

# Подземные прорывы озёр и другие проявления селей в каменных глетчерах

М.Д. Докукин<sup>1</sup>, М.Ю. Беккиев<sup>1</sup>, Р.Х. Калов<sup>1</sup>, Е.А. Савернюк<sup>2</sup>, С.С. Черноморец<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, inrush@bk.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, savernyuk@gmail.com

Аннотация. На основе анализа данных разновременных космических снимков проведено исследование динамики озёр, расположенных в тыловой зоне каменных глетчеров. Исследовались озёра в горных районах Афганистана, Таджикистана, Казахстана и России. Выявлены факты отсутствия озёр в течение нескольких лет, и затем появление их в год прорыва. Площади озёр составляли порядка 40-70 тыс. м<sup>2</sup>. Следы прорыва фиксировались на фронтальных уступах каменных глетчеров на расстоянии от 500 до 1500 м от озёр, что свидетельствовало о наличии подземных каналов стока такой протяжённости. Озёра в каменных глетчерах прорывались неоднократно. Озеро в верховьях р. Каргалы в Казахстане прорывалось в 2015 и 2019 гг. Кроме прорывов озёр отмечены факты формирования селей на уступах каменных глетчеров с объёмами выноса до 1 млн м<sup>3</sup> (каменные глетчеры в верховьях левых притоков р. Кынгарга в Юго-Западном Прибайкалье). Такие сели были вызваны выпадением аномального количества жидких осадков. Случаи схода нескольких селей с каменных глетчеров отмечены на Кавказе в Чегемском ущелье в 1983 г. в период массового схода дождевых селей. Дождевые сели в каменных глетчерах отличаются редкой повторяемостью, что осложняет их прогнозирование.

**Ключевые слова:** каменные глетчеры, прорывы озёр, подземные каналы, фронтальные уступы

Ссылка для цитирования: Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Подземные прорывы озёр и другие проявления селей в каменных глетчерах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 371–387.

### Underground outbursts of lakes and other debris flow manifestations in rock glaciers

M.D. Dokukin<sup>1</sup>, M.Yu. Bekkiev<sup>1</sup>, R.Kh. Kalov<sup>1</sup>, E.A. Savernyuk<sup>2</sup>, S.S. Chernomorets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, inrush@bk.ru, <sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, savernyuk@gmail.com

**Abstract.** We have investigated the dynamics of lakes located in the rear zone of rock glaciers using data analysis of different-time satellite images. We explored lakes in the mountainous regions of Afghanistan, Tajikistan, Kazakhstan and Russia and revealed the fact of the several years' absence of lakes, and then their appearance in the year of the outburst. The area of the lakes was about 40–70 thousand m<sup>2</sup>. We recorded outburst traces on the frontal ledges of rock glaciers at a distance of 500 to 1500 m from the lakes indicating the presence of underground runoff channels of such a length. Lakes in rock glaciers have repeatedly broken through. Outbursts of the lake in the upper Kargaly River in Kazakhstan were in 2015 and 2019. In addition to lake outbursts we noted the facts of debris flow formation on the slope of rock glaciers with deposits volume of up to 1 million m<sup>3</sup> (rock glaciers in the upper reaches of the Kyngarga River left tributaries in the South-Western Baikal region). Such debris flows were caused by an abnormal amount of liquid

precipitation. We revealed cases of several debris flows from rock glaciers that occurred in the Caucasus in the Chegem gorge in 1983 during the period of massive rain debris flows. Rain debris flows in rock glaciers are rarely repeated, which complicates their prediction.

*Key words:* rock glaciers, glacial lakes outburst flood, underground channels, front slopes of rock glaciers

**Cite this article:** Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. Underground outbursts of lakes and other debris flow manifestations in rock glaciers. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 371–387.

#### Введение

Каменные глетчеры – характерный элемент высокогорной криолитозоны, выраженный в виде языкообразных массивов, по форме напоминающих ледники, состоящих из обломков горных пород и льда, медленно сползающих по склонам за счёт деформации льда. Строение и динамика каменных глетчеров рассмотрена в работе [Haeberli, 1985]. Обзор распространения каменных глетчеров в Сибири и Азии приведён в работах [Галанин, 2009; Горбунов, 2006]. Каменным глетчерам Кавказа посвящены работы [Бруханда, 1976; Володичева, Лабутина, 1996; Докукин, 1993; Кожевников и др., 1980, Краснослободцев, 1971; Тавасиев, 2011].

Каменные глетчеры как селевые очаги рассмотрены в работах [Докукин, 1987; Сейнова, Мезенина, 1987: Тавасиев, 2011а; Giardino, 1983; Lugon, Stoffel, 2010]. В этих работах в качестве селевых очагов показаны фронтальные уступы каменных глетчеров, на которых в результате ливней образуются эрозионные формы – рытвины и воронки. Селевому процессу могут способствовать прорывы внутренних полостей в каменных глетчерах, заполненные водой и грязекаменной смесью.

В работе [Докукин, 1993] каменные глетчеры представлены как конечные формы нескольких морфологических рядов: ледник – каменный глетчер, моренный пьедестал – каменный глетчер, обвально-осыпной конус – каменный глетчер. В этих морфологических рядах выделяются переходные образования. Каждой выделенной форме присущи свои темпы и механизмы развития, в том числе механизмы селеформирования.

Прорывы озёр по подземным каналам стока отмечены в работах [Erokhin et al., 2018; Petrakov et al., 2020].

Цель настоящей статьи – исследование случаев прорывов озёр, расположенных на поверхности каменных глетчеров или в их тыловой депрессии, а также селепроявлений на фронтальных уступах каменных глетчеров.

