DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 5th International Conference

Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018

Editors
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Publishing House "Universal"
Tbilisi 2018

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
5-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г.

Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили

Издательство Универсал
Тбилиси 2018

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე–5 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018

რედაქტორები
ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი

გამომცემლობა "უნივერსალი"
თბილისი 2018

УДК 551.311.8
ББК 26.823

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г. – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. – Тбилиси: Универсал, 2018, 671 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018. – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. – Tbilisi: Publishing House “Universal”, 2018, 671 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე–5 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018. გამომცემლობა "უნივერსალი", თბილისი 2018, 671 გვ. პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი.

Ответственные редакторы С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили
Edited by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Верстка: С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева, Е.А. Савернюк
Page-proofs: S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva, E.A. Savernyuk

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).
Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman’s book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-9941-26-283-8

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი

Селевые потоки 14-15 августа 2017 г. в бассейне р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ): условия и причины формирования, динамика, последствия

М.Д. Докукин[1], М.А. Анаев[2], М.Ю. Беккиев[1], Е.М. Богаченко[3], Э.В. Запорожченко[4], Р.Х. Калов[1], Е.А. Савернюк[5], С.С. Черноморец[5,4], М.М. Хаджиев[1], А.В. Хаткутов[1]

[1]*Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, inrush@bk.ru, mbekk@mail.ru, ruslan_kalov@mail.ru, rcnkbr@mail.ru., liparskie@mail.ru*

[2]*Главное управление МЧС России по Кабардино-Балкарской республике, Нальчик, Россия, 93538@mail.ru*

[3]*Кабардино-Балкарский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Нальчик, Россия, kbmeteo@rambler.ru*

[4]*Селевая ассоциация, Россия, ednad17@mail.ru*

[5]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, savernyuk@gmail.com, devdorak@gmail.com*

14 и 15 августа 2017 г. на г. Тырныауз сошли селевые потоки р. Герхожан-Су, которые принесли значительный ущерб. В статье приводятся результаты маршрутных и аэровизуальных обследований, дешифрирования разновременных космоснимков, наземных и вертолётных фотографий, анализа видеороликов и метеоданных. Селевые потоки р. Герхожан-Су в 2017 г., как и в 2000 и 2011 гг., стали следствием длительных высоких летних температур воздуха в год схода селя и в год, предшествующий ему. 14 августа 2017 г. произошёл сброс воды из полостей ледника с формированием водного паводка и селевого потока. Расходы селевых потоков на участке верхнего скалистого ущелья р. Кая-Арты-Су на высоте около 2600 м в 2000, 2011 и 2017 гг. были примерно одинаковыми, а объёмы прорывных водных импульсов разными. Различия в объёмах водных импульсов с ледника Каяартыбаши определили разную эрозионную способность потоков на участке нижнего моренного каньона (на высотах 2250-1800 м) и масштабы обрушений обломочного материала с его склонов. Сель 15 августа 2017 г. стал следствием обрушений, подрезанных селем 14 августа, склонов и формирования заторов в русле. Объём селевых отложений на конусе выноса р. Герхожан-Су в 2017 г. составил около 500-600 тыс. м^3, что почти в 4 раза меньше, чем в 2000 г. и почти в 3 раза больше, чем в 2011 г. Селевыми отложениями была подпружена р. Баксан, и в результате подтоплены несколько домов и затоплен мост. Огромные запасы рыхлообломочного материала в нижнем моренном каньоне определяют потенциальную угрозу катастрофических селей р. Герхожан-Су и в будущем.

р. Герхожан-Су, ледник, селевой поток, моренный каньон, селепропускной лоток, подпрудное озеро

Debris flows 14 and 15 august 2017 in the basin of Gerhozhan-Su river (Central Caucasus): conditions and causes of formation, dynamics, consequences

M.D. Dokukin[1], M.A. Anaev[2], M.Yu. Bekkiev[1], E.M. Bogachenko[3], E.V. Zaporozhchenko[4], R.Kh. Kalov[1], E.A. Savernyuk[5], S.S. Chernomorets[5,4], M.M. Khadjiev[1], A.V. Khatkutov[1]

[1]*High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, inrush@bk.ru, mbekk@mail.ru, ruslan_kalov@mail.ru, rcnkbr@mail.ru., liparskie@mail.ru*

[2]*The Main Directorate of the Ministry for Emergency Situations of Russia for the Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Russia, 93538@mail.ru*

[3]*Kabardino-Balkarian Center for Hydrometeorology and Monitoring environment, Nalchik, Russia, kbmeteo@rambler.ru*

[4]*Debris Flow Association, Russia, ednad17@mail.ru*

[5]*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, savernyuk@gmail.com, devdorak@gmail.com*

On August 15 and 16 2017 the Gerhozhan-Su river debris flows rushed to Tyrnyauz, causing significant damage. The article presents the results of route and aerovisual surveys, multi-temporal satellite images interpretation, ground and helicopter photographs, video clips and meteorological data analysis. Gerhozhan-Su river debris flows in 2017, as in 2000 and 2011, are the result of long term summer high air temperatures in the year of the debris flow and in the year preceding it. On August 14, 2017 the water released from glacier cavities with the formation of water flood and debris-flow. In 2000, 2011 and 2017 flow discharges of debris flows in the area of the upper rocky gorge of the Kaya- Arty-Su river at a height of about 2600 m were approximately the same, but the volumes of outburst water impulses were different. Differences in the volume of water impulses from the Kayaartybashi glacier determined the different erosion capacity of the streams in the area of lower moraine canyon (at the height of 2,250-1,800 m) and the collapse scale of debris material from its slopes. Debris flow on August 15, 2017 was the result of founderings which were cut by debris flow of August 14, slopes and river channel dam's formation. Debris flow deposits volume on the debris flow fan of the Gerhozhan-Su river amounted to about 500-600 thousand m3 which is almost 4 times less than in 2000 and almost 3 times more than in 2011. The Baksan river was dammed by debris flow deposits, the bridge and several houses were flooded out. Huge stocks of friable debris material in the lower moraine canyon define the potential threat of catastrophic debris flows of the Gerhozhan-Su river in the future.

