от 4 до 11 дней (в среднем около 7 дней). После нормирования среднесуточных значений и удаления линейного тренда были проанализированы даты локальных экстремумов. Между датами наступления соответственных локальных минимумов и максимумов колебаний температуры воздуха и уровня воды в июле проходило 1-2 дня, в августе — 2-3 дня, а в сентябре они совпадали (табл. 2). Максимальный размах колебаний уровня воды относительно тренда составил 0,6 м, средний — 0,2–0,3 м. Полученная линейная зависимость между размахом коле-

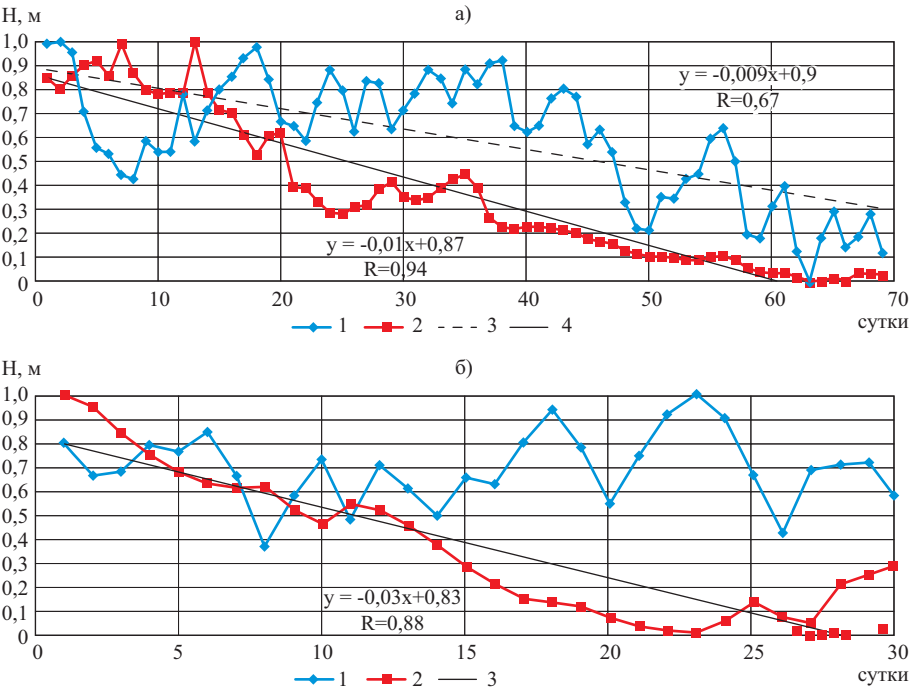


Рис. 7. Среднесуточные колебания уровня воды Н, м (вертикальная ось), в озере Башкара: а – в августе–сентябре 2008 г.; б – в июле 2009 г. Шкала времени приведена в днях от начала ряда, 1 – температура воздуха, 2 – уровень воды, 3 – линейный тренд температуры, 4 – линейный тренд уровня, R – коэффициент корреляции

баний температуры воздуха и уровня воды описывается следующим уравнением:

$$P_H = 0,03P_T - 0,03, \tag{4}$$

где P_H — размах колебаний уровня воды за исследованный период, м; P_T — размах колебаний температуры воздуха за исследованный период, °С (рис. 8); коэффициент корреляции равен 0,56.

Суточные колебания уровня воды

Суточные колебания уровня воды являются наименьшими по размаху. При прорывах озер уровень воды за сутки может понизиться на несколько метров, но в данном случае мы рассматриваем не аномальные, а режимные изменения. Суточные колебания уровня воды в озере Башкара в период абляции составили 0,07–0,20 м. В 2008 г. был отмечен максимальный суточный рост уровня за период наблюдений (0,7 м) [16]. Максимальные значения уровня наблюдаются в вечерние и ночные часы — с 19.00 до 3.00, минимальные — утром до полудня, чаще всего с 10.00 до 12.00. Максимальные значения температуры воздуха обычно наблюдаются днем, около 15.00. Сдвиг пика суточного хода уровня относительно пика температур составляет от 4 до 10-12 ч. В начале периода абляции графики суточных колебаний уровня имеют плавный вид (рис. 9, а). С середины июля меняется характер суточного хода: на фоне общего изменения уровня появляются мелкопериодические колебания размахом 0,02–0,05 м. Как видно на рис. 9, б, суточные колебания теряют свою плавность, падение и повышение уровня происходит резко, графики имеют пилообразный вид. В сентябре суточные колебания уровня постепенно затухают, их размах не превышает 0,05 м.