#### Материалы и методы

Исследования проведены на основе дешифрирования космических снимков с различных Интернет-ресурсов: Google Earth, Bing Maps, Yandex, ESRI. С сайта https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html получены космоснимки Landsat 7 ETM+ (разрешением 30 м). На сайте https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/ просматривали большое количество космических снимков Sentinel 2A (разрешением 10 м) за период 2015–2019 гг., а также Landsat 8 OLI разрешением 30 м за период 2013–2019 гг. Фрагменты космоснимков загружались в формате TIFF в системе координат WGS84 проекции UTM, и таким образом формировалась база растровых данных для работы в GIS-программе. На участок верховьев долины р. Сарын-Су на Кавказе использовались аэрофотоснимки 1957, 1973, 1978 и 1983 гг. из архива  $\Phi \Gamma EY$  «ВГИ», космоснимки IRS 1D (разрешением 6 м), SPOT 5 (разрешением 2,5 м), IRS-P5 (Cartosat-1) (разрешением 2,5 м), предоставленные ИТЦ «СКАНЭКС». В программе ArcGIS 10.3 космоснимки и

аэрофотоснимки привязывались по опорным точкам и создавались векторные слои границ озёр.

#### Результаты исследований

В последние годы было несколько сообщений в Интернете и публикаций о селевых потоках, связанных с прорывами озёр, которые выявлены по данным дистанционного зондирования и электронных СМИ: прорыв озера и разрушения в кишлаке Пашгор (Афганистан) в 2018 г., прорыв озера и выход селевого потока в г. Алматы в 2015 г., прорыв озера и разрушение кишлака Дашт (Таджикистан) в 2002 г. и др.

#### Прорыв озера в верховьях р. Даррагари (Панджиерское ущелье, Афганистан) в 2018 г.

На рис. 1 показано состояние озера, каменного глетчера и конуса выноса р. Даррагари (Афганистан), а также кишлака Пашгор до и после прорыва озера в 2018 г.

12 июля 2018 г. рано утром кишлак Пашгор в Панджшерском ущелье в Афганистане подвергся разрушительному воздействию селевого потока, в результате которого погибло 10 человек и разрушено 400 домов. 15 июля об этом сообщил Д. Петли в своём блоге (https://blogs.agu.org/landslideblog/2018/07/15/panjshir-1/) и привёл фрагменты космоснимков с Planet Lab от 11 и 12 июля 2018 г. и выводы о прорыве озера.

Авторы проанализировали космоснимки Sentinel 2A за 6 и 16 июля 2018 г. и более ранние космоснимки за период 2013-2018 гг., а также космоснимки с Google Earth за период 1984-2006 г. В результате было выявлено, что перед прорывом озеро имело площадь 62,6 тыс.  $M^2$  (см. рис. 1*в*). Появилось озеро в начале лета и 6 июня уже имело площадь 30 тыс.  $M^2$ . К 16 июня его площадь достигла 41 тыс.  $M^2$  (см. рис. 1*б*) и 6 июля площадь была максимальной. Всё это время озеро было в условиях заснеженной поверхности окружающей его территории. Анализ космоснимков предыдущих лет (2013–2017 гг.) показал, что и в весеннее и в летнее время озёр на этом месте не наблюдалось.

Исследование геоморфологических условий формирования прорывного паводка позволило сделать следующие выводы:

- 1) в котловину (рис. 1∂, №2), которая в 2018 г. заполнилась водой, все годы поступала вода от таяния ледника (рис. 1∂, №5) площадью около 0,15 км<sup>2</sup>;
- ниже котловины озера и слева от неё расположен массив каменного глетчера шириной более 600 м, состоящий из двух потоков, второй из которых начинается ниже ледника (рис. 1∂, №6) площадью 0,08 км<sup>2</sup>;
- 3) к северу от котловины озера 2018 г. (рис. 1∂, №2), находится пустая котловина площадью 60-65 тыс. м<sup>2</sup>, в которой существовало озеро в течение более 30 лет, а затем в 2006 г. озеро исчезло;
- ниже озёрных котловин расположены две генерации (молодая и старая) каменного глетчера (рис. 1∂, №3 и №4), в которых сток с озёр осуществлялся по подземным каналам (показаны синими и жёлтыми штриховыми линиями);
- 5) на теле крупноглыбовой поверхности старой генерации (рис. 1*ж*, №5) каменного глетчера после прорыва озера в 2018 г. отчётливо видны тёмные следы от водного потока шириной до 60–75 м (рис. 1*ж*, №2) протяжённостью около 400 м без отложения обломочной массы, причём ниже этого потока следов изменений в русле основного водного потока не зафиксировано;
- 6) на уступе каменного глетчера старой генерации следы эрозионной воронки шириной 50 м (рис. 1ж, №3) наблюдаются на участке правее следов водного потока, что позволило сделать предположение о том, что основной поток прорывного паводка проходил по подземному каналу в массиве старой генерации каменного глетчера, т.е. прорыв озера проходил по

нескольким подземным каналам на разных уровнях двух генераций каменного глетчера; длина подземного канала достигала более 1500 м;

- исчезновение озера в котловине №1 (рис. 1∂) в 2006 г. происходило без прорывного паводка, так как при этом не было следов селевого потока на участке устья р. Даррагари в кишлаке Пашгор;
- ниже уступа старой генерации каменного глетчера размывы в русле были шириной более 50 м, и далее происходило отложение селевой массы на конусе площадью около 40 тыс. м<sup>2</sup>.