Gerhozhan-Su river, glacier, debris flow, moraine canyon, debris flow transportation channel, dammed lake

Введение

Река Герхожан-Су (правый приток р. Баксан, бассейн р. Терек) является одной из самых селеопасных на Северном Кавказе [*Perov et al., 2017*]. Наиболее селеактивной является левая составляющая р. Герхожан-Су – р. Кая-Арты-Су, в верховьях которой находится зона зарождения катастрофических селей. Селевые потоки р. Герхожан-Су много раз наносили ущерб г. Тырныаузу. Информация о селях первой половины XX века представлена в [*Иогансон, Черноус, 1964*]. Разрушительными для г. Тырныауза были селевые потоки 1937, 1960, 1961, 1962, 1977, 1999, 2000, 2011. Характеристика селей р. Герхожан-Су и условия их формирования во второй половине XX века изложены в работах [*Тушинский и др., 1966; Герасимов, 1967, 1980, 1981; Флейшман и др., 1979; Докукин, 1985, 1987; Золотарев и др., 1982; Сейнова, Золотарев, 2001; Запорожченко, 2002*]. Селевая катастрофа 2000 г. была самой крупной в истории. Материалы об этой катастрофе и её причинах опубликованы в работах [*Панов и др., 2001; Сейнова, Золотарев, 2001; Запорожченко, 2002; Крыленко и др., 2004; Хаджиев, 2005; Черноморец, 2005; Seinova et al., 2007; Курбанов и др., 2008*]. По данным [*Запорожченко, 2002*] объём селевых отложений 1999 и 2000 гг. на конусе выноса составил более 2 млн. м^3. В работах [*Ильичев и др., 2003; Сейнова, 2008; Запорожченко, Каменев, 2011; Мальнева, Кононова, 2013*] показана роль гляциального фактора и дан прогноз развития

селевых процессов в XXI веке. Селевому потоку 2011 г. и сравнению его параметров с предыдущими селями посвящена работа [*Докукин и др., 2012*]. Цель настоящей статьи – охарактеризовать причины, параметры, особенности и последствия селей 14 и 15 августа 2017 г. в сравнении с предыдущими селями.

Исходные материалы и методы исследования

Селевые потоки 14 и 15 августа 2017 г. на р. Герхожан-Су и их последствия исследовались авторами как визуально на участке нижнего течения реки, так и по следам их прохождения по всей длине селевого тракта в ходе наземных и аэровизуальных маршрутов. Обследования на вертолёте Ми-8 были проведены 22 августа и 21 сентября. В работе использовались данные наземных и аэровизуальных обследований до и после схода селей в 2017 г. и в другие годы, в том числе видеоролики и фотографии сотрудников МЧС и жителей г. Тырныауза, фотографии 2000 г. М.Ю. Никитина, аэрофотоснимки разных лет в период 1957-1988 гг., космические снимки.

Космические снимки, аэрофотоснимки и фотографии, сделанные с одних и тех же точек в разные годы в наземных маршрутах, а также сделанные с примерно одинаковых ракурсов в аэровизуальных маршрутах, привязывались в программе ArcGIS по опорным точкам. В результате определялись относительные и абсолютные величины параметров толщины отложений, глубины врезания русел, следы схода оползней и обрушений склонов.

Для оценки состояния снежного покрова и активности склоновых процессов в год схода селей и в год, предшествующий ему, анализировалась серия космоснимков Sentinel 2A разрешением 10 м, включая космоснимок за день до схода селя (13.08.2017). Динамика ледника, селевых русел и склонов верхнего моренного каньона изучалась по космоснимкам 2 м разрешения SPOT 5 (21.09.2011 после селя 2011 г.) Канопус B1 (22.08.2017 г. после селя 2017 г.).

Для анализа селеопасной ситуации в 2017 г. и сравнения с предыдущим годом использовались метеоданные (средние температуры воздуха, осадки) метеостанции Чегет, автоматической метеостанции Джанкуат, гидрометеопоста Тырныауз.

Последовательно оценивались изменения, произошедшие в результате схода селевых потоков на различных участках селевого бассейна от ледникового цирка до зоны селевых отложений.

Условия формирования селевых потоков

В результате гляциологических наблюдений в 1963 г. и анализа материалов о селях 1960, 1961 и 1962 гг. в работе [*Тушинский и др., 1966*] было выявлено, что селеопасность р. Герхожан-Су увеличивается в годы с малыми запасами снега на ледниках, что в районе ледников селям предшествуют 5-10 дней с температурами не ниже 5°. В работе [10] показано, что основной причиной гляциальных селей является высокая температура воздуха (10-15°C) в ледниковой зоне продолжительностью 6-8 суток, в течение которых переполняются внутриледниковые полости. Прорыв таких полостей вызывает сход селей. В работе [*Докукин и др., 2012*] отмечено, что селю 3 августа 2011 г. в бассейне р. Герхожан-Су предшествовал период высоких температур воздуха (9 дней со среднесуточными температурами воздуха, превышавшими 10 ºC) и верхний цирк ледника Каяартыбаши в это время максимально освобождался от снежного покрова. Такое сочетание отсутствия снежного покрова и высоких температур воздуха способствовало накоплению в леднике талых вод и последующему их прорыву с прохождением паводка, следы которого были выявлены при аэровизуальном и наземном обследовании 15 августа 2011 г. При этом, что было важно, в год, предшествующий селю (в 2010 г.) были ещё более высокие температуры воздуха (это было в аномально жаркое лето 2010 г.).

Аналогичная ситуация наблюдалась и в 2016 и 2017 гг. Состояние снежного покрова на леднике Каяартыбаши в августе 2016 и 2017 гг. показано на рис. 1.