Обсуждение результатов. Влияние отдельных генетических составляющих изменчивости уровней воды на опасность прорывов ледниковых озер

На многолетние колебания уровней воды в ледниковых озерах влияют тектонические, гравитационные, термоэрозионные процессы и масштабные изменения в водном балансе. Имеющихся данных наблюдений для выявления влияния тектонических процессов недостаточно. Характерные для горных условий гравитационные процессы повышают потенциальную опасность возникновения на озерах кратковременных аномальных по величине колебаний уровней, которые могут привести к прорывам. Предпосылки к возникновению обвалов, оползней, подвижек льда, обрушению ледовых стен, айсбергов существуют на всех ледниковых озерах, однако более опасными для населения и хозяйства нижележащих долин являются водоемы с большими объемами воды. Таких крупных озер в исследуемом регионе два — Сылтранкель и Башкара (см. табл. 1).

Термоэрозионные процессы распространены на озерах при контакте воды с температурой 0–12 °С с подпруживающими ее ледовыми берегами или мерзлыми моренными толщами. Наиболее опасными являются водоемы, подпруженные ледниками или мертвыми льдами [3]. Например, прорыв озера у ледника Бирджалычиран привел к образованию мощного селевого потока на реке Бирджалысу и разрушению построек на минеральных источниках Джилысу [14]. Понижение уровня при образовании прорана в ледовой толще может происходить в течение нескольких часов (до суток), после этого озера чаще всего перестают существовать. В случае наличия предпосылок к возникновению термоэрозионных процессов можно говорить о практически 100%-ной вероятности прорыва озера.

Режим многолетних колебаний уровней воды в ледниковых озерах стабилен при наличии поверхностного стока. При отсутствии поверхностного стока или перестройке внутриледниковых, фильтрационных и других каналов стока прилегающих ледников возникают масштабные изменения в водных балансах озер, что может приводить к их прорывам.

Сезонные колебания уровней воды в ледниковых озерах Приэльбруса могут достигать 1–5 м. Они зависят от водного баланса, основной приходной частью которого является талый ледниковый сток, в т.ч. поступающий вследствие таяния погребенных льдов и мерзлых льдонасыщенных пород [10].

Проведенный на примере озера Башкара анализ позволил сделать предположение, что в течение периода абляции меняются характер и структура питания ледниковых озер. В начале периода абляции источниками питания являются преимущественно талые воды от снежников и снега, покрывающего ледники. По мере продвижения нулевой изотермы вверх по склону наблюдается увеличение времени поступления талой воды в озеро от 1-2 до 3 дней и более. Одновременно с этим происходит увеличение площади поверхности ледника, очищенного от снежного покрова, и увеличение части водосбора озера, на которой происходит таяние. Время добегания талых ледниковых вод по внутриледниковым каналам стока измеряется часами. В связи с этим к концу периода абляции (сентябрь) наблюдается совпадение дат максимумов суточных температур воздуха и уровней воды.

Влияние колебаний температуры воздуха на уровень воды в озере Башкара позволяет проанализировать полученная зависимость (см. рис. 8). Из графика, представленного на рис. 8, видно, что понижение температуры воздуха вызывает более сильное изменение уровня воды (по модулю), чем ее повышение. Это связано с особенностью взаимодействия системы «ледник — озеро». При повышении температуры воздуха увеличиваются расходы воды во внутриледниковых каналах стока, начинается их механическая абляция, некоторое время уходит на их расширение. В результате поступление воды в озеро задерживается. При понижении температуры воздуха

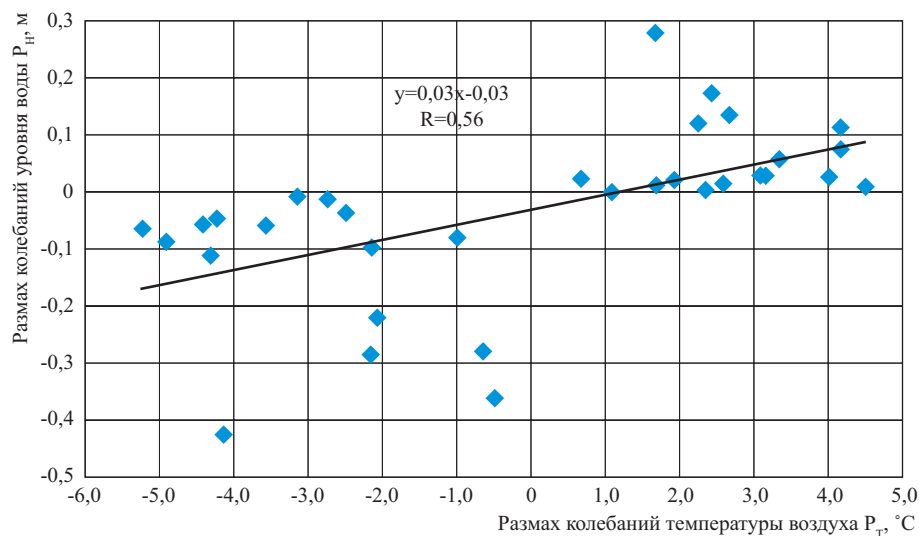


Рис. 8. Зависимость между размахами колебаний среднесуточной температуры воздуха и уровня воды в озере Башкара. R — коэффициент корреляции

