

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 551.332.56

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ
ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР С ПОДЗЕМНЫМИ КАНАЛАМИ СТОКА
(АНАЛИЗ РАЗНОВРЕМЕННОЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ)

М.Д. Докукин, С.И. Шагин*

Высокогорный геофизический институт, 360030, Нальчик, пр. Ленина, 2, Россия; inrush@bk.ru
**ГУ МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике,*
360017, Нальчик, ул. Чернышевского, 19, Россия; 93538@mail.ru

Приведены данные о динамике ледниковых озер на территории бассейнов рек Малка, Баксан, Чегем, Черек (Кабардино-Балкария, Центральный Кавказ) и в других горных районах. Рассмотрены ледниковые озера с подземными каналами стока. Для них характерны значительные колебания уровня воды, вплоть до полного исчезновения озер в зимний период, а также различные по масштабу селепроявления.

Ледник, ледниковое озеро, подземный сток, космические снимки, колебания уровня озера, прорыв озера, сель, оплывина

FEATURES OF DYNAMICS OF GLACIAL LAKES WITH UNDERGROUND DRAIN CHANNELS
(ANALYSIS OF MULTI-TEMPORAL AEROSPACE INFORMATION)

M.D. Dokukin, S.I. Shagin*

High-Mountain Geophysical Institute, 360030, Nalchik, pr. Lenina, 2, Russia; inrush@bk.ru
** Ministry of Emergency Situations of Russia in the Kabardino-Balkar Republic,*
360017, Nalchik, str. Chernyshevskogo, 19, Russia; 93538@mail.ru

Data on the dynamics of glacial lakes located on the territory of the Malka, Baksan, Chegem, Cherek (Kabardino-Balkaria, Central Caucasus) river basins and other mountain areas are reported. The glacial lakes with underground drain channels have been examined. They are notable for the significant water level fluctuations up to the total disappearance of the lakes in winter season and for manifestations of debris flow of varying scale.

Glacier, glacial lake, underground drainage, satellite images, lake level fluctuations, lake outburst, debris flow, earthflow

ВВЕДЕНИЕ

Под термином “ледниковое озеро” (glacial lake) понимается озеро, котловина которого образована в результате аккумулятивной и (или) экзарационной деятельности ледника.

Ледниковые озера представляют большую опасность из-за угрозы формирования прорывных паводков и селей. Многочисленные факты катастрофических прорывов озер приведены в работах [Виноградов, 1977; Петраков, 2008; Reynolds, 2003]. Страшной трагедией обернулся сель в результате прорыва в 1941 г. озера Палькакоча в Перуанских Андах, унесший более 4000 жизней и разрушивший часть города Уарас [Reynolds, 2003]. Скорбная статистика прорывов ледниковых озер продолжает пополняться.

8 июля 1998 г. при прорыве ледникового озера был разрушен пос. Шахимардан (Узбекистан), погибли 116 человек [Ойгстер и др., 2008].

7 августа 2002 г. в Рошткалинском районе Горно-Бадахшанской автономной области (Таджикистан) прорывной сель уничтожил значительную часть кишлака Дашт (540 человек остались без крова) и унес жизни 24 человек [Яблоков, 2009].

17 июня 2013 г. селем, вызванным прорывом оз. Чорабари (Ганди Саровар), было разрушено селение Кедарнатх (штат Уттаракханд, Индия). Число погибших превысило 120 человек [FirstPost..., 2013].

Для ледниковых озер с моренными и ледниково-моренными котловинами вероятность про-

рыва повышается в случаях, когда сток из озера осуществляется по подземным каналам и уровень воды становится нестабильным. Амплитуда колебания уровня может превышать 10 м (12 м – оз. Кахаб-Росона, Дагестан [Познанин, 1979], 16 м – оз. Маншук Маметовой, Казахстан [Касаткин, 2011]).

Наблюдения за динамикой озер дают возможность предупредить о надвигающейся угрозе. Быстрое заполнение длительное время пустовавшей котловины озера № 16 в бассейне р. Каскелен (Казахстан) послужило основанием для организации наблюдений за ним, в результате чего удалось спрогнозировать прорыв озера и сход селя, объем которого составил около 800 тыс. м³ [Марков и др., 1981].

В настоящей статье авторы попытались выявить особенности динамики ледниковых озер в разных горных районах, используя для этого как современные космические снимки, так и аэрофотоснимки прошлых лет, и проследить связь с селепроявлениями.

В работе были использованы аэрофотоснимки залетов 1957, 1974, 1975, 1978, 1980, 1982, 1983, 1987, 1988, 1997 гг., космические снимки IRS (авторские права принадлежат © 2003–2007 ANTRIX, © 2007–2009 ANTRIX, © 2006 National Remote Sensing Centre, Department of Space, Government of India), SPOT 5 (авторские права принадлежат компании SPOT Image), EROS A (авторские права принадлежат © 2007 ImageSat International N.V.), GeoEye (авторские права принадлежат компании GeoEye Inc.), любезно предоставленные ИТЦ “СканЭкс” в рамках международных конкурсов; космические снимки QuickBird, IKONOS, GeoEye, WorldView-2 с публичных ресурсов компаний Google, Bing, Yandex; космический снимок RISAT-1 с блога Дэйва Петли сайта Американского геофизического союза “AGU Blogosphere” [Petley, 2013]; вертолетные снимки ГУ МЧС России по КБР, МГУ; фотографии пользователей с сайтов “Яндекс.Фотки”, “Фотосайт”, “Saucatalog”, “Алтай Фото”, “Papomagio”, “Flickr” и др.; материалы собственных полевых и вертолетных наблюдений.

ДИНАМИКА ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ И АЭРОФОТОСНИМКОВ

Разновременные аэрофотоснимки, космические и вертолетные снимки привязывались по опорным точкам в программе ArcGIS в системе координат WGS 84 в проекции UTM с использованием топографических карт, а также привязанных по орбитальным данным космических снимков SPOT 5, мозаик космических снимков.

После предварительного просмотра и обработки фотоматериалов разных горных районов (Кавказ, Алтай, Заилийский Алатау, Гималаи) для

анализа динамики выбраны озера, для которых имелись разновременные снимки и в процессе дешифрирования которых установлены факты значительных колебаний уровней воды и следы селепроявлений. Схема расположения “динамичных” озер в высокогорной зоне Кабардино-Балкарии (Центральный Кавказ) приведена на рис. 1.