Рис. 1. Прорыв озера в верховьях р. Даррагари (бассейн р. Панджшер, Афганистан) 12 июля 2018 г.: а - котловина будущего озера 19.09.2013 (WorldView2), б – озеро 11.06.2018 (Sentinel 2A), *в* – озеро 06.07.2018 (Sentinel 2A), *г* – котловина без озера 16.07.2018; ∂ – схема условия прорыва озера 19.09.2013 (WorldView2): 1 – котловина озера, исчезнувшего в 2006 г., 2 –котловина озера, прорвавшегося в 2018 г., 3 – тело молодой генерации каменного глетчера (зелёные границы), 4 – язык старой генерации каменного глетчера, 5 – ледник, питавший озеро 2, 6 – ледник, питавший озеро 1. Синяя штриховая линия - подземный канал стока из озера 2, жёлтая штриховая линия подземные каналы стока из озера 1, жёлтая сплошная линия – русло потока с ледника, питавшего озеро 1: e – участок двух генераций каменного глетчера до прорыва озера 2:  $\mathcal{K}$  – участок двух генераций каменного глетчера до прорыва озера 2: 1 – молодая генерация каменного глетчера, 2 – следы водного потока на поверхности старой генерации каменного глетчера, 3 – участок выхода прорывного паводка из подземного канала в старой генерации каменного глетчера, 4 – отложения прорывного паводка и селя, 5 – фронтальная зона старой генерации каменного глетчера; и – кишлак Пашгор до прорывного паводка и селя (19.09.2013, WorldView2): 1 – конусная терраса с участками с/х культур, жёлтый контур – отложения прорывного паводка и селя 2018 г.; к – кишлак Пашгор после прорывного паводка и селя (16.07.2018 г. Sentinel 2A): 2 – отложения прорывного паводка и селя, 3 – подпрудное озеро.

Fig. 1. Lake outburst in the upper reaches of the Darragari River (Panjsher River basin, Afghanistan) on 12 July 2018: a - basin of the future lake (WorldView-2 satellite image, 19 September 2013);  $\delta$  - lake (Sentinel-2A satellite image, 11 June 2018); e - lake (Sentinel-2A satellite image, 6 July 2018); e - basin without lake (Sentinel-2A satellite image, 16 July 2018);  $\partial$  - lake outburst conditions scheme (WorldView-2 satellite image, 19 September 2013): 1 - lake basin, which disappeared in 2006; 2 - basin of the lake which outburst occurred in 2018; 3 - body of the young generation of rock glacier (green borders); 4 - tongue of the old generation of rock glacier; 5 - glacier that fed the lake 2; 6 - glacier that fed the lake 1, blue bar line - underground runoff channels from lake 2, yellow bar line - underground runoff channels from lake 1, yellow solid line - flow channel from the glacier that fed the lake 1; e section of two rock glacier generations before the lake 2 outburst;  $\mathcal{H}$  - section of two rock glacier generations before the lake 2 outburst): 1 - young generation of rock glacier; 2 - traces of water flow on the surface of the old generation of rock glacier; 3 - outlet section of outburst flood from an underground channel in the old generation of rock glacier; 4 - deposits of outburst flood and debris flow; 5 - frontal zone of the old generation of rock glacier; u - Pashgor village before the outburst flood and debris flow (WorldView-2 satellite image, 19 September 2013): 1 - fan terrace with areas of agricultural crops, yellow contour - deposits of outburst flood and debris flow in 2018;  $\kappa$  - Pashgor village after outburst flood and debris flow (Sentinel-2A satellite image, 16 July 2018): 2 - deposits of outburst flood and debris flow: 3 - dammed lake

На расстоянии более 13 км от озера происходило отложение селевой массы в пределах кишлака Пашгор на площади 0,17 км<sup>2</sup> (рис. 1к, №2). При этом образовалось подпрудное озеро (рис. 1к, №3), которое затопило невысокую террасу с сельскохозяйственными угодьями (рис. 1u, №1).

#### Прорывы озера в верховьях р. Шаркин (бассейн р. Санглеч, Афганистан)

На рис. 2 показана динамика озера в верховьях р. Шаркин до и после прорывов и участка конуса выноса в долине р. Санглеч.

По данным анализа космоснимков Landsat 8 и Sentinel 2A было выявлено два случая наполнения котловины и прорыва образовавшегося озера в 2014 и 2018 гг. На космоснимках Landsat 8 зафиксировано существование озера площадью около 35-40 тыс.  $m^2$  в середине июня 2014 г. На рис. 2a,  $\delta$  показано, что 29 июля озеро имело площадь около 45 тыс.  $m^2$ , a 14 августа его уже не было. На конусе выноса изменения произошли в период 7–14 августа 2014 г. (рис.  $2\mathcal{K}$ , u). В другие годы и весной, и летом наличие озера не зафиксировано, или обнаружено озеро площадью до 10 тыс.  $m^2$  (2013, 2015, 2016 и 2017). В следующий раз наполнение котловины водой произошло в 2018 году уже в конце мая – начале июня. И озеро просуществовало до 8 июля с максимальной площадью 47,2 тыс.  $m^2$  (рис. 2a). Затем 13 июля его площадь уменьшилась до 22,2 тыс.  $m^2$  (рис. 2a). При этом на конусе выноса в этот же период зафиксированы значительные изменения (рис.  $2\pi$ ). В августе уровень воды в озере ещё сильнее упал и площадь его составила около 10 тыс.  $m^2$ .

Такая же площадь озера наблюдалась в 2019 г., и котловина озера не заполнялась до максимального уровня. Как и в случае озера в верховьях р. Даррагари (см. рис. 1) в тыловой зоне каменного глетчера в верховьях р. Шаркин находятся два ледника, но площадь их значительно больше – 0,3 и 0,8 км<sup>2</sup> (рис. 2*e*, №2). Длина подземного канала стока воды из озера в массиве каменного глетчера (рис. 2*e*, №3) составляет 1,5 км. Следы проявления селей отмечены ниже фронтального уступа каменного глетчера молодой генерации вдоль боковой границы каменного глетчера старой генерации (рис. 2*e*, №4, №5).

Таким образом, озеро в 2014 г. прорывалось полностью с формированием прорывного паводка, а в июле 2018 г прорывалось лишь частично, но при этом следы прохождения паводка присутствовали. Это может свидетельствовать об изменениях подземных каналов стока.