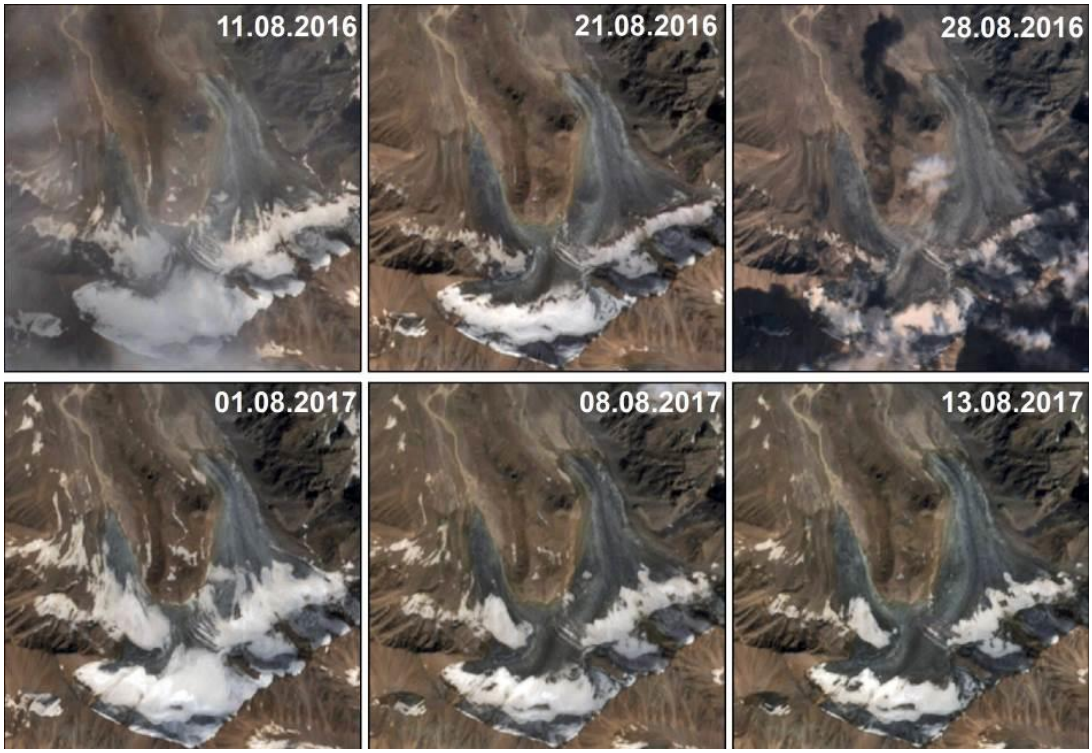

Рис. 1. Состояние снежного покрова на леднике Каяартыбаши в августе в 2016 и 2017 гг. (космоснимки Sentinel 2A).

Пологая часть верхнего цирка ледника Каяартыбаши в 2016 г. (в нижней центральной части фрагментов на рис. 1) начала освобождаться от снежного покрова после 11 августа. В период 21-28 августа 2016 г. верхняя граница снежного покрова находилась на максимальных отметках. По крайней мере, 6 суток (с 8 по 14 августа) в 2017 г., а возможно и больше, снежный покров занимал самые высокие отметки. Следовательно, и в 2016, и в 2017 гг. гляциальные условия для формирования паводков и селевых потоков были благоприятными, как и в 1999 и 2000 гг., а также как в 2010 и 2011 гг. [*Докукин и др., 2012*].

Параметры метеоусловий селеопасной ситуации приведены в табл. 1. По данным табл. 1 селю 14 августа 2017 г. предшествовало 15 суток со среднесуточными температурами воздуха на высоте 3040 м (расположение МС Чегет) более 10°С. Однако, из рис. 1 видно, что совпадение высоких температур воздуха и максимально высокого положения границы снежного покрова наблюдалось немногим более 6-7 суток. Примерно такая же ситуация была в 2016 г. во второй половине августа, когда не менее 8 суток были температуры выше 10°С и площадь снежного покрова была минимальна.

Малые величины осадков свидетельствуют о том, что селевой поток 14 августа 2017 г. имел гляциальный генезис. В г. Тырныаузе за 15 суток выпало всего 8,6 мм осадков, на г. Чегет – 12 мм, а на гляциологической станции «Джанкуат» в Адыл-Су – 12,2 мм. Такое небольшое количество осадков, тем более за 4-5 суток до схода селя, не может считаться селеформирующим. Похожая обстановка была и в 2016 г. Осадки выпали тогда, в основном, до начала периода высоких температур воздуха. Обследованиями 21 августа (наземное) и 15 июля и 26 августа 2016 г. (аэровизуальные) следов прохождения паводка на участке ледника и ниже по долине не выявлено.

Таблица 1. Метеопараметры селеопасной ситуации в 2016 и 2017 гг.

Дата 2017 г.	**Средняя температура воздуха °С**	**Осадки, мм**			**Дата 2016 г.**	**Средняя температура воздуха °С**	**Осадки, мм**
	МС Чегет	**МС Чегет**	**АМС Джанкуат**	**ГП Тырныауз**		**МС Чегет**	
31.07	11,3	0,0	0,0	0,0	18.08.	7,7	**12,4**
01.08	11,8	0,0	0,0	0,0	19.08.	10,4	0,0
02.08	12,9	0,0	0,0	0,0	20.08.	13,3	0,0
03.08	14,5	0,0	0,0	0,0	21.08.	13,7	0,0
04.08	15,4	0,0	**0,8**	0,0	22.08.	13,3	0,0
05.08	14,9	0,0	0,0	0,0	23.08.	12,7	0,0
06.08	15,1	**0,5**	**4,4**	0,0	24.08.	11,5	**2,6**
07.08	16,4	0,0	**0,4**	0,0	25.08.	11,4	0,0
08.08	15,5	**1,5**	0,0	0,0	26.08.	10,2	**4,0**
09.08	14,1	0,0	0,0	**0.3**	27.08.	10,1	0,0
10.08	10,8	0,0	0,0	**8.3**	28.08.	9,6	0,0
11.08	12,3	**9,1**	**1,3**	0,0			
12.08	12,9	**0,9**	**5,3**	0,0			
13.08	13,8	0,0	0,0	0,0			
14.08	12,3	0,0	0,0	0,0			
15.08	8,5	**5,4**	**9,6**	**7.2**			

Изменения в прирусловой зоне р. Герхожан-Су (р. Кая-Арты-Су) в результате селей 14 и 15 августа 2017 г.