Таблица 2

Даты наступления максимальных и минимальных среднесуточных значений температуры воздуха и уровня воды в озере Башкара				
Год	Даты наступления локальных экстремумов		Разница, сут.	Хар-ка
	темпер. воздуха	уровня воды		
2009	24.06.09	28.06.09	4	макс.
	28.06.09	30.06.09	2	мин.
	30.06.09	01.07.09	1	макс.
	02.07.09	03.07.09	1	мин.
	04.07.09	07.07.09	3	мин.
	08.07.09	09.07.09	1	макс.
	10.07.09	11.07.09	1	мин.
	13.07.09	15.07.09	2	макс.
	16.07.09	17.07.09	1	мин.
	17.07.09	20.07.09	3	макс.
	31.07.08	02.08.08	2	мин.
2008	04.08.08	05.08.08	1	макс.
	05.08.08	10.08.08	5	мин.
	10.08.08	12.08.08	2	макс.
	14.08.08	16.08.08	2	мин.
	18.08.08	20.08.08	2	макс.
	20.08.08	22.08.08	2	мин.
	23.08.08	26.08.08	3	макс.
	27.08.08	29.08.08	2	мин.
	29.08.08	03.09.08	4	макс.
	04.09.08	05.09.08	1	макс.
	06.09.08	06.09.08	0	мин.
	07.09.08	08.09.08	1	макс.
	10.09.08	10.09.08	0	мин.
	17.09.08	17.09.08	0	макс.
	20.09.08	20.09.08	0	мин.
	22.09.08	22.09.08	0	макс.
	24.09.08	24.09.08	0	мин.

каналы стока не меняются, при этом таяние ледника сильно снижается, а расход из озера остается неизменным. Нужно отметить, что данная зависимость имеет погрешности из-за невозможности отсечь другие водно-балансовые факторы (например, осадки), влияющие на повышение уровня воды.

Прорывы ледниковых озер в результате изменений сезонных водных балансов могут иметь разнообразные причины, обычно взаимосвязанные друг с другом [15]. Наиболее потенциально опасными являются процессы переформирования каналов стока и подвижки внутри ледников, вызывающие блокировку стока, однако такие процессы в рассматриваемом регионе вероятны только на озере Башкара.

Прорывы озер водно-балансового генезиса также могут возникнуть в результате превышения критических температур воздуха и количества осадков, установленных для гляциальных селевых очагов Центрального Кавказа [19], однако за последние десятилетия подобных событий на изучаемой территории отмечено не было.

Суточный ход уровня воды в ледниковом озере определяется балансовой и деформационной генетическими составляющими. Деформационная составляющая нивелировалась при измерениях уровнем, поэтому в анализ не попала. Суточные колебания уровня в основном связаны с изменениями интенсивности таяния ледника и снежного покрова, а также с выпадением осадков. Для озера Башкара они в среднем не превышают 0,2 м.

Изменение характера суточного хода уровней воды происходит в связи с изме-

нениями в структуре питания ледниковых озер в течение периода абляции. При преобладающем таянии снега и фирна время добегания воды измеряется сутками и колебания уровня в озере плавные. Таяние льда происходит неравномерно, но талая ледниковая вода быстро добегают до водоема, в связи с чем в суточном ходе уровня появляются острые неравномерные пики. К концу периода абляции суточный ход уровней находится в пределах точности измерений.

Заключение

На многолетние колебания уровней воды в ледниковых озерах существенно влияют тектонические, гравитационные, термоэрозийные и водно-балансовые процессы. Их размах в озерах с наличием поверхностного стока существенно меньше, чем в водоемах с подземным или подледным стоком.

Особенностью сезонных колебаний уровня воды являются изменения соотношения талого снежного и ледникового притока в водном балансе в течение периода абляции. Эти колебания в период абляции можно разделить на три этапа в зависимости от основного типа питания: (1) когда преобладает снеговое питание (приток воды в озеро начинается через 1–2 дня после начала таяния); (2) когда основным является снеговое питание из наиболее высоких снежников водосбора (приток воды в озеро начинается через 3 дня и более после начала таяния); (3) когда преобладает ледниковое питание (вода начинает поступать в озеро в тот же день).