Рис. 2. Прорывы озера в верховьях р. Шаркин (бассейн р. Санглеч, Афганистан) в 2014 и 2018 гг.: a – озеро 29.07.2014 до прорыва (Landsat 8),  $\delta$  – озеро 14.08.2014 после прорыва (Landsat 8), e – озеро 28.06.2018 до прорыва (Sentinel 2A), e – озеро 13.07.2018 после прорыва (Sentinel 2A),  $\partial$  – озеро 22.08.2018, e – схема условий прорыва озера на космоснимке 06.09.2019 (Sentinel 2A): 1 – контур озера до прорыва 2018 г., 2 – ледники, 3 – молодая генерация каменного глетчера – зелёные линии, красная линия – путь подземного прорыва озера; 4 – старая генерация каменного глетчера – зелёные линии, красная линия – путь прорывного паводка; 5 – отложения прорывного паводка и селевого потока; конус выноса р. Шаркин:  $\mathcal{W}$  – 07.08.2014 (Landsat 8), u – 14.08.2014 (Landsat 8), красный контур – отложения прорывного паводка и селевого потока;  $\kappa$  – 28.06.2018 (Sentinel 2A), n – 13.07.2018 (Sentinel 2A), красный контур – отложения прорывного паводка и селевого потока

Fig. 2. Lake outbursts in the upper reaches of the Sharkin River (Sanglech River basin, Afghanistan) in 2014 and 2018: *a* - lake before the 2014 outburst (Landsat-8 satellite image, 29 July 2014);  $\delta$  - lake after the 2014 outburst (Landsat-8 satellite image, 14 August 2014); *e* - lake before the 2018 outburst (Sentinel-2A satellite image, 28 June 2018); *e* - lake after the 2018 outburst (Sentinel-2A satellite image, 28 June 2018); *e* - lake after the 2018 outburst (Sentinel-2A satellite image, 28 June 2018); *e* - lake after the 2018 outburst (Sentinel-2A satellite image, 3 July 2018);  $\partial$  - lake on the Sentinel-2A satellite image, 22 August 2018; *e* - lake outburst conditions scheme (Sentinel-2A satellite image, 6 September 2019): 1 - lake contour before the 2018 outburst, 2 - glaciers, 3 - young generation of rock glacier (green lines), red bar line - the way of underground lake outburst, 4 - old generation of rock glacier (green lines), red solid line - way of outburst flood, 5 - deposits of outburst flood and debris flow. Sharkin River fan:  $\mathcal{M}$  - on the Landsat-8 satellite image, 7 August 2014; *u* - on the Landsat-8 satellite image, 14 August 2014 (red contour - deposits of outburst flood and debris flow);  $\kappa$  - on the Sentinel-2A satellite image, 28 June 2018;  $\pi$  - on the Sentinel-2A satellite image, 13 July 2018 (red contour - deposits of outburst flood and debris flow);  $\kappa$  - on the Sentinel-2A satellite image, 28 June 2018;  $\pi$  - on the Sentinel-2A satellite image, 14 August 2014 (red contour - deposits of outburst flood and debris flow);  $\kappa$  - on the Sentinel-2A satellite image, 28 June 2018;  $\pi$  - on the Sentinel-2A satellite image, 13 July 2018 (red contour - deposits of outburst flood and debris flow)

#### Прорывы озера в верховьях р. Каргалы (Казахстан)

В работе [*Medey u dp., 2016*] отмечено, что в бассейне р. Каргалы (Каргалинка) в период с 1921 по 1999 г. зафиксированы наносоводные селевые паводки и грязекаменные селевые потоки дождевого генезиса. 23 июля 2015 г. на г. Алматы обрушился сель в результате прорыва небольшого озера, которое тогда называли Безымянным, так как не ожидали от него угрозы (https://forbes.kz/process/probing/kak\_sel\_proshel\_v\_almatyi\_skvoz\_plotinu\_na\_reke\_kargal inka).

На рис. 3 показана динамика озера в верховьях р. Каргалы и схема формирования прорывных паводков. Было выявлено, что в годы, предшествующие прорыву озера (2013-2014) и последующие (2016-2018), озеро отсутствовало. В мае-июне 2015 года происходило заполнение котловины водой – озеро зафиксировано на заснеженной поверхности каменного глетчера (рис. 3a,  $\delta$ ). В середине мая площадь озера была 12 тыс. м<sup>2</sup> (рис. 3a). 11 июля (за 12 дней до прорыва) площадь озера достигла 77,2 тыс. м<sup>2</sup> (рис. 3e). К 18 июля (за 5 дней до прорыва) площадь озера уменьшилась и составляла около 55 тыс. м<sup>2</sup>.

В результате прорыва озера 23 июля 2015 г. и схода селевого потока в г. Алматы пострадало 456 домов, из них 9 разрушены, подтоплены 44 улицы, 32 единицы автотранспорта (https://www.nur.kz/831907-iz-za-skhoda-selya-v-almaty-podtopleno-450-d.html). В работе [*Kanuцa и др., 2018*] приведена площадь озера 10 тыс.  $M^2$ , но озеро отнесено к категории селеопасных, и это оправдалось. В 2019 г. прорыв озера повторился. Площадь озера 15 июля составляла 37,5 тыс.  $M^2$  (рис. 3*d*), а к 9 августа уменьшилась до 28 тыс.  $M^2$  (рис. 3*e*). Это произошло в результате работ по искусственному опорожнению озера (http://almaty.emer.gov.kz/index.php?id=4271). В итоге селевой поток 14 августа был значительно меньших масштабов и имел характер наносоводного паводка.

По результатам исследований определено, что прорывы озёр в верховьях р. Каргалы происходят по подземным каналам каменного глетчера протяжённостью более 1 км (рис. 3ж, №3). Ледник, питающий озеро, имеет площадь около 0,95 км<sup>2</sup>.