При сравнении космических снимков июля, августа и сентября 2004, 2007, 2011 и 2012 гг. с космическими снимками апреля, октября, ноября и декабря 2012 г. впервые установлено, что целый ряд озер к 23 ноября и 12 декабря 2012 г. значительно сократились по площади, некоторые исчезли совсем, а котловины озер, существовавших летом 2012 г., ранее в апреле были пустыми (см. таблицу, рис. 2). На снимках WorldView-2 (Bing Maps) от 21 апреля 2012 г. зафиксировано отсутствие оз. Балык (см. таблицу, № 2; рис. 1) в цирке под г. Балык субаши (3932 м) в верховьях р. Кара-Кая-Су (Малка), и 11 апреля 2012 г. – отсутствие оз. Маншук Маметовой (см. таблицу, № 12; рис. 1; рис. 2, и, к).

Факт, что озера на зиму исчезают, подтверждается данными и за другие годы, например, 11 ноября 2004 г. котловина оз. Брно была уже пуста (космический снимок QuickBird с Google Earth).

Начальный этап заполнения котловин почти не охвачен снимками и наблюдениями. Есть отдельные данные за разные годы по озерам, котловины которых еще не заполнились. Вертолетным облетом 4 июня 2012 г. зафиксировано, что котловина оз. Гийбашкель была заполнена на 60 %. На рис. 2, н, о показано, как стремительно происходило наполнение котловины оз. Маашей после порожнего состояния зимой. За шесть дней (с 24 по 30 мая 2002 г.) площадь озера увеличилась с 10 до 186 тыс. м² и составила более 60 % от максимальной.

О скорости падения уровня воды в озерах к зиме можно судить по космическим снимкам с небольшой разницей во времени. Для отдельно взятых озер разновременных снимков одного сезона почти нет. Только для одного озера установлен начальный период слива. Начало слива Малого Сакашильского озера (см. рис. 2, ж, з) зафиксировано на снимке 26 октября 2012 г., а 12 декабря 2012 г. на дне котловины существовало остаточное озеро поперечником до 15 м.

Продолжительность периода, в течение которого озеро сливалось полностью, авторы попытались определить, используя данные температур воздуха метеостанции Чегет, расположенной на высоте 3043 м, а также факты опорожнения котловин некоторых озер к 23 ноября (см. таблицу).

По данным метеостанции Чегет, в 2012 г. положительные среднесуточные температуры воздуха установились 25 апреля. Примерно в это время котловина оз. Балык еще была пустой.

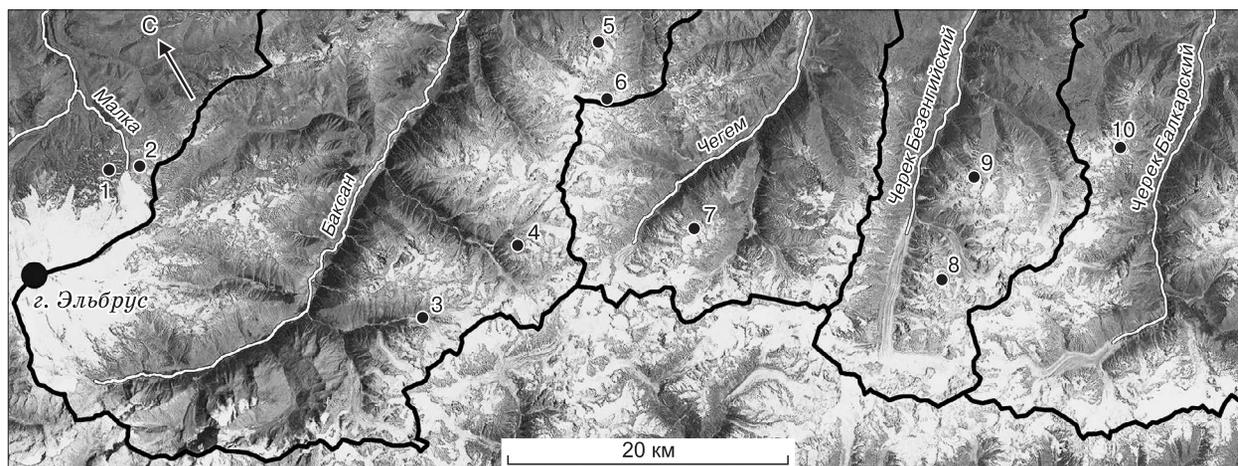


Рис. 1. Схема расположения ледниковых озер в высокогорье Кавказского Кавказа.

На основе мозаики космоснимков Google Earth. Номера озер см. в таблице.

Характеристики ледниковых озер с подземными каналами стока

Наименование озера	Номер на рис. 1 и в тексте	Речной бассейн	Высота, м н.у.м.	Площадь ледников, км ²	Площадь озера, тыс. м ² ; дата	
					макс.	мин.
Северное Чунгурчат	1	Малка (Бирджалы-Су)	3249 (3244)	Не определена	25,1 09.09.1980	0,0 28.09.1987
Балык	2	Малка (Кара-Кая-Су)	3256	0,03	4,2 11.08.2006	0,0 21.04.2012
Башкара	3	Баксан (Адыл-Су)	2568	2,10	90,6 Июль 2008 [Кидяева, 2011]	40,1 29.03.2006
Азот	4	Баксан (Адыр-Су)	3197	0,52	22,7 04.09.2010	7,7 16.08.1957
Малое Сакашильское	5	Баксан (Герхожан-Су)	3227	0,38	8,9 27.07.1988	0,6 16.12.2012
Сарынское	6	Чегем (Сарын-Су)	3590	0,09	38,8 31.07.2007	7,3 16.12.2012
Болдошке	7	Чегем (Башиль-Аузу-Су)	3260	0,66	6,3 31.08.2010	0,0 16.12.2012
Брно (озеро на Кур-сантских ночевках)	8	Черек Безенгийский (Мижирги)	3400	0,31	4,6 21.07.2011	0,0 23.11.2012
Жиришки	9	Черек Безенгийский (Жиришки-Су)	3242	0,58	7,7 17.08.2004	1,4 23.11.2012
Гийбашкель	10	Черек Балкарский (Сулдур-Су)	3145	0,04	48,0 17.08.2004	9,8 23.11.2012
Маашей (Алтай)	11	Чуя (Мажой)	1984	37,48	286,0 (установлена по береговой линии)	0,0 15.07.2012
Маншук Маметовой (Зайлийский Алатау)	12	Киши Алматы (Казахстан)	3620	0,34	25,2 02.08.2010 [Касаткин, 2011]	0,0 11.04.2012
Чорабари (Ганди Саровар) (Гималаи)	13	Мандакини (Индия)	3960	0,27 (возможно попадание в озеро части стока с ледника)	-66,7 (установлена по уровню в месте прорана)	0,0 17.06.2013

Примечание. Названия озер № 1, 2, 6–9 предложены авторами с учетом топонимики соседних ледников, горных вершин и рек. Для озер Башкара, Малое Сакашильское, Сарынское и Болдошке площади ледников, с которых осуществляется приток талых вод в озеро, получены по измерениям на космических снимках 2011 г.