Первый этап продолжается с начала периода абляции до середины июля, второй заканчивается в конце августа, третий — в конце периода абляции. На первом этапе суточный ход уровня воды имеет плавные изменения, на втором и третьем — пилообразные, а к концу третьего периода уровень почти не изменяется.

Понижение температуры воздуха вызывает более сильное по модулю понижение уровня воды, чем ее повышение.

Прорывы ледниковых озер Приэльбрусья возможны в следующих случаях: (1) при крупномасштабных гравитационных процессах; (2) при термоэрозийных процессах; (3) при изменениях в системах водообмена ледников и озер; (4) при блокировках каналов стока различного генезиса; (5) при превышении критических температур воздуха и количества осадков [18]. Вероятность прорыва озера при этом будет зависеть и от степени устойчивости водоудерживающих перемычек.

Результаты исследования генетических составляющих колебаний уровней воды в ледниковых озерах, приведенные в данной статье, могут стать предпосылками для дальнейшего долгосрочного и краткосрочного прогнозирования прорывов. Одной из наиболее очевидных областей применения полученных результатов является размещение и настройка систем дистанционного оперативного мониторинга уровней. При выборе наиболее опасного объекта для проведения мониторинга можно руководствоваться результатами анализа генетических составляющих колебаний уровня, при настройке систем — полученными выводами о режиме и размахах этих колебаний.

Опыт установки системы оперативного мониторинга (на основе измерительного комплекса АДУ-02) на озере Башкара в 2008 г. показал, что при отсутствии информации о режиме колебаний уровня воды велика вероятность ложного срабатывания сигнала. Были установлены два критических параметра, при которых срабатывал аварийный сигнал: (1) достижение критической отметки уровня воды в озере (2590,65 м над уровнем моря), при которой мог начаться перелив воды; (2) понижение уровня более чем на 20 см между двумя измерениями через 15 минут (что отражало бы критическое опорожнение озера). К счастью, прорыва озера Башкара в 2008 г. не произошло, а возникший перелив не привел к каким-либо серьезным последствиям.

Авторы выражают благодарность А.А. Алейникову, В.В. Носань, С.В. Норину, В.Г. Пастухову, А.А. Петриге, И.Б. Сейновой, В.В. Суркову, А.М. Тарбеевой, О.В. Тутубалиной, М.С. Шахминой и другим сотрудникам и студентам географического факультета МГУ за участие в сборе фактических данных; В.В. Поповнину, У.Д. Курданову, С.И. Шагину за содействие в организации работ. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 10-05-01127, 10-05-00357, 12-05-00391, 12-05-91178), Программы поддержки ведущих научных школ (проекты НШ-3271.2010.5, МК-7722.2010.5) и Программы NATO Science for Peace.