Рис. 3. Прорывы озера в верховьях р. Каргалы (Казахстан) в 2015 и 2019 гг. Участок озёр на каменном глетчере на космоснимках Sentinel 2A: а – 15.05.2015, б- 16.06.2015, в – 11.07.2015, г – 05.06.2019, д – 15.07.2019, е – 09.08.2019. Схема участка подземных прорывов озера: ж (12.08.2012 Google Earth) – 1) ледник, 2) контур озера в 2015 г., 3) каменный глетчер (светлозелёная линия) и подземный канал стока с озера (синяя штриховая линия), 4) участок выходного портала подземного канала стока и селевые отложения (красный контур)

Fig. 3. Lake outburst in the upper reaches of the Kargaly River (Kaskelen River basin, Kazakhstan) in 2015 and 2019. Site with lakes on rock glacier on multi-temporal Sentinel-2A satellite images: a - 15 May 2015,  $\delta - 16$  June 2015, e - 11 July 2015, e - 5 June 2019,  $\partial - 15$  July 2019, e - 9 August 2019. Scheme of the site with lake underground outbursts on the satellite image from the Google Earth service, 12 August 2012 ( $\mathcal{R}$ ): 1 - glacier, 2 - lake contour in 2015, 3 - rock glacier (green line) and underground runoff channel from the lake (blue bar line), 4 - site of the underground runoff channel and debris flow deposits (red contour)



Прорыв озера в верховьях р. Даштдара 7 августа 2002 г. (Таджикистан)

Рис. 4. Прорыв озера Дашт на Памире в 2002 г. (Таджикистан): *а* – контур озера на космоснимке Landsat 7 от 05.08.2002 г., *б* – схема участка прорыва озера (космоснимок 31.08.2008 г. Google Earth): 1 – ледник, 2 - котловина прорвавшегося озера, 3 – каменный глетчеры, красная штриховая линия – подземный канал стока, красная сплошная линия – путь прорывного паводка и селевого потока с участками промежуточной аккумуляции; *в* – кишлак Дашт на космоснимке Landsat 7 от 05.08.2002 г., *с* – конус выноса селя (1) на участке кишлака Дашт и подпрудное озеро на р. Шахдара (2) на космоснимке Landsat 7 от 21.08.2002 г.

Fig. 4. Lake outburst in the upper reaches of the Dashtdara River (Shakhdara River basin, Tajikistan) on 7 August 2002: *a* - contour of the lake before the outburst (Landsat-7 satellite image, 5 August 2002);  $\delta$  - scheme of the lake outburst site (satellite image from the Google Earth service, 31 August 2008): 1 - glacier, 2 - basin of the emptied lake, 3 - rock glacier below lake, 4 - existing lake 2, red bar line - underground runoff channel, , red solid line - way of the outburst flood and debris flow with areas of intermediate accumulation; *s* - Dasht village (Landsat-7 satellite image, 5 August 2002); *c* - debris flow fan (1) in Dasht village and dammed lake at Shakhdara River (2) (Landsat-7 satellite image, 21 August 2002)

На рис. 4 показано состояние озера и каменного глетчера в верховьях р. Даштдара и кишлака Дашт на конусе выноса до и после прорыва. В результате прорыва озера и прохождении селевого потока практически полностью уничтожен кишлак Дашт и частично пострадал кишлак Лангар. Погибли 24 человека, разрушено 75 домов. Кроме того, уничтожены 2 моста, медпункт, магазин, средняя школа, библиотека, клуб, 2 животноводческие фермы, 510 голов скота, 4 км автомобильной дороги, 30 км линий электропередач, 8 трансформаторов, 7 км линий связи, 10 км оросительных сооружений, 61 га посева зерновых культур, 17 единиц техники (https://ria.ru/20020807/204214.html).

О селевой катастрофе в кишлаке Дашт в 2002 г. сообщалось в публикациях [Пирмамадов, 2013; Komatsu, Watanabe, 2013; Mergili, Schneider, 2011]. Данные о динамике озера за период 1968-2008 приведены в работе [Komatsu, Watanabe, 2013]. По этим данным площадь озера в 1968 г. составляла 7,0 тыс. м<sup>2</sup>, в 1973 г. – 15,0 тыс. м<sup>2</sup>, в 1983-84 гг. – 20,0 тыс. м<sup>2</sup>, в 2002 г. – 32,0 тыс. м<sup>2</sup>.

Отмечено, что восточное озеро было расположено на массиве морены с ледяным ядром и являлось термокарстовым. Появление вновь в 2000 г. и увеличение восточного озера в 2002 г. до 37 тыс. м<sup>2</sup> по мнению авторов статьи [Mergili, Schneider, 2011] было связано с блокировкой подземного канала стока в морене с ледяным ядром, а прорыв – с разблокировкой подземного канала. В работе [Пирмамадов, 2013] причиной прорыва озера названо падение блока льда в озеро.

На приведённых в статье фрагментах снимков видно, что по крайней мере с 1992 г. по настоящее время западнее озера, которое прорвалось в 2002 г. (рис.  $4\delta$ , №2) существует озеро площадью 12,0 тыс. м<sup>2</sup> (рис.  $4\delta$ , №4), с которого на протяжении 250 м существует поверхностный сток. Западное озеро в отличие от прорвавшегося (восточного) озера не меняется в размерах уже более 15 лет.

Так как на уступе каменного глетчера ниже западного озера существуют следы эрозионных воронок, можно предположить, что были прорывные паводки и по подземному каналу стока с западного озера.