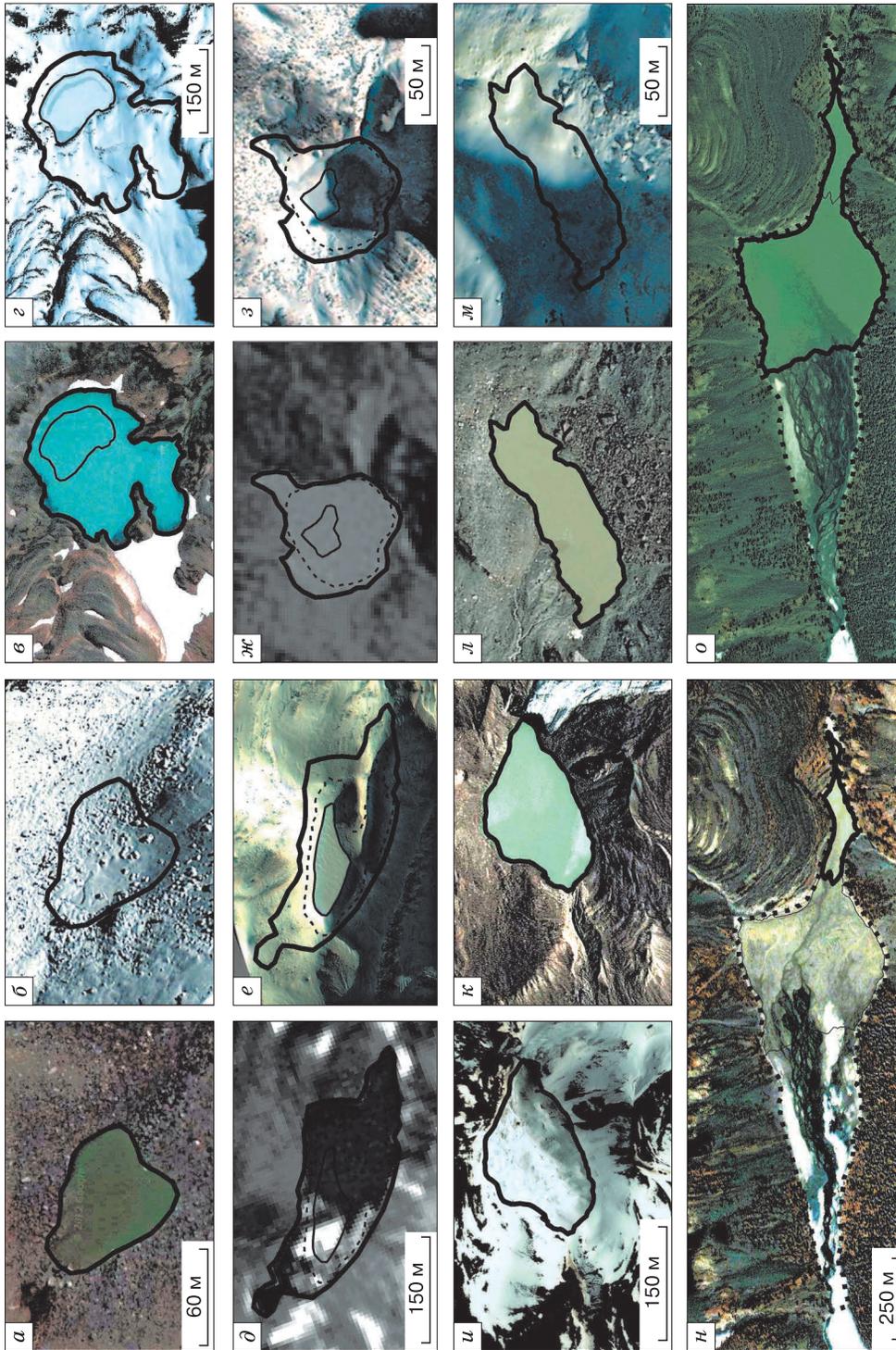


Рис. 2. Динамика озер с частичным или полным опорожнением котловин в зимний период.

а – оз. Брно, 21.07.2011 г., космический снимок WorldView-2 (с Google Earth и по умолчанию остальные снимки); *б* – оз. Брно, 23.11.2012 г., GeoEye-1; *в* – оз. Гийбашкель, 17.08.2004 г., QuickBird; *г* – оз. Гийбашкель, 23.11.2012 г., GeoEye-1; *д* – оз. Сарынкое, 31.07.2007 г., IRS-1C/1D (предоставлен ИТЦ “СканЭкс”); *е* – оз. Сарынкое, 16.12.2012 г., IKONOS, пунктирный контур – 29.08.2009 г., IRS P5 (предоставлен ИТЦ “СканЭкс”); *ж* – оз. Малое Сакашильское, 21.09.2011 г., SPOT 5 (предоставлен ИТЦ “СканЭкс”); *з* – оз. Малое Сакашильское, 16.12.2012 г., IKONOS, пунктирный контур – 26.10.2012 г., GeoEye-1; *и* – оз. Маншук Маметовой, 11.04.2012 г., WorldView-2 (Bing Maps); *к* – оз. Маншук Маметовой, 09.08.2012 г., GeoEye-1; *л* – оз. Болдошке, 31.08.2010 г., WorldView-2 (Bing Maps); *м* – оз. Болдошке, 16.12.2012 г., IKONOS; *н* – оз. Маашей, 24.05.2002 г., IKONOS; *о* – оз. Маашей, 30.05.2002 г., IKONOS, пунктирный контур – береговая линия при максимальном заполнении котловины).

Переход температур от положительных к отрицательным значениям произошел 1 ноября 2012 г., а в 2004 г. – 3 ноября. Следовательно, если факт отсутствия оз. Брно подтвержден космическим снимком 11 ноября 2004 г., то можно предположить, что при таких же температурах в 2012 г. слив Малого Сакашильского озера, начавшийся в 20-х числах октября, завершился к середине ноября и длился около двух недель.

Для отдельных озер было прослежено несколько состояний за разные годы и месяцы, включая зиму 2012 г., например оз. Сарынское (см. рис. 2, *д, е*). Рост озера наблюдался в 60–70-х гг. XX в. вследствие увеличения котловины за счет отступления ледника и вытаивания мертвых льдов.