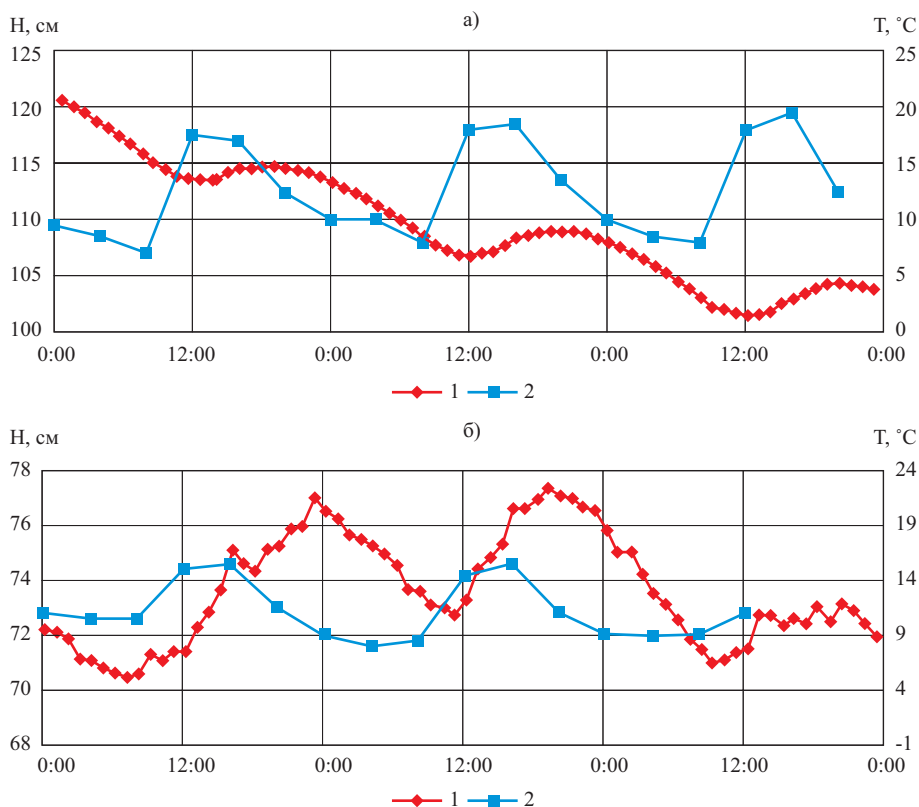


Рис. 9. Суточные колебания уровня воды H и температуры воздуха T на озере Башкара летом 2009 г.: а — с 23 по 25 июня; б — с 19 по 21 июля (1 — уровень воды, 2 — температура воздуха)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Ободовский А.Г., Самохин М.А. Механизмы изменения уровней воды в реках // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 4. М.: Изд-во Московского ун-та, 2005. С. 216-237.
2. Багов А.М., Докукин М.Д., Савернюк Е.А. Особенности деградации ледников Бирджалычиран и Чунгурчатчиран северо-восточного подножия Эльбруса и эволюция приледниковых озер за 50 лет // Материалы Международной научной конференции «Гляциология в начале XXI века». Москва, 15-16 октября 2009 г. М.: Университетская книга, 2009. С. 156-161.
3. Богаченко Е.М., Зимницкий А.В., Ильичев Ю.Г. Исследование гляциальных озер Приэльбрусья на предмет их потенциальной селевой опасности // Труды Всероссийской конференции по селям, 26-28 октября 2005 г. М.: ЛКИ, 2008. С. 175-181.
4. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: ГИМИЗ, 1977, 154 с.
5. Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Багов А.М., Маркина А.В. О перестройке гидрографической сети северо-восточного подножия Эльбруса / Лед и снег. 2012. № 2 (118). С. 23-30.
6. Земцов С.П., Крыленко И.Н., Юмина Н.М. Социально-экономическая оценка риска наводнений в прибрежных зонах Азово-Черноморского побережья Краснодарского края // Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей / под ред. проф. К.П. Колтерманна, С.А. Добролюбова, Н.И. Алексеевского. Триумф Москва, 2012. С. 86-96.
7. Зимницкий А.В. Формирование, распространение и динамика приледниковых озер Западного и Центрального Кавказа (в границах России): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Краснодар: Изд-во КубГУ, 2005.
8. Крыленко И.Н., Петраков Д.А., Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Шахмина М.С., Крыленко И.В., Норин С.В. Дистанционный и наземный мониторинг ледниковых озер Центрального Кавказа // Труды Международной Центрально-Азиатской конференции «Дистанционное зондирование Земли и геоинформационные системы», Алматы, 2008. CD-ROM. С. 3.
9. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2008. 463 с.
10. Познанин В.Л. Особенности механизма формирования прорывных гляциальных селей (на примере бассейна реки Темир в Дагестане): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1978. 29 с.
11. Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья (эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 204 с.
12. Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Шахмина М.С. Дистанционный мониторинг ледниковых озер на Центральном Кавказе // Сборник тезисов 4-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 13-17 ноября 2006 г. М.: Изд-во ИКИ РАН, 2006. С. 194. URL: <http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=543>.
13. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Крыленко И.В., Тарбеева А.М. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 1. С. 72-84.
14. 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. 2007. № 102. С. 211-215.
15. Huggel C., Haeberli W., Käab A., Bieri D., Richardson S. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps // Canadian Geotechnical Journal. 2004. V. 41. P. 1068-1083.
16. Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyaeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., Seynova I.B. Monitoring of Bashkara glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst // Natural Hazards. 2012. V. 61. № 3. P. 1293-1316.
17. Richard D., Gay M. Glaciorisk. Survey and prevention of extreme glaciological hazards in European mountainous regions: EVG1 2000 00512 Final report (01.01.2001 — 31.12.2003). 2003. URL: <http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>.
18. Richardson S.D., Reynolds J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas // Quaternary International. 2000. V. 65-66. P. 31-47.
19. Seynova I.B., Andreev Y.B., Krylenko I.N., Chernomorets S.S. Regional short-term forecast of debris flow initiation for glaciated high mountain zone of the Caucasus // Proceedings of 5th International Conference «Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment». Padua, Italy, 14-17 June 2011 // Italian Journal of Engineering Geology and Environment. Roma, Italy: Casa Editrice Università La Sapienza, 2011. P. 1003-1011.