По результатам дешифрирования космоснимков получены следующие данные:

- 1) часть ледника, питавшая озеро, имела площадь 0,6 км<sup>2</sup>,
- 2) до прорыва озеро имело площадь 44 тыс. м<sup>2</sup> (определена по космоснимку Landsat 7 от 05.08.2002 г. (рис. 4*a*) и сопоставлению с границами котловины, которые видны на космоснимке 31.08.2008 г. Google Earth (рис. 4*б*, №2),
- 3) длина подземного канала стока, по которому произошёл прорыв озера, составляет 680 м,
- 4) ниже выходного портала подземного канала происходила подрезка фронтального уступа левого каменного глетчера,
- 5) на конусе выноса р. Даштдара площадь селевых отложений составила более 0,36 км<sup>2</sup> (рис. 4*г*, №1),
- 6) на р. Шахдара в результате схода селя образовалось подпрудное озеро площадью 0,11 км<sup>2</sup> (рис. 4*г*, №2).

## Прорывы озера в верховьях р. Сарын-Су (бассейн р. Чегем, Кабардино-Балкария, Россия)

По данным сравнения аэрофотоснимков и космоснимков выявлено два случая значительного увеличения площади озера в тыловой депрессии каменного глетчера в верховьях р. Сарын-Су (рис. 5). Максимальный размер озера зафиксирован на космоснимке SPOT 5 31.07.2007 г. (рис.  $5\partial$ ) – 36,7 тыс.  $m^2$  и на аэрофотоснимке 09.08.1978. Так как значительных изменений в русле реки ниже каменного глетчера на снимках в последующие годы не выявлено, можно предположить, что масштабы прорыва были невелики. Протяжённость подземного канала стока в каменном глетчере составляет 880 м. В настоящее время сток с ледника происходит в другом направлении (часть ледника, обращённая к озеру, растаяла) и озеро питается за счёт таяния снега и

атмосферных осадков. В связи с этим вероятность заполнения котловины водой уменьшилась.



Рис. 5. Динамика озера в верховьях р. Сарын-Су на Кавказе (бассейн р. Чегем, Россия): a – аэрофотоснимок 08.09.1973 г.,  $\delta$  – аэрофотоснимок 09.08.1978 г., e – аэрофотоснимок 1983 г., e – космоснимок IRS ID от 11.08.2006,  $\partial$  – космоснимок SPOT от 5 31.07.2007 г., e – космоснимок IRS P5 от 29.08.2009 г.

Fig. 5. Dynamics of the lake in the upper reaches of the Saryn-Su River (Chegem River basin, Russia): *a* - aerial image, 8 September 1973;  $\delta$  - aerial image, 9 August 1978; *e* - aerial image, 1983; *e* - IRS-ID satellite image, 11 August 2006;  $\delta$  - SPOT-5 satellite image, 31 July 2007; *e* - IRS-P5 satellite image, 29 August 2009. *Designations*: blue outline - lake Прорыв озера Маашей в долине р. Мажой (бассейн р. Чуя, Алтай, Россия) в 2012 г.

В работах [Докукин, 2014; Докукин, 2015] приведены данные о прорыве озера Маашей вследствие блокировки подземного канала стока воды из озера в теле каменного глетчера. На рис. 6 показана схема участка прорыва. Подземный канал имел длину 440 м (рис. 6a, №3).



Рис. 6. Озеро Маашей на Алтае до и после прорыва на космоснимках Google Earth: *a* – 30.05.2002, *б* – 02.09.2013. 1 – озеро Маашей, 2 – каменный глетчер (контур зелёной линии), 3 – подземный канал стока, 4 – поверхностный сток с озера, 5 – эрозионный врез от прорыва озера, 6 – селевые отложения.

Fig. 6. Maashey Lake (Chuya River basin, Russia) before and after the outburst on multi-temporal satellite images from the Google Earth service: a - 30 May 2002;  $\delta - 2$  September 2013. 1 - Maashey Lake, 2 - rock glacier (green line), 3 - underground runoff channels, 4 - surface runoff from the lake, 5 - erosion incision from the lake outburst, 6 - debris flow deposits

В отличие от других прорывов озёр, происходивших по подземным каналам стока, озеро Маашей прорвалось в результате размыва тела каменного глетчера на его поверхности водным потоком, сформировавшимся после аномальных ливней. Деформация подземного канала стока, существовавшего более 100 лет, произошла вследствие подвижки каменного глетчера (рис. 6a, №2).

По результатам исследований прорывов озёр на участках каменных глетчеров составлена таблица параметров (таблица).

В качестве основных выводов исследования случаев прорыва озёр на каменных глетчерах можно отметить, что:

- большую часть времени озёрные котловины оставались пустыми, и их заполнение происходило в начале тёплого сезона в год прорыва, что позволяет выявить опасность прорыва озера заблаговременно;
- 2) озёра с плотинами каменных глетчеров, как озеро Маашей, могут существовать десятки и сотни лет;
- 3) котловина озера может опорожняться не сразу на полную глубину,

- 4) опорожнение озёрной котловины может происходить без прорывного паводка,
- 5) котловины озёр могут заполняться и прорываться несколько раз с промежутком в несколько лет,
- 6) в будущем озёра могут появляться на участках каменных глетчеров, где они раньше не были зафиксированы, что обуславливает необходимость мониторинга каменных глетчеров и оценки параметров рельефа котловин, как вместилищ озёр.