Максимальная площадь Сарынского озера отмечена на космическом снимке в конце июля 2007 г. (см. рис. 2, *д*) в период наибольших температур воздуха. Почти такая же площадь озера зафиксирована на аэрофотоснимке 09.08.1978 г. На всех снимках конца августа и сентября площадь озера значительно меньше. По этим данным можно сделать вывод о прямой зависимости площади (уровня) озера от температур воздуха.

Снимки Landsat (материалы М. Пельто [Pelto, 2013]), фотографии с туристских сайтов, топографические карты показали, что оз. Чорабары (Ганди Саровар) (см. таблицу, № 13) в долине р. Мандакини (Гималаи) существовало больше 50 лет (оно есть на картах 1962 г.) и имело площадь около 36 тыс. м² (определена по береговой линии на космическом снимке WorldView-2 (Bing Maps) от 09.11.2011 г.). Питание озера осуществлялось за счет дождей и таяния снега. В котловину, возмож-

но, попадала малая часть стока с небольшого ледника. К зиме озеро сливалось по фильтрационным каналам. Максимальный уровень его зафиксирован на фотографии 15 июля 2008 г. Существование озера подтверждают фотографии 4 сентября 2011 г. и 17 октября 2008 г. Пустая котловина была на фотографиях Н. Зверева от 02.09.2009 г. (Panoramio) и на космическом снимке WorldView-2 (Bing Maps) от 09.11.2011 г. Вследствие того, что динамика озера определялась режимом осадков, его появление, максимальное наполнение и исчезновение происходили в разные сроки.

О ПРИЧИНАХ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ОЗЕРА БАШКАРА

На оз. Башкара сотрудники МГУ несколько лет проводили стационарные наблюдения. В результате было установлено, что максимальные уровни оз. Башкара наблюдаются в июне. «К концу июня (когда начинается период максимальной абляции ледника – *прим. авторов*) уровни понижаются и в течение лета квазистабильны, более выраженный спад начинается после 20 августа – 1 сентября, а в конце сезона наблюдений (сентябрь–октябрь) уровни минимальные» [Черноморец и др., 2007, с. 76; Петраков и др., 2009].

Необычному факту понижения уровня оз. Башкара в период максимальной абляции ледника авторы настоящей статьи предлагают следующее объяснение.

Как и вышеперечисленные озера, оз. Башкара не имеет поверхностного стока. Данные вертолетного снимка, сделанного в конце марта 2006 г. (рис. 3), показывают, что минимальные значения

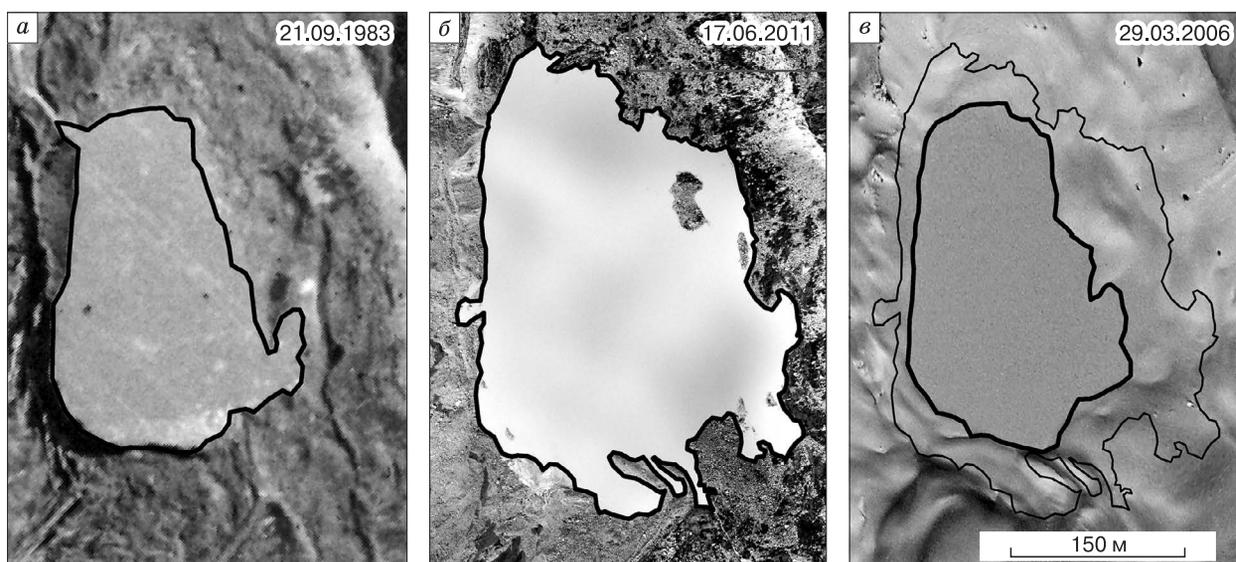


Рис. 3. Состояние озера Башкара осенью, ранним летом и весной в разные годы.

а – аэрофотоснимок; *б, в* – вертолетные снимки ГУ МЧС России по КБР.

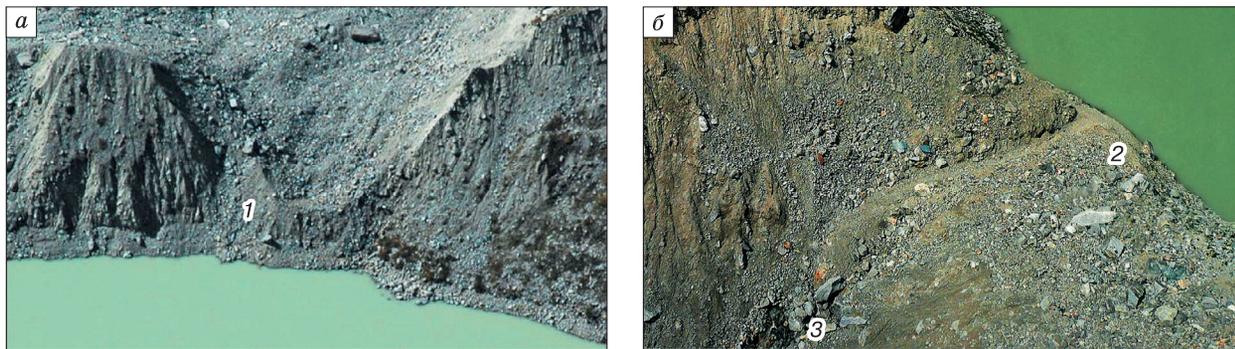


Рис. 4. Участок подземного стока из оз. Башкара.