Эрозионная и аккумулятивная деятельность селевых потоков проявилась на разных участках бассейна по-разному. В верховьях бассейна в зоне зарождения на поверхности ледника Каяартыбаши были видны следы потоков воды, начинающиеся как с участка раздвоения языка, так и к западу от этого участка на расстоянии около 120 м. По данным аэровизуальных обследований 22 августа и 21 сентября 2017 г. в сравнении с данными обследования 15 июля и 26 августа 2016 г. обнаружено, что вдоль правой границы западного языка, как и в 2011 г., в результате боковой эрозии подрезана боковая морена и обнажился край ледника. Выявлены следы эрозии водного потока из центральной зоны языка ледника, что не наблюдалось в 2011 г. (рис. 2).

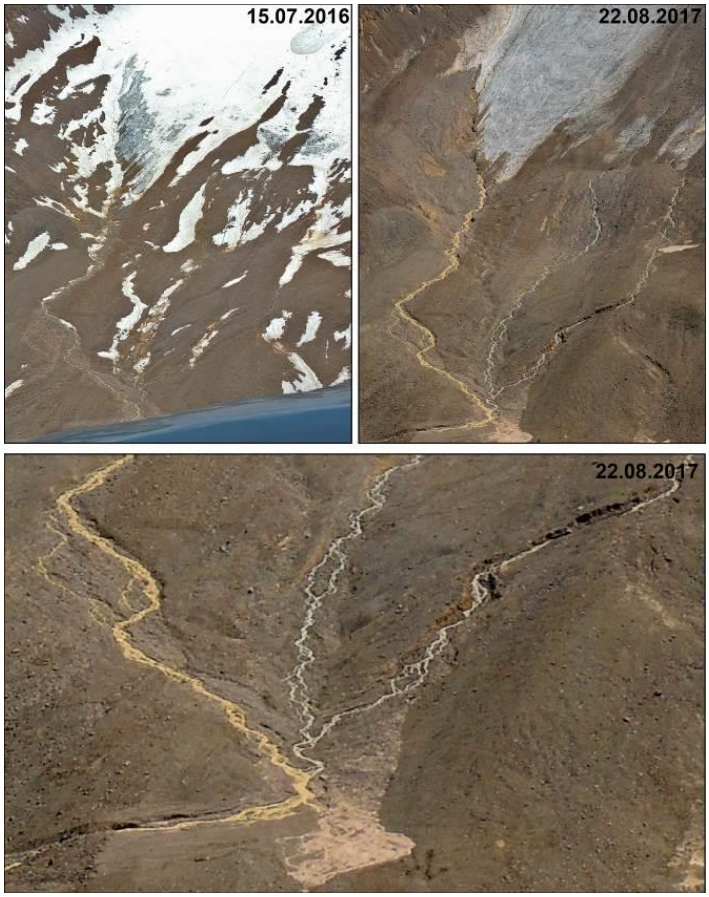

Рис. 2. Следы эрозии водных потоков ниже западного языка ледника Каяартыбаши (вертолётные снимки М.Д. Докукина). Внизу – увеличенный фрагмент снимка 22.08.2017 г.

Датировка этих изменений подтверждена космическими снимками Sentinel 2A 13 и 16 августа 2017 г. Небольшая часть обломочного материала отложилась на зандровой площадке.

На входе в верхний моренный каньон следы боковой эрозии проявились наиболее отчётливо, что позволило сделать вывод о том, что селевой поток зародился не в каньоне вследствие оползней со склонов, а на участке ледника (рис. 3).

Рис. 3. Следы эрозионной деятельности на участке входа в верхний моренный каньон (фотографии М.Д. Докукина с облётов 26.08.2017 и 22.08.2018 гг.)

За счёт боковой эрозии ширина русла увеличилась до 15-18 м.

На рисунке 4 показаны изменения в верхнем моренном каньоне как после селя 3 августа 2011 г., так и после селей 14 и 15 августа 2017 г.

Рис. 4. Верхний моренный каньон в 2011, 2016 и 2017 гг. (вертолётные снимки М.Д. Докукина).

Дно каньона углублено на 4-5 м. Ширина зоны донной и боковой эрозии составила около 20-24 м, и был вынесен весь материал, ссыпавшийся и сползший на дно каньона после селя 2011 г. Только на некоторых участках был захвачен материал более старых осыпных шлейфов подножий склонов.

Ниже верхнего моренного каньона на участке широкого пролювиального поля протяжённостью около 450 м, где обычно происходила аккумуляция селевого материала, селевой поток продолжал эрозионную работу. Селевой материал отлагался только в виде продольных валов по бортам вреза шириной до 12-15 м, глубиной около 3-4 м (рис. 5). В 2011 г. врезание потока в старые отложения было значительно меньше.

Рис. 5. Участок пролювиального поля ниже верхнего моренного каньона после селей 2011 и 2017 гг. (вертолётные снимки М.Д. Докукина).

Ниже верхнего моренного каньона на протяжении около 2600 м наблюдалась зона транзита селевого потока практически без потерь на аккумуляцию и без захвата материала в поток.

На расстоянии немногим более километра от окончания пролювиального поля в верхнем скалистом ущелье на неразмываемом скальном створе отметки высшего селевого горизонта были на такой же высоте, как и в 2000 и 2011 гг. [*Докукин и др., 2012*]. На рисунке 6 показан скальный участок правого склона долины р. Кая-Арты-Су с отметинами селей 2011 и 2017 гг.

Рис. 6. Участок верхнего скалистого ущелья со следами высшего селевого горизонта в 2011 и 2017 гг. (наземный 2011 г. и вертолётный 2017 г. снимки М.Д. Докукина, наземный 2016 г. снимок Е.А. Савернюк).

По данным [*Запорожченко, 2002*], расход селя на этом участке в 2000 г. достигал 254 м^3/с. Следовательно, можно считать, что такой же расход селя был и в 2011 и 2017 гг.