Таблица. Параметры озёр и подземных каналов стока

Table Lake and underground channels parameters

Nê	Горный район, страна	Название реки, (бассейн реки)	Координаты озера	Год прорыва	Абс. высота, м	Площадь озера до прорыва, тыс. м2	Длина подземного канала, м	Угол наклона подземного канала, градус	Расстояние до устья притока (конуса выноса), м
1	Алтай, Россия	Мажой, Чуя	N50°09'11,06" E87°34'04.56"	2012	1984	286,4	440	4,4	10700
2	Иле Алатау, Казахстан	Каргалы	N43°00'25,08" E76°50'51,34"	2015, 2019	3510	77,2 (37,2)	1170	7,5	18000
3	Памир, Таджикистан	Даштдара, Шахдара	N37°13'13,75" E71°44'01,65"	2002	4390	44,6	680	9,6	10700
4	Гиндукуш, Афганистан	Шаркин, Санглеч	N36°22'50,54" E71°07'40,47"	2014, 2018	4640	47,2	1520	7,2	12400
5	Гиндукуш, Афганистан	Даррагари, Панджшер	N35°28'12,48" E69°37'40,46"	2018	4450	62,6	1550 (1000)	14,3	13600
6	Кавказ, Россия	Сарын-Су, Чегем	N43°16'05,59" E42°58'33,49"	1978, 2007	3540	36,7	880	10,3	7700

Селепроявления на фронтальных уступах каменных глетчеров

В целом каменные глетчеры являются устойчивыми образованиями, существующими в таком виде тысячи лет.

В работе [*Lugon, Stoffel, 2010*] каменный глетчер в долине р. Ритиграбен (бассейн р. Маттерталь, Швейцария) охарактеризован как селевой очаг и приводятся данные о скорости движения фронтальной части каменного глетчера 0,7–0,8 м в год (скорость увеличилась в последние годы в 3 раза), об объёмах выноса с каменного глетчера, аккумулировавшихся на конусе выноса р. Ритиграбен 15–30 тыс. м<sup>3</sup>.

Сравнение современных космоснимков показало, что на некоторых уступах каменных глетчеров наблюдается формирование оплывин и селевых рытвин. На рис. 7 показаны изменения на уступе каменного глетчера в верховьях левого притока р. Башиль-Аузу-Су (бассейн р. Чегем, Кабардино-Балкария) после селя в 2016 г.



Рис. 7. Селевые рытвины, появившиеся на фронтальном уступе каменного глетчера в верховьях левого притока долины р. Башиль-Аузу-Су (бассейн р. Чегем, Кабардино-Балкария): *a* – космоснимок WorldView2 (Bing Maps) от 08.31.2010 г. (пунктирной линией показана будущая бровка селевых рытвин), *б* – космоснимок от 17.10.2019 г. (Google Earth) (красной линией показана общая бровка нескольких селевых рытвин), *в* – отложения селя, сошедшего с каменного глетчера в 2016 г. (космоснимок от 17.10.2019 г. (Google Earth)

Fig. 7. Debris flow gullies that formed at the frontal ledge of the rock glacier in the upper reaches of the Bashil-Auzu-Su River (Chegem River basin, Russia) left tributary: a - WorldView-2 satellite image (Bing Maps), 31 August 2010 (red dotted line shows future edge of the debris flow gullies);  $\delta$  - satellite image from the Google Earth service, 17 October 2019 (red line shows the common edge of some debris flow gullies), e - deposits of the debris flow that came down from the rock glacier in 2016, (satellite image from the Google Earth service, 17 October 2019)

Протяжённость уступа каменного глетчера с обвально-осыпным шлейфом с учётом среднего угла наклона 32° составляет около 400 м. Бровка каменного глетчера вследствие образования рытвин отступила на 12-15 м (рис. 76). Рытвины были неглубокие. Приблизительный объём отложений на конусе выноса составил около 10–12 тыс. м<sup>3</sup> (рис. 76).

В последние годы усилились процессы деградации мерзлоты, и происходит активизация формирования оплывин на их фронтальных уступах. Примером таких событий являются катастрофические селевые потоки в поселке Аршан Тункинского района республики Бурятия 28 июня 2014 г. [*Макаров и др., 2014*]. Во всех работах,

посвящённым этому событию, массивы, в которых формировались селевые потоки, не характеризовались как каменные глетчеры, хотя есть все признаки отнести их к каменным глетчерам. На рис. 8*а, б* показаны селепроявления на уступе каменного глетчера в истоках р. Вторая Шихтолайка бассейна р. Кынгарга в Бурятии (для сравнения приведен участок фронтального уступа каменного глетчера на Кавказе – левый склон долины р. Черек Безенгийский) (рис. 8*в, г*).



Рис. 8. Ниши оплывин на уступах каменных глетчеров на космических снимках и аэрофотоснимках в истоках р. Вторая Шихтолайка (Бурятия): *a* – 31.08.2013 (Google Earth), *б* – 26.09.2016 (Google Earth); на левом склоне долины р. Черек Безенгийский: *в* – аэрофотоснимок 1957 г., *с* – космоснимок WorldView1 от 31.08.2010.

Fig. 8. Earthflow niches on ledges of the rock glaciers in the sources of the Second Shikhtolaika River (Kyngarga River basin, Tunka Ridge, Russia): a - satellite image from the Google Earth service, 31 August 2013;  $\delta$  - satellite image from the Google Earth service, 26 September 2016 and on the left slope of the Cherek Bezengiyskiy River valley (Cherek River basin, Caucasus, Russia); e - aerial image, 1957; e - WorldView-1 satellite image, 31 August 2010

Объём отложений селя 2014 г. на р. Вторая Шихтолайка составил 720 тыс. м<sup>3</sup> [*Макаров и др., 2014*]. Сели 2014 г. на склонах хребта Тункинские гольцы были вызваны ливнями, которые не оценены количественно, так как метеостанция Аршан была закрыта в 1997г. Подобные процессы в 1962 г. проходили вследствие выпадения 176,6 мм осадков за 16 и 17 июля.

Анализ изменений на уступе каменного глетчера на склоне долины р. Черек Безенгийский показал, что ниша отрыва оплывины селя, сошедшего до 1957 г.,

постепенно заполняется наступающей массой каменного глетчера. Скорость наступания по данным смещения крупных глыб составила 0,7-0,8 м/год. Предположительно, в связи с этим селевая опасность каменного глетчера со временем повышается. Массовый сход селей с уступов каменных глетчеров был отмечен после ливней 1983 г. в бассейне р. Чегем в Кабардино-Балкарии [Докукин, 1987; Сейнова, Мезенина, 1987]. И в будущем возможны селевые потоки, подобные событиям 2014 г. в бассейне р. Кынгарга.