а – вид сбоку на северо-западный участок озера: 1 – напорно-насыпной конечно-моренный вал 1990-х гг. (фото ГУ МЧС России по КБР, 29.09.2006 г.); *б* – вид сверху на участок моренной перемычки: 2 – прокоп в конечно-моренном вале, 3 – выход фильтрационных вод на поверхность (фото М.Д. Докукина, 23.07.2009 г.).

уровня озера практически совпадают со стабильным уровнем оз. Башкара начала 1980-х гг.

В тот период сток с озера на участке моренной гряды в северо-западном углу котловины был поверхностным. В результате наступания ледника Башкара в 90-х гг. XX в. на этом месте сформировался напорно-насыпной моренный вал (рис. 4, *а*) [Докукин, Савернюк, 2012]. С возникновением этого вала сток воды из озера стал осуществляться по подземным каналам фильтрации, а уровень – испытывать значительные сезонные колебания.

Нижний уровень фильтрационных каналов соответствует уровню поверхностного стока из озера до наступания ледника в 1990-х гг. Скорее всего, перемычка ниже минимального уровня озера водонепроницаема и, вероятно, сложена коренными породами, так как если бы фильтрация происходила по всей глубине озера, то оно бы исчезло в зимний период.

За зимний период входные участки фильтрационных каналов замерзают. По данным [Володичева и др., 2010], сезонное промерзание грунтов в Приэльбрусье может достигать глубины 1,5–2,0 м.

Весной и ранним летом, пока фильтрационные каналы остаются в замерзшем состоянии, уровень воды в озере поднимается до ежегодных максимальных отметок за счет притока в котловину талых вод. Затем под тепловым воздействием воды озера фильтрационные каналы оттаивают, пропускная способность восстанавливается и достигает максимума. В результате уровень воды в озере понижается до среднееголетних отметок.

К зиме, когда приток талых вод в озеро сокращается и прекращается, подземные каналы стока под водой озера еще не промерзают и сохраняют свою пропускную способность. Сток воды из озера продолжается, и уровень понижается до минимальных отметок.

В июле 2008 г. наблюдался аномальный подъем уровня и перелив воды озера поверх моренной перемычки. По сравнению с максимальными уровнями июля в 2005 и 2009 гг. превышение составило 4,5 м (по графикам из [Кидяева, 2011]). В работе [Хаджиев и др., 2009] сделан вывод, что причиной подъема уровня послужили ливни 15 и 18 июля (по данным метеостанции Чегет, 15 июля выпало 57 мм, 18 июля – 53,4 мм осадков). За период наблюдений максимальные осадки были зафиксированы: 8–9 июля 2001 г. – в сумме 62 мм; 20–21 июля 2002 г. – 61 мм; 28–29 июля 2003 г. – 63,9 мм; 12 июля 2004 г. – 48,7 мм; 15–16 июля 2007 г. – 59 мм. В эти дни повышение уровня не было зарегистрировано.

Вследствие того что подъем уровня озера начался до прохождения ливней (в начале июля превышение уровня над многолетними максимальными значениями уже составляло 1,5 м), а температурные условия 2008 г. не были максимальными, авторы предположили, что кроме осадков причиной аномального подъема уровня в 2008 г. могла послужить и перестройка дренажной системы ледника Башкара, во время которой случился сброс в озеро значительной части ледникового стока, ранее обходившего его стороной.

С целью недопущения в дальнейшем такого же резкого подъема уровня под руководством и с участием специалистов ГУ МЧС России по КБР и Высокогорного геофизического института (ВГИ) был произведен прокоп через моренную перемычку длиной 20 м и глубиной до 2,5–3,0 м (см. рис. 4, *б*). Таким образом, возможный прорывоопасный объем озера снижен на 180–200 тыс. м³.

СЕЛЕПРОЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОЗЕРАМИ, ИМЕЮЩИМИ ПОДЗЕМНЫЙ СТОК

Многokrратно повторяющиеся процессы слива и наполнения озер приводят к тому, что подзем-

ные каналы стока становятся стабильными и функционируют десятки и даже сотни лет. По данным аэрофотоснимков 1957 г., рассматриваемые озера (см. таблицу) существуют более 50 лет, за исключением оз. Северное Чунгурчат, которое исчезло в 1980-х гг., после того как в него прекратился приток воды с ледника.

За долгий период существования озер пропускная способность каналов стока приходит в соответствие с ежегодным максимальным притоком воды в котловины. Такое соответствие наблюдается как для озер с питающими их ледниками площадью в десятки километров, так и для озер с малыми ледниками площадью в несколько гектаров.

Озеро Маашей (см. рис. 2, н, о) принимало в свою котловину сток с ледников общей площадью более 37 км² (данные отчета Ю.К. Нарожного, Томский госуниверситет, 2004) (см. таблицу), а озеро Гийбашкель (см. рис. 2, д, е) – с каменного глетчера и небольшого ледничка площадью до 0,04 км².

Прорыв озера Маашей 15 июля 2012 г., существовавшего более ста лет [Николаев и др., 2012], показал, что для озер с подземными каналами стока существует потенциальная опасность прорыва, несмотря на длительный период стабильности.

Прорывы озер происходят в результате деформации подземных каналов стока, связанной с процессами деградации мерзлоты ледово-обломочных моренных и перигляциальных массивов (каменных и забронированных глетчеров, погребенных льдов, согласно типизации [Докукин, 1988]). Прорывы могут быть как подземными с формированием эрозионно-оползневых ниш на откосах фронтальных уступов морен, каменных глетчеров и забронированных глетчеров, так и поверхностными с формированием проранов в теле плотин и эрозионных врезов.

По результатам сравнительного дешифрирования аэрофотоснимков 1970–1980-х гг. выявлено несколько подземных прорывов оз. Северное Чунгурчат на участке фронтального вала забронированного глетчера (рис. 5) [Багов и др., 2009], которые сопровождалась заносами селевыми отложениями минеральных источников “Джылы-Су”. Длина подземных каналов стока, по которым осуществлялись прорывы оз. Северное Чунгурчат, составляла от 30 до 90 м.