В нижнем моренном каньоне в интервале высот 2250-1800 м селевой поток насыщался обломочным материалом со склонов. На рисунках 7а,б показаны участки глубокого размыва дна каньона, подрезки и обрушения обвально-осыпных шлейфов подножий высоких (до 120 м) моренных склонов после первой волны селя 18 июля 2000 г. и после селей 3 августа 2011 г. и 14 августа 2017 г.

В результате анализа разновременных снимков был сделан вывод о том, что мощным потоком 18 июля 2000 г. дно моренного каньона было пропилено на глубину 30 и более метров (рис. 7, а). Последующие обрушения моренных склонов почти полностью засыпали эту глубокую «щель». Селем 2011 г. русло вновь было углублено на 4-6 м. В 2017 г. 14 августа сель врезался в дно каньона на 9-12 м (рис. 7б), что привело к большим, чем в 2011 г. обрушениям склонов каньона и вызвало повторный сель 15 августа 2017 г. На рисунке 8 показан участок обрушения обвально-осыпного конуса подножия правого склона верхнего моренного каньона, зафиксированный в результате аэровизуального обследования 22 августа (после схода селя 15 августа).

Обвально-осыпной конус до подрезки и обрушения имел высоту 35-40 м и ширину до 50 м. Объём составлял до 4-5 тыс. м^3. Волны селевого потока, несущие обломочный материал (белые валуны гранитов на селевой террасе выше конуса), набегали на возникшую преграду, на высоту более 10 м, что видно на снимке по наклону террасы. Повторные обрушения были и на других участках нижнего моренного каньона.

а)

б)

Рис. 7. Нижний моренный каньон после селей 2000 и 2011 гг. (а), до и после селя 14 августа 2017 г. (б) (2000 г. – кадр видеоролика, 2017 - наземные снимки М.Д. Докукина)

Рис. 8. Ниша обрушения обвально-осыпного конуса на правом склоне нижнего моренного каньона (вертолётный снимок 22 августа 2017 г. М.Д. Докукина)

Таким образом, основным поставщиком обломочного материала в селевой поток явился нижний моренный каньон, селевые процессы в котором 15 августа были инициированы обрушениями, подрезанных селем 14 августа, склонов. Возможность

формирования селей р. Герхожан-Су в результате возникновения заторов в русле показана в работе [*Курбанов и др., 2008*].

Ниже по долине р. Кая-Арты-Су до слияния с р. Сакашиль-Су и оползня Бузулган отмечен практически единственный участок промежуточной аккумуляции селевого материала протяжённостью более 300 м (рис. 9а,б). На нём отложилось приблизительно около 15-20 тыс. м^3 грязекаменного материала. Причём по наклонной полке дороги селевые массы были занесены на высоту 10 м над руслом реки.

На участке оползня Бузулган и примыкающего к нему нового оползня на правом склоне долины протяжённостью более 450 м в селевой поток 14 и 15 августа поступал дополнительный материал, за счёт масс оползня и осыпного шлейфа подножия левого склона долины р. Герхожан-Су (рис. 10а,б). Всего было 4 участка сползания на фронтальном уступе оползня Бузулган и на новом оползне выше по течению (рис. 4б). Нижняя оползневая ниша образовалась в результате селя 14 августа. На остальных участках активная фаза оползания наблюдалась во время селей 14 и 15 августа. Общий объём сползшего в селевой поток грунта составил около 8-10 тыс. м^3. Оползневой материал не образовывал плотин и не отклонял русло реки в сторону. Левый склон долины не испытывал обрушений. Боковой эрозией потока были срезаны накопившиеся после селей 2011 и 2014 гг. осыпные шлейфы подножия левого склона. Донная эрозия селевого потока практически не проявилась, так как на нескольких участках русла обнажились выходы коренных пород.

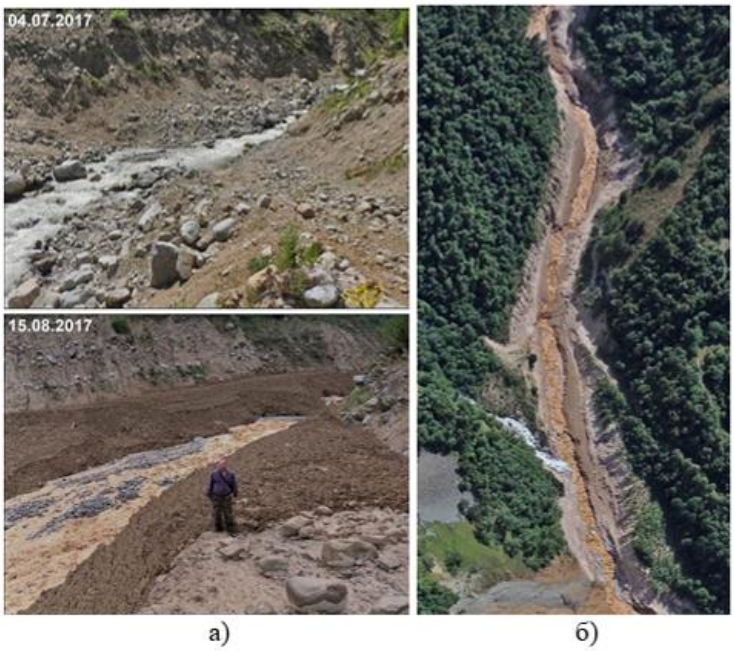

Рис. 9. Зона промежуточной аккумуляции селевых потоков 14 и 15 августа 2017 г. выше и ниже слияния рек Кая-Арты-Су и Сакашиль-Су: а) наземные фотографии до и после селя 14 августа, б – вертолётный снимок 22 августа 2017 г. (фото М.Д. Докукина).

Ниже оползня Бузулган на отрезке русла р. Герхожан-Су протяжённостью около 2800 м до входа в зону г. Тырныауза и селепропускной лоток селевой поток имел транзитный режим почти без потерь материала на аккумуляцию и без поступления дополнительного материала.

В верхней части селепропускного лотка селевые массы отложились таким же тонким слоем, как и в 2011 г. (рис. 11а). На фоне ровного дна лотка выделялась крупная глыба гранита 7-8 м в поперечнике (рис. 11б).