В результате анализа динамики каменных глетчеров и селепроявлений в них можно сделать вывод о том, что при выпадении аномальных атмосферных осадков на участках уступов глетчеров в будущем возможны катастрофические селевые потоки, превышающие по объёму выноса, ранее зафиксированные в XX веке.

#### Список литературы

- Бруханда В. И. (1976). Каменные глетчеры Кавказа и Памиро-Алая и их связь с пульсациями ледников. // Материалы гляциологических исследований, вып. 27: 63–70.
- Володичева Н. А., Лабутина И. А. (1996). Каменные глетчеры Приэльбрусья. Материалы гляциологических исследований, вып. 80: 98–102.
- Галанин А. А. (2009). Каменные глетчеры северо-востока Азии: строение, генезис, возраст, системный географический анализ. Криосфера Земли, т. XIII. № 4: 49–61.
- Горбунов А. П. (2006). Каменные глетчеры Азии за пределами России. // Криосфера Земли, т. Х. № 4: 19–28.
- Докукин М. Д. (1987). Каменные глетчеры Центрального Кавказа как селевые очаги. Труды Высокогорного геофизического института, вып. 70: 33–42.
- Докукин М. Д. (1993). Типы моренного рельефа и селевая опасность: (На примере сев. склона Центрального Кавказа): автореферат дисс. кандидата географических наук: 11.00.04 / МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва. 22 с.
- Докукин М. Д. (2014). Выдающиеся прорывы озёр в 2012–2013 гг. (по материалам ДЗЗ). Сборник трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства. Пятигорск, вып. 20: 82–97.
- Докукин М. Д. (2015). Выдающиеся прорывы озёр в 2012-2013 гг. (по материалам ДЗЗ). Часть 2. Сборник трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства. Пятигорск, вып. 21: 41–58.
- Капица В., Шахгеданова М., Усманова З., Северский И., Благовещенский В., Касаткин Н., Мишенин В., Ребров Ю., Голенко А. (2018) Ледниковые озера Иле (Заилийского) Алатау: состояние, современные изменения, вероятные риски. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции, Тбилиси: 357–366.
- Краснослободцев И. С. (1971). О каменных глетчерах Большого Кавказа. Вестн. МГУ. Сер. 5. География, № 1: 95–97.
- Кожевников А. В., Никитин М. Ю., Лян Р. Н. (1980). Каменные глетчеры Горного Дагестана (Восточный Кавказ). Вестник Московского университета, т. 4. № 2: 14–26.
- Макаров С. А., Черкашина А. А., Атутова Ж. В., Бардаш А. В., Воропай Н. Н. (2014). Катастрофические селевые потоки, произошедшие в поселке Аршан Тункинского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г. Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 111 с.
- Медеу А. Р., Баймолдаев Т. А., Киренская Т. Л. (2016). Селевые явления Юго-Восточного Казахстана. Т. 4. Ч. 1. Антология селевых явлений и их исследования, Алматы: 576 с.
- Пирмамадов У. Р. (2013). Селевые потоки в результате прорывов высокогорных гляциальных озер на территории Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана (из опыта работ международной организации "Фокус гуманитарная помощь"). Геориск. №2: 20–23.
- Сейнова И.Б., Мезенина Т.Н. (1987). Каменные глетчеры очаги гляциальных селей в бассейне р. Чегем. Материалы гляциологических исследований, т. 60: 179-183.
- Тавасиев Р.А. (2011а). Каменные глетчеры восточного склона горы Кайджаны как очаги зарождения селевых потоков (Казбеко-Джимарайский массив). // Горные регионы: XXI век: Сборник научных трудов Сев.-Осет. гос. ун-та им. К.Л. Хетагурова, Владикавказ. Изд. СОГУ: 331–340.
- Тавасиев Р.А. (2011б). Каменные глетчеры Северной Осетии и их значение для устойчивого развития горных территорий. // Вестник Владикавказского научного центра, № 3: 48–54.

- Erokhin S. A., Zaginaev V. V., Meleshko A. A., Ruiz-Villanueva V., Petrakov D. A., Chernomorets S. S., Viskhadzhieva K. S., Tutubalina O. V., Stoffel M. (2018). Debris flows triggered from non-stationary glacier lake outbursts: the case of the Teztor Lake complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan). // Landslides. 15: 83–98.
- Giardino J. R. (1983). Movement of ice-cemented rock glaciers by hydrostatic pressure: an example from Mount Mestas, Colorado // Zeitschrift für Geomorphologie. Bd 27. H. 3. S. 297–310.
- Haeberli W. (1985). Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. // Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Eidgenossischen Technischen Hochschule Zurich. Nr. 77. S. 142.
- Komatsu T., Watanabe T. (2013). Glacier-Related Hazards and Their Assessment in the Tajik Pamir: A Short Review // Geographical Studies. Vol. 88. No. 2. P. 117–131.
- Lugon R., Stoffel M. (2010). Rock-glacier dynamics and magnitude–frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps. Global and Planetary. Change. 73 (3–4): 202– 200. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.06.004
- Mergili M., Schneider J. F. (2011). Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11: 1447–1462, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1447/2011/
- Petrakov D. A., Chernomorets S. S., Viskhadzhieva K. S., Dokukin M. D., Savernyuk E. A., Petrov M. A., Erokhin S. A., Tutubalina O. V., Glazyrin G. E., Shpuntova A. M., Stoffel M. (2018). Putting the poorly documented 1998 GLOF disaster in Shakhimardan River valley (Alay Range, Kyrgyzstan/Uzbekistan) into perspective. // Science of the Total Environment. Article 138287. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138287