По снимку QuickBird от 31.08.2008 г. (Google Earth) выявлено, что озеро в верховьях р. Дашт (Таджикистан) и эрозионно-оползневую нишу на боковой границе каменного глетчера, с которой начинаются следы катастрофического селя, разде-

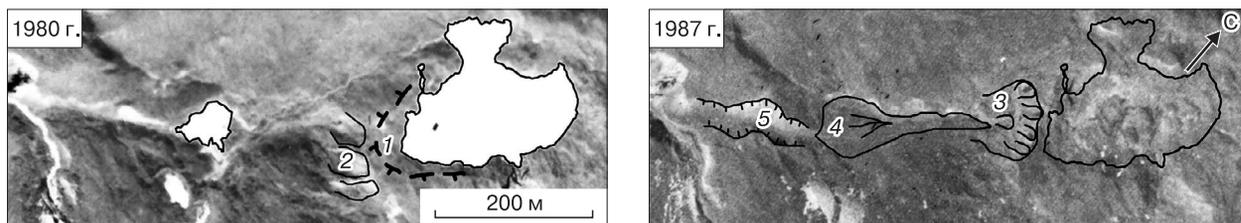


Рис. 5. Следы прорывов оз. Северное Чунгурчат на аэрофотоснимках.

1 – бровка уступа фронтального моренного вала; 2 – старые ниши оплывин (1970-е гг.); 3 – ниши оплывин, образовавшиеся в начале 1980-х гг.; 4 – селевые отложения; 5 – бровки селевого вреза.

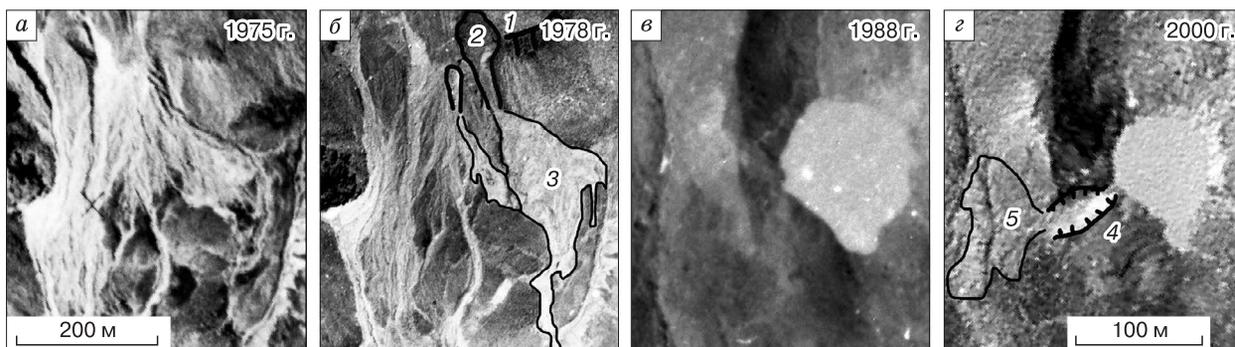


Рис. 6. Динамика фронтального уступа забронированного глетчера и Малого Сакашильского озера на аэрофотоснимках.

а–в – аэрофотоснимки; г – вертолетный снимок М.Ю. Никитина; б: 1 – бровка фронтального уступа, 2 – эрозионно-оползневые ниши оплывин, 3 – селевые отложения 1977 г.; г: 4 – проран в котловине озера, 5 – отложения сплывшего блока морены.

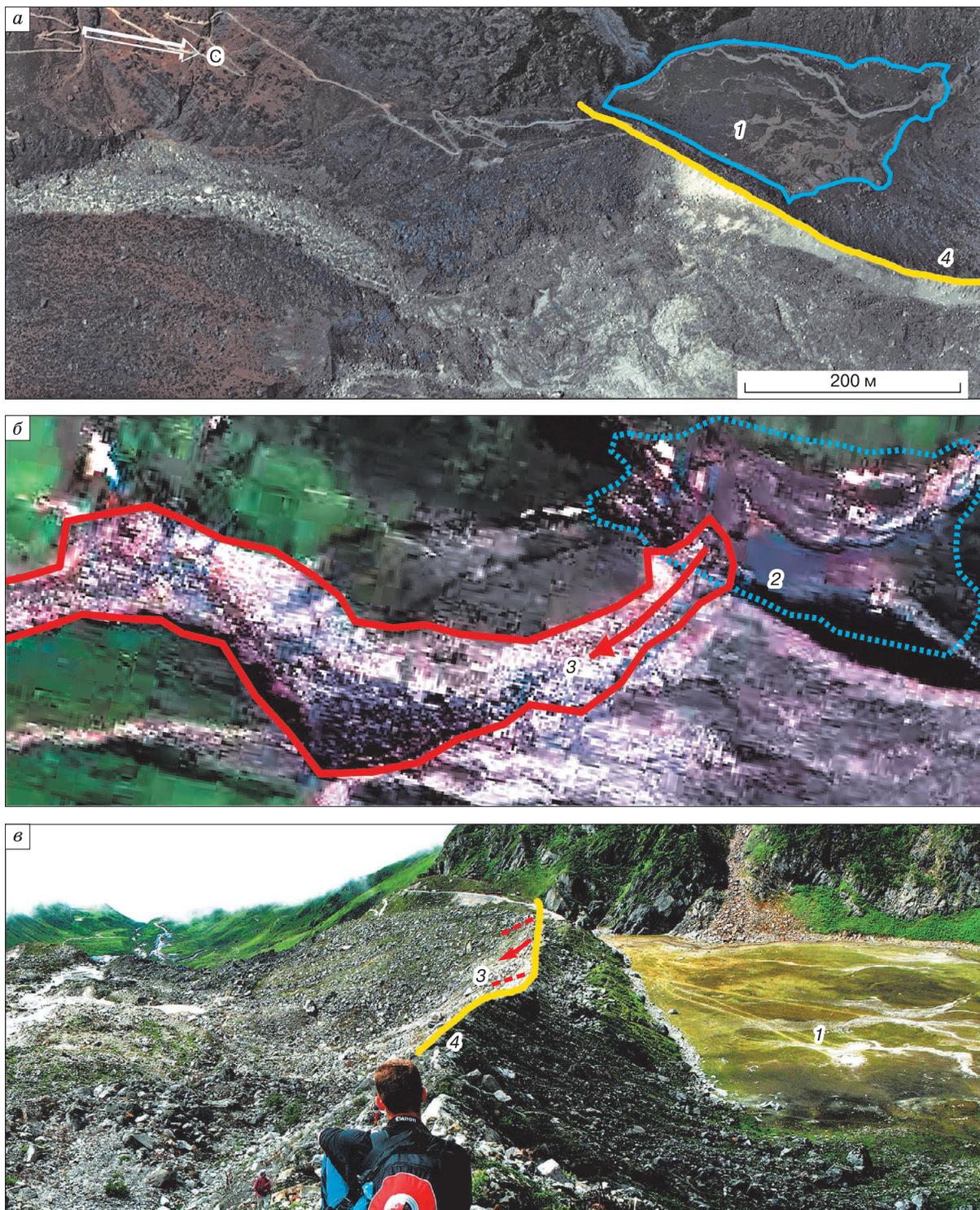


Рис. 7. Участок формирования паводка в результате прорыва оз. Чорабари (Ганди Саровар) в долине р. Мандакини (штат Уттаракханд, Индия).