В селепропускном лотке толщина селевых отложений, в общем, была такой же, как и после селя 2011 г. На некоторых участках она была больше на 1,5-2 м.

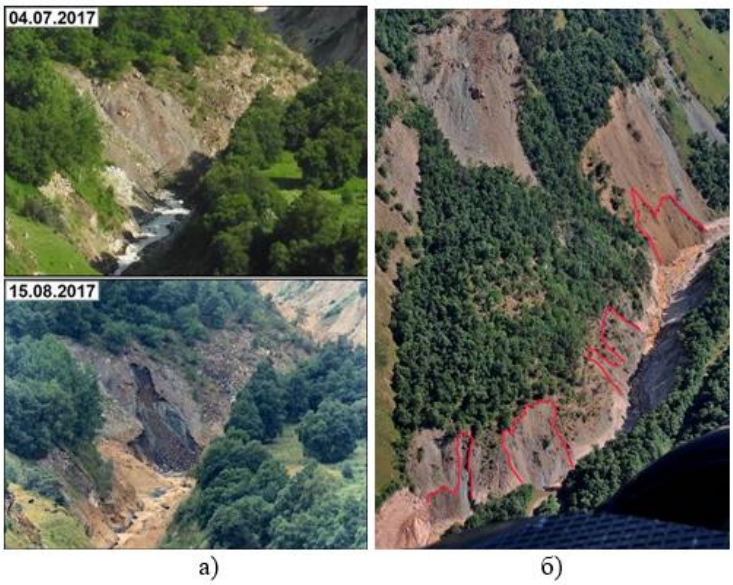

Рис. 10. Оползень Бузулган: а) до и после селя 14 августа 2017 г. (наземные снимки), б) вертолётный снимок 22.08.2017 (показаны ниши оползания) (фото М.Д. Докукина).

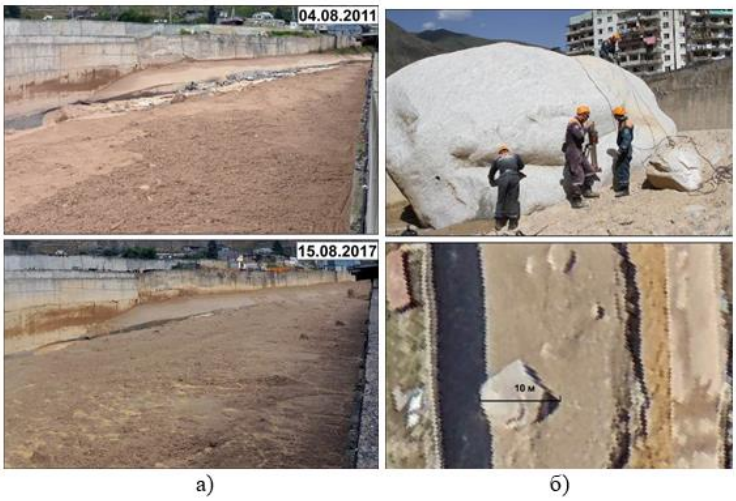

Рис. 11. Верхняя часть селепропускного лотка: а) после селей 2011 и 2017 гг. (фото М.Д. Докукина), б) гранитная глыба в лотке (вверху - фото ГУ МЧС России по КБР, внизу - фотоплан участка лотка на основе вертолётного снимка М.Д. Докукина)

На рисунке 12 показано как распределялся селевой материал в устьевой зоне р. Герхожан-Су в 2000, 2011 и 2017 гг.

По площади селевых отложений лидером является селевой процесс 2000 г. – около 530 тыс. м^2. Селевые потоки 2011 и 2017 гг. отложили свой материал на площади 105 и 195 тыс. м^2 соответственно.

Селевыми массами была перекрыта р. Баксан, уровень воды в которой поднялся на 4 м. Образовавшееся подпрудное озеро имело площадь 135 тыс. м^2. Для понижения уровня воды был сделан прокоп в селевых отложениях 2000 г. длиной около 100 м (рис. 13а).

Полностью понизить уровень р. Баксан до председевых отметок оказалось под силу только паводку от прорыва озера Башкара 1 сентября 2018 г., прорезавшему плотину из селевых отложений на глубину до 3 м. Об этом свидетельствует фото 13.09.2018 г. после паводка (рис. 13б).