а – фрагмент космического снимка WorldView-2 (Bing Maps) от 09.11.2011 г.: 1 – контур озера при заполнении котловины летом, 4 – гребень береговой морены; *б* – фрагмент космического снимка RISAT-1 от 23.06.2013 г. [Petley, 2013]: 2 – предполагаемый контур озера перед прорывом 17 июня 2013 г., 3 – проран и эрозионный врез после прорыва озера; *в* – фрагмент фотографии Н. Зверева от 02.09.2009 г.: 1 – дно котловины озера, 3 – участок будущего прорана, 4 – гребень береговой морены.

лял участок с подземным стоком протяженностью около 200 м.

Примерами прорывов озер с подземными каналами стока протяженностью до 500 м могут служить оз. Кахаб-Росона (Дагестан) [Познанин, 1979], оз. Маашей (Алтай) и Малое Сакашильское озеро (см. рис. 2, ж, з). С подземным прорывом последнего озера, возможно, связан сель 1977 г. по р. Сакашиль-Су, так как на фронтальном уступе забронированного глетчера, в тыловой зоне которого расположено озеро, произошел сход оплывины объемом около 15–20 тыс. м³ (рис. 6, а, б). Дальнейшее развитие озерной котловины привело к оплыванию блока береговой морены площадью до 1,5 тыс. м² с аккумуляцией отложений у ее подножия и формированию русла поверхностного стока (см. рис. 6, в, г). Вследствие малых размеров оплывины и пологой зоны ее аккумуляции селевого потока этот процесс не вызвал.

По наличию эрозионно-оползневых ниш ниже озер на аэрофотоснимках и космических снимках зафиксированы прорывы оз. Балык – между 1957 и 1978 гг., оз. Сарынское – после 1957 г. (по данным И.Б. Сейновой – 1958 г.), оз. Болдошке – до 1957 г., оз. Жиришки – после 1957 г. (по данным [Кадастр..., 2001] – 1967 г.).

В работе [Сейнова, 2001] сделан вывод о том, что прорывы оз. Азот происходили до 1930-х гг. и были связаны с существованием ледниковой плотины. Согласно описанию П.В. Ковалёва [1961], катастрофические прорывы оз. Башкара в 1958 и 1959 гг. происходили на участке существования ледниковой плотины в начальный период формирования озера.

Прорывы озер с подземными каналами стока могут быть спровоцированы аномальными ливнями, а также гляциальными паводками, связанными с прорывами внутрiledниковых водоемов или сменой направления внутрiledниковых каналов стока. В результате в озеро попадают такие объемы воды, с которыми подземные каналы стока не могут справиться. Образуется поверхностный сток и начинается эрозионный процесс, иногда совпадающий с оттаиванием многолетнемерзлых пород участков подземного стока.

Так, перед прорывом оз. Маашей прошли ливни с трехкратным превышением нормы осадков. Переполнение котловины оз. Чорабари (Ганди Саровар) и его прорыв были вызваны ливнями с суточной суммой осадков 325 мм [Dobhal et al., 2013; Petley, 2013]. По свидетельству очевидцев, сотрудников Института геологии Гималаев “Вадиа” (WING) [Dobhal et al., 2013], слив оз. Чорабари продолжался около 5–10 мин. За это время вылилось порядка 600 тыс. м³ воды, при этом средний расход паводка составил более 1000 м³/с. Прорывной паводок получил название “Гималайское цунами”. Такой быстрый сброс воды произошел из-

за особенности моренной перемычки – острый гребень береговой морены буквально рухнул вниз. На рис. 7, в видно, что участок будущего прорана выделяется самой малой шириной и высотой гребня (превышение гребня над дном котловины – около 12 м). На рис. 7, б проведен предположительный контур озера при максимальном заполнении котловины. Площадь озера перед прорывом составляла около 67 тыс. м².

Пример оз. Чорабари показывает необходимость учета озер с частичным заполнением котловин и пустых котловин, существующих порой десятки и сотни лет. При аномальных осадках или гляциальных паводках не исключена вероятность переполнения котловин и формирования прорывных паводков.

ВЫВОДЫ

Большой объем информации о динамике ледниковых озер и других природных объектов в настоящее время можно получить из различных интернет-ресурсов (космические снимки разных лет, фотографии с туристских сайтов, описания и обсуждения событий и т. п.).

Многочисленные факты слива озер в начале зимнего сезона можно считать характерной особенностью озер с подземными каналами стока.

Использование космических и вертолетных снимков, фиксирующих состояние озер зимой, позволяет диагностировать озера с подземными каналами стока и выявлять предельные уровни зоны фильтрации. Полный охват снимками периодов заполнения котловин озер водой и их опорожнения позволит при наличии данных батиметрических наблюдений оценить пропускную способность подземных каналов и их состояние.

Примеры прорывов озер в других горных районах показывают, что есть много общего в механизмах прорыва озер и в типах котловин. Изучение эволюции озер и их котловин с использованием аэрофотоснимков и космических снимков разных лет помогает оценить их состояние и выявить фазу развития, приуроченность различных механизмов прорыва к определенным морфогенетическим типам моренных и перигляциальных комплексов.

Приведенные выше материалы по динамике озер, имеющих подземный сток, дают основание, несмотря на сравнительно редкие случаи их прорыва и длительные периоды стабильности, считать их потенциально прорывоопасными.

При организации мониторинга ледниковых озер целесообразно использовать имеющиеся в интернете многочисленные материалы космических съемок и фотографии озер, заказывать съемки озер в необходимые периоды времени, осуществлять вертолетные облеты в весенний и зимний сезоны.

Авторы выражают благодарность ИТЦ “СканЭкс” за любезно предоставленные космические снимки, сотрудникам ГУ МЧС России по КБР за материалы вертолетных и наземных наблюдений, М.С. Достоваловой за ценные сведения о прорыве оз. Маашей и материалы по ледникам Алтая, Е.А. Савернюк за помощь в обработке аэрокосмической информации и участие в полевых исследованиях, В.А. Шабельникову за предоставленные метеоданные, И.А. Лабутиной за ценные материалы по Северному Приэльбурью, И.Б. Сейновой за обсуждение материалов и советы при подготовке статьи, С.С. Черноморцу за помощь при обследовании оз. Башкара и ценные фотографии прошлых лет, Д.Н. Петли за материалы о прорыве оз. Чорабары, А.Г. Колычеву за логистическую помощь и участие в полевых маршрутах.