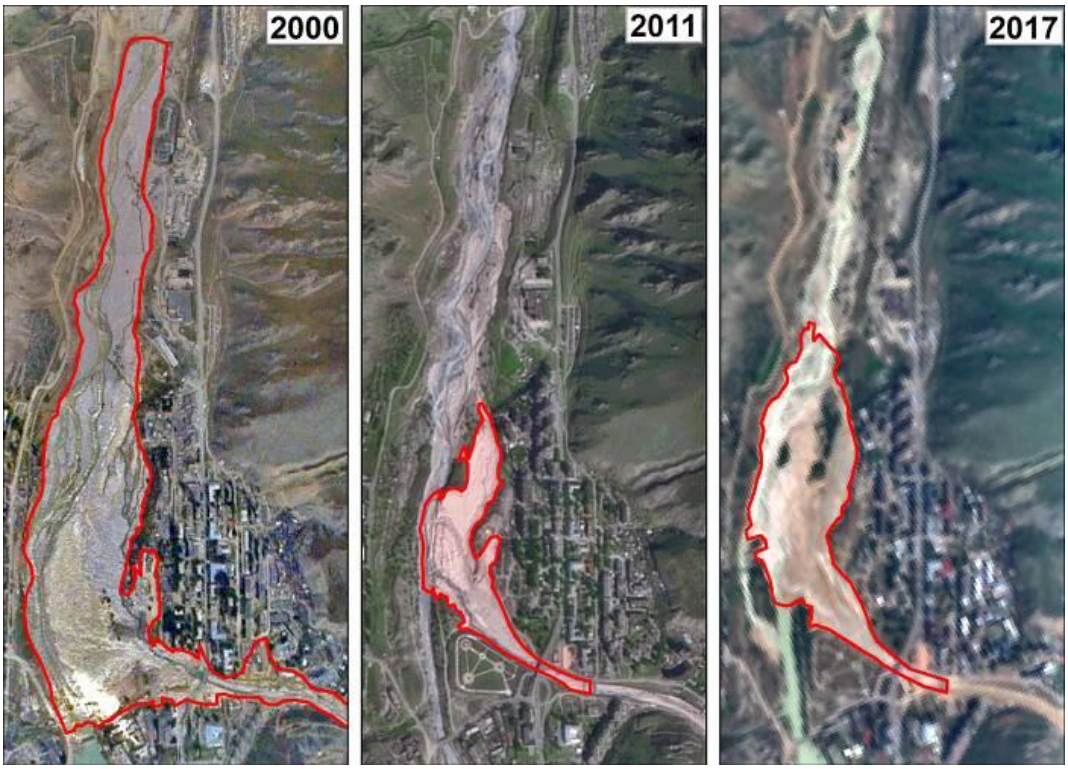

Рис. 12. Зона аккумуляции селевых потоков: 2000 г. – панорама вертолётных снимков М.Ю. Никитина, 2011 г. – космоснимок 21.09.2011 SPOT 5, 2017 – космоснимок 21.08.2017 Sentinel 2A.

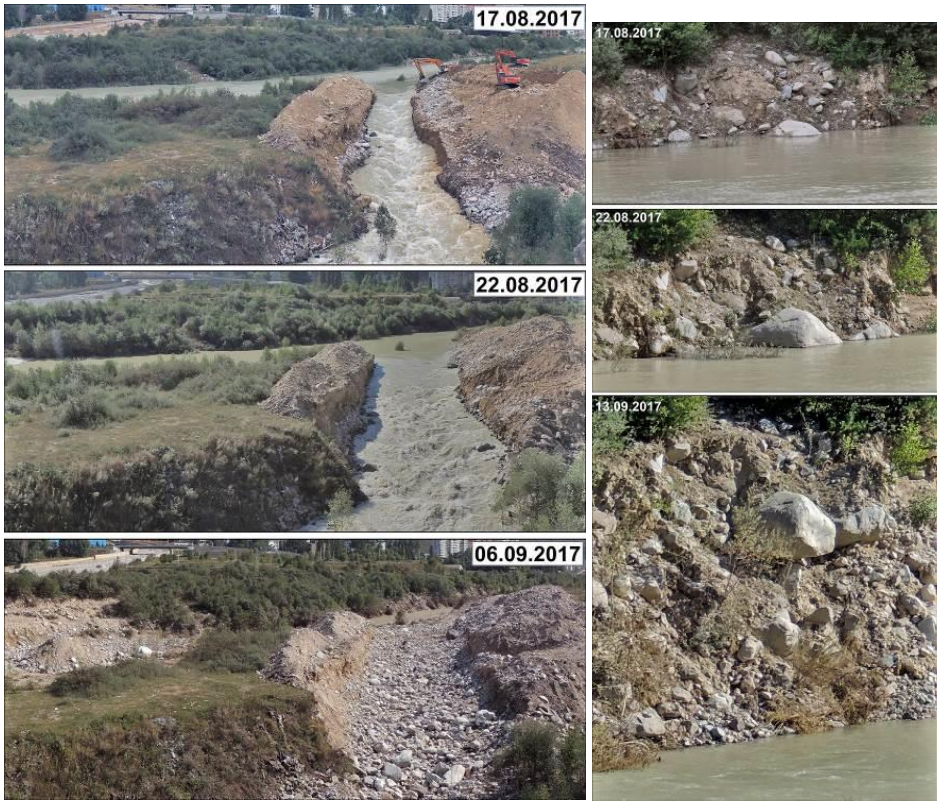

Рис. 13. Прокоп для понижения уровня подпрудного озера на р. Баксан (а) и отметки уровня воды (б) на разновременных фотографиях (фото М.Д. Докукина).

Объём отложений селей 14 и 15 августа определен исходя из площади и средней толщины отложений (около 2,5-3 м) – 500-600 тыс. м^3. На основе данных видеороликов определена скорость селевого потока на участке лотка – 8-12 м/с. Отдельные волны селя останавливались в лотке в виде желеобразной массы, а затем снова вовлекались в движение более мощными селевыми волнами, расход которых составлял 700-800 м^3/с.

Обсуждение результатов

На основе сравнения космоснимков, вертолётных снимков и многолетних наземных наблюдений можно сделать вывод о том, что благоприятная для схода селей в XXI веке ситуация складывается в те дни, когда верхний цирк ледника Каяартыбаши освобождается от снега и при этом более недели сохраняется высокая температура воздуха, превышающая 10°С на высоте более 3000 м. Для формирования гляциального паводка и селя необходимо также, чтобы такое же состояние снежного покрова и параметры температуры воздуха были и в предыдущий год до схода селя. Это, возможно, определяется особенностью формирования подлёдной дренажной системы верхнего цирка ледника, которая существует не каждый год и формируется примерно за двухлетний период. Для более определённых выводов об условиях и механизме формирования паводков с ледника Каяартыбаши и возможности их прогнозирования необходимо продолжить мониторинг процессов в ледниковой зоне.

В будущем может возникнуть ситуация, когда будет сформирована стабильная подлёдная дренажная система талых вод в верхнем цирке ледника, и прорывные паводки больше не будут формироваться. Или, наоборот, улучшение условий питания ледника может привести к блокировке возникшей подлёдной дренажной системы. На настоящий момент нельзя исключить вероятность формирования паводка и селевого потока в 2018 г., которая по аналогии с процессами 1999 и 2000 гг. остаётся высокой.

Вследствие трудности оценки максимального объёма накопления воды в леднике Каяартыбаши по причине скрытости протекания процесса подо льдом, остаётся открытым вопрос об оценке мощности будущих паводков и селевых потоков и их прогнозе.

Для прогноза и оценки опасности селей р. Герхожан-Су важным моментом является определение возможности схода нескольких селей подряд, так как каждый последующий сель повышает вероятность заполнения селепропускного лотка и выхода селевых масс на территорию жилой зоны. В этом плане важны наблюдения за эрозионными и склоновыми процессами в нижнем моренном каньоне. При глубоком врезании потока в дно каньона нарастают обрушения обломочного материала со склонов в русло реки, и селевые потоки могут повторяться несколько раз.

Заключение

Несмотря на то, что селевые потоки р. Герхожан-Су могут иметь ливневый генезис, основную угрозу разрушений и катастроф в XXI веке, как показали сели 2000, 2011 и 2017 гг., несут гляциальные сели, очагом зарождения которых является ледник Каяартыбаши.

Для определения причин, механизма формирования и динамики селевых потоков большое значение приобретает многолетний комплексный мониторинг селевого бассейна, включающий аэровизуальные и наземные маршрутные обследования, дешифрирование разновременных аэрофотоснимков и космоснимков. Результаты мониторинга показали отсутствие в верховьях р. Кая-Арты-су ледниковых озёр и позволили выявить механизм формирования гляциальных селей, связанный с накоплением воды и прорывами внутриледниковых ёмкостей, различных по объёму.

Совмещение и сопоставление разновременных фотоснимков участков склонов и русел в селевом бассейне помогает выявлять особенности динамики селевых потоков в различных зонах и определять тенденции развития процессов в будущем.

В связи с продолжающейся деградацией горных ледников и изменениями механизмов формирования селей возрастает необходимость продолжения и

совершенствования мониторинга селевых бассейнов с применением новых технических средств и технологий. На основе результатов мониторинга селевых бассейнов появляются возможности разработки локального прогноза гляциальной селевой опасности.

Список литературы

Герасимов В.А. (1967). Селевые потоки в районе г. Тырныауз 1/VIII 1960 г., 14/VIII 1961 г. и 31/VII 1962 г. Труды ВГИ, 6: 198-205.

Герасимов В.А. (1980). Селевые потоки 10 и 11 августа 1977 г. в бассейне р. Герхожансу (Северный Кавказ) и условия их образования. Селевые потоки, 4: 68-76.

Герасимов В.А. (1981). Схема прогнозирования селевых потоков в бассейне р. Герхожансу. Труды ВГИ, 49: 133-137.

Докукин М.Д. (1985). К вопросу о процессах формирования и трансформации селей в бассейне р. Герхожансу. Труды ВГИ, 57: 58-71.

Докукин М.Д. (1987). Эволюционная модель формирования гляциальных селей р. Каяартысу (бассейн р. Баксан). Труды ВГИ, 66: 33-47.

Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Богаченко Е.М., Иванов Г.И. (2012). Сель 3 августа 2011 г. в бассейне реки Герхожан-Су: причины, динамика и возможные последствия. Геориск, 2: 48-56.

Запорожченко Э.В. (2002). Сели бассейна р. Герхожан-Су: история проявления, условия формирования, энергетические характеристики. Сборник научных трудов ОАО «Севкавгипроводхоз», 15: 80-148.

Запорожченко Э.В., Каменев Н.С. (2011). Гляциологический фактор активизации селевых процессов на северном склоне Центрального Кавказа в начале XXI в. Лёд и снег, 1(113): 131-136.

Золотарёв Е.А., Поповнин В.В., Сейнова И.Б. (1982). Режим ледника Каярты на Центральном Кавказе – активного селевого очага. Материалы гляциологических исследований, 43: 69-75.

Ильичёв Ю.Г., Лурье П.М., Панов В.Д. (2003). Гляциальные сели северного склона Большого Кавказа. Труды Всероссийской конференции по селям, Нальчик, с. 120-121.

Иогансон В.Е., Черноус К.А. (1964). Северный Кавказ. В кн.: Сели в СССР и меры борьбы с ними. Наука, М., с. 22-51.

Крыленко И.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Журавлева П.Г. (2004). Динамика селевого бассейна р. Герхожан-Су (Кабардино-Балкария) после катастрофы в июле 2000 года. Материалы гляциологических исследований, 96: 159–166.

Курбанов С.О., Хостов А.Ю., Борсоков З.А. (2008). Исследование гидрологических и гидравлических условий селеформирования р. Герхожансу. В кн. Труды Всероссийской конференции по селям: 26-28 октября 2005 г. ЛКИ, Москва, 186-190.

Мальнева И.В., Кононова Н.К., 2013. Увеличение опасности формирования гляциальных селей в Кабардино-Балкарии в современный период. Лёд и снег, 3(123): 113-120.

Панов В.Д., Лурье П.М., Заруднев В.М. (2001). Селевые потоки в бассейне реки Герхожансу (Северный Кавказ) в июле 2000 г. Метеорология и гидрология, 2: 89–97.

Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. (2001). Ледники и сели Приэльбрусья. (Эволюция оледенения и селевой активности). Научный мир, Москва.

Сейнова И.Б. (2008). Климатические и гляциальные условия формирования селей Центрального Кавказа на стадии регрессии Малого ледникового периода. Селевые потоки: риск, прогноз, защита. Труды Международной конференции. Пятигорск, Россия, 22-29 сентября 2008 г. Институт «Севкавгипроводхоз», Пятигорск, с. 121-124.

Тушинский Г.К., Попов А.И., Голубев Г.Н., Мудров Ю.В., Тумель Н.В. (1966). Опыт изучения гляциальных селей Большого Кавказа (на примере реки Герхожансу бассейна реки Баксан). Информационный сборник о работах по Международному геофизическому году, 13: 5-106.

Флейшман С.М., Сейнова И.Б., Золотарёв Е.А., 1979. Формирование гляциальных селей непрорывного генезиса в бассейне р. Герхожан-Су на Северном Кавказе. Материалы гляциологических исследований, 35: 195-198.

Хаджиев М.М. (2005). Оценка селевой опасности района г. Тырныауза. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Нальчик.

Черноморец С.С., 2005. Селевые очаги до и после катастроф. Научный мир, Москва.

Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T. (2017). Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events. Natural Hazards, 88(1 Suppl.): 199-235. doi 10.1007/s11069-017-2841-3.

Seinova I.B., Sidorova T.L., Chernomorets S.S. (2007). Processes of debris flow formation and the dynamics of glaciers in the Central Caucasus. International conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Proceedings. Millpress, Rotterdam, pp. 77–85.