Литература

- 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 Междунар. науч. конф. “Гляциология в начале XXI века”, посвященной 100-летию со дня рождения Г.К. Тушинского (Москва, 15–16 октября 2009). М., Унив. книга, 2009, с. 156–161.
- Виноградов Ю.Б.** Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки / Ю.Б. Виноградов. Л., Гидрометеиздат, 1977, 156 с.
- Володичева Н.А., Исаков В.А., Шмелев Д.Г.** Криогенные процессы в высокогорье Центрального Кавказа (по данным зимних наблюдений в 2000–2010 гг.) // Устойчивое развитие горных территорий. Владикавказ, Терек, 2010, № 2 (4), с. 53–56.
- Докукин М.Д.** К вопросу о типизации форм моренного рельефа (на примере Северного Кавказа) // Тр. ВГИ, 1988, вып. 73, с. 58–67.
- Докукин М.Д., Савернюк Е.А.** Наступание ледников в конце XX века как фактор активизации гляциальных селевых процессов (Центральный Кавказ) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Тр. Второй конф., посвященной 100-летию со дня рождения С.М. Флейшмана (Москва, 17–19 окт. 2012 г.). М., МГУ, 2012, с. 31–32.
- Кадастр** лавинно-селевой опасности Северного Кавказа / Отв. ред. М.Ч. Залиханов. СПб., Гидрометеиздат, 2001, 112 с.
- Касаткин Н.Е.** Динамика ледниковых озер бассейна реки Киши Алматы (Малая Алматинка) по данным наземного мониторинга // Междунар. конф. “Изменения климата и риски стихийных бедствий в горных районах “MOUNTAIN-HAZARDS 2011” (Душанбе, 19–21 сент. 2011 г.). Душанбе, Таджикистан, 2011, с. 28. URL: <http://mountainhazards2013.com/souboryeditor/Paper%20Nikolay%20Kasatkin.pdf>. (дата обращения: 09.08.2013).
- Кидяева В.М.** Гидрологические характеристики прорывоопасных ледниковых озер Приэльбурья (Россия, Кавказ). 2011. URL: http://www.untj.org/docs/Disaster_Management/Resources%20Page/16.%20Kidyayeva%20V%20rus.pdf (дата обращения: 09.08.2013).
- Ковалёв П.В.** Современное оледенение бассейна р. Баксан // Материалы Кавказской экспедиции (по программе МГГ). Харьков, Изд-во Харьков. ун-та, 1961, т. II, с. 3–106.
- Марков И.Н., Костригин Ю.Н., Меньшов В.А.** Прогноз прорыва моренного озера в бассейне р. Каскелен // XVI Всесоюз. науч.-техн. конф. по методам расчета и прогноза селевых потоков: Тез. докл. (Нальчик, 12–16 нояб. 1981 г.). М., Гидрометеиздат, 1981, с. 98–99.
- Николаев Н., Темерханова Э., Мартынов В.** Гибель озера Маашей. 2012. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=rAP7ZhATtLQ> (дата обращения: 09.08.2013).
- Ойгстер С., Джумаева С., Циммерманн М.** Швейцарская стратегия сокращения стихийных бедствий в Центральной Азии 2004–2008. Душанбе, Изд. Швейцарского агентства по развитию и сотрудничеству, 2008, 28 с. URL: www.swiss-cooperation.admin.ch/centralasia/.../resource_rus_24552.pdf (дата обращения: 17.08.2013).
- Петраков Д.А.** Селевая опасность ледниковых озер и оценка вероятности их прорыва // Селевые потоки: катастрофа, риск, прогноз, защита: Тр. Междунар. конф. (Пятигорск, 22–29 сент. 2008 г.). Пятигорск, Севкавгипроводхоз, 2008, с. 309–312.
- Петраков Д.А., Алейников А.А., Кидяева В.М. и др.** Современная эволюция приледниковых озер в Приэльбурье (Центральный Кавказ, Россия) // Снижение риска природных катастроф в горах: Материалы Междунар. конф. (Бишкек, 15–18 сент. 2009 г.). Бишкек, Салам, 2009, с. 69–74.
- Познанин В.Л.** Механизм селевых прорывов моренного озера Кахаб-Росона в Дагестане // Материалы гляциол. исслед., 1979, вып. 36, с. 218–222.
- Сейнова И.Б.** Ледники и сели Приэльбурья. (Эволюция оледенения и селевой активности) / И.Б. Сейнова, Е.А. Золотарёв. М., Науч. мир, 2001, 204 с.
- Хаджиев М.М., Сейнова И.Б., Мальнева И.В.** Состояние озерно-ледникового комплекса Башкара и прогнозные сценарии его дальнейшего развития // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: IX науч.-практ. конф. (Москва, 14–15 мая 2009 г.). М., Центр “Антистихия” МЧС России, 2009, с. 114–119.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В. и др.** Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ) // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 1, с. 72–84.
- Яблоков А.А.** Сели Таджикистана // Сб. науч. тр. ОАО “Севкавгипроводхоз”. Пятигорск, 2009, вып. 18, с. 88–102.
- Dobhal D.P., Gupta A.K., Mehta M., Khandelwal D.D.** Kedarnath disaster: facts and plausible causes // Current Science, Sci. Correspond., 2013, vol. 105, No. 2, p. 171–174.
- FirstPost India.** June 25, 2013. URL: <http://www.firstpost.com/india/uttarakhand-floods-127-more-bodies-found-in-kedarnath-death-toll-at-822-904409.html> (дата обращения: 09.08.2013).
- Pelto M.S.** Glacier Contribution Kedarnath Flood in June 2013. URL: <http://glacierchange.wordpress.com/2013/07/26> (дата обращения: 09.08.2013).
- Petley D.N.** Reconstructing the events at Kedarnath using data, images and eye-witness reports. 4 July, 2013. URL: <http://blogs.agu.org/landslideblog/page/2/> (дата обращения: 09.08.2013).
- Reynolds J.M.** Development of glacial hazard and risk minimisation protocols in rural environments // Methods of glacial hazard assessment and management in the Cordillera Blanca, Peru. April 2003, Pr. No. R7816.H. URL: http://www.bgs.ac.uk/research/international/DFID-KAR/ADD046_COL.pdf (дата обращения: 09.08.2013).

Поступила в редакцию
10 сентября 2013 г.