

# **DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection**

---

Proceedings  
of the 7<sup>th</sup> International Conference

Chengdu, China, 23–27 September 2024



Edited by  
S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva

---

Geomarketing LLC  
Moscow  
2024

# **СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита**

---

Труды  
7-й Международной конференции

Чэнду, Китай, 23–27 сентября 2024 г.



Ответственные редакторы  
С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева

---

ООО «Геомаркетинг»  
Москва  
2024

# 泥石流： 灾害、风险、预测、防治

---

會議記錄

第七届国际会议

中国成都, 2024年9月23日至27日



編輯者

S.S. Chernomorets, K. Hu, K. Viskhadzhieva

---

Geomarketing LLC

莫斯科

2024

УДК 551.311.8  
ББК 26.823  
С29

**Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection.** Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). – Ed. by S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC. 622 p.

**Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита.** Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. 622 с.

**泥石流：灾害、风险、预测、防治。 會議記錄 第七届国际会议. 中国成都。** 編輯者 S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – 莫斯科: Geomarketing LLC. 622 p.

ISBN 978-5-6050369-6-8

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), К. Ху (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (Lomonosov Moscow State University), K. Hu (Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS), K.S. Viskhadzhieva (Lomonosov Moscow State University).

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).

© Селевая ассоциация

© Debris Flow Association



## Реконструкция селевого потока в октябре 2022 г. в долине реки Султан-Гара-Су (бассейн реки Малка, гора Эльбрус)

В.А. Юдина, Е.А. Савернюк, К.С. Висхаджиева, Е.Г. Харьковец, С.С. Черноморец

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,  
Россия, savernyuk@geogr.msu.ru*

**Аннотация.** 4–5 октября 2022 г. в долине реки Султан-Гара-Су (урочище Кала-Кулак) в Северном Приэльбрусье (Кабардино-Балкарская Республика), сошла серия селевых потоков, в результате чего была повреждена дорога и частично занесены грязью прилегающие строения. Селевой очаг образовался в моренном комплексе с мерзлыми породами и погребенными льдами на высоте 3700 м н.у.м. после выпадения ливневых осадков в виде снега и дождя. Приведены результаты реконструкции и оценки количественных характеристик селевого потока с использованием математического моделирования с применением пакета FLO-2D. В качестве базовых входных данных для анализа использована спутниковая информация, цифровые модели рельефа и ортофотопланы, полученные путем стереофотограмметрической обработки космической съемки, выполненной аппаратами Pleiades до схода селевого потока 8 сентября 2017 г., и съемки с беспилотного летательного аппарата, выполненной 7 октября 2022 г.

**Ключевые слова:** селевой поток, моделирование, FLO-2D, Джильису, Эльбрус, БПЛА

**Ссылка для цитирования:** Юдина В.А., Савернюк Е.А., Висхаджиева К.С., Харьковец Е.Г., Черноморец С.С. Реконструкция селевого потока в октябре 2022 г. в долине реки Султан-Гара-Су (бассейн реки Малка, гора Эльбрус). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 200–211.

## Reconstruction of the October 2022 debris flow in the Sultan-Gara-Su River valley (Malka River basin, Elbrus Mountain)

V.A. Iudina, E.A. Savernyuk, K.S. Viskhadzhieva, E.G. Khar'kovets, S.S. Chernomorets

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, savernyuk@geogr.msu.ru*

**Abstract.** On October 4–5, 2022, in the Sultan-Gara-Su River valley (Kala-Kulak tract) in the Northern Elbrus region (Kabardino-Balkarian Republic), a series of debris flows occurred, as a result of which the road was damaged and adjacent buildings were partially covered with mud. The debris flow origination site formed in a moraine complex with frozen soils and buried ice at an altitude of 3700 m a.s.l. after showery precipitation such as snow and rain. The paper presents the results of debris flow reconstruction and assessment of the quantitative characteristics using mathematical modeling in the FLO-2D package. As basic input data for the analysis, satellite information, digital elevation models and orthophotomaps were used, obtained by stereophotogrammetric processing of space imagery, done by the Pleiades satellite before the debris flow on September 8, 2017, and imagery from an unmanned aerial vehicle, completed on October 7, 2022.

**Key words:** debris flow, modeling, FLO-2D, Dzhilyisu, Elbrus, UAV

**Cite this article:** Iudina V.A., Savernyuk E.A., Viskhadzhieva K.S., Khar'kovets E.G., Chernomorets S.S. Reconstruction of the October 2022 debris flow in the Sultan-Gara-Su River valley (Malka River basin, Elbrus Mountain). In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 200–211.



## Введение

Во второй половине XX – первой четверти XXI в. на северном склоне Эльбруса произошел ряд селевых событий [Черноморец и др., 2007; Докукин и др., 2022; Запорожченко, 2008; Мальнева и др., 2022]. Эти случаи являются следствием современного этапа деградации ледников, сопровождающегося естественным разрушением озерно-ледниковых и моренных комплексов.

В работе [Докукин и др., 2022], посвященной оценке развития ледниковых озер и механизмам их прорыва в районе ледников Бирджалычиран и Джикиуганкез, собрана сводка прорывов ледниковых озер и случаев формирования селевых потоков за период с 1957 по 2021 гг. Сели, связанные с прорывами ледниковых озер, считаются наиболее опасными для района минеральных источников Джилысу и дороги через р. Каракая-Су.

Сход селя по р. Султан-Гара-Су в октябре 2022 г. [Сход..., 2022] показывает другие механизмы формирования селевых потоков, связанные с изменениями в полигенетических моренных комплексах с погребенными льдами и проявлением солифлюкционных процессов. Это делает актуальными исследования процессов формирования потенциальных и активных селевых очагов, находящихся в районах деградации современного оледенения, но напрямую не связанных с ледниками, ледниковыми озерами и активными каменными глетчерами.

Основными задачами представленной статьи являются реконструкция селевого потока 2022 г. с использованием анализа рельефа до и после его схода, а также сравнение полученных результатов с данными численного моделирования селя. Рассмотрен один из вариантов оценки количественных параметров с применением двух сценариев моделирования с разным разрешением цифровых моделей рельефа (ЦМР) до схода селевого потока, полученных с применением разных программных пакетов.

### Объект исследования и его особенности

Река Султан-Гара-Су является правым притоком р. Малка. Бассейн реки в настоящее время обособлен от влияния талых ледниковых вод, т.к. основная река Бирджалы-Су уходит левее в сторону минеральных источников Джилысу, а существовавший ранее рукав реки Бирджалы-Су, по которому сходили селевые потоки, в настоящее время стекает в р. Кара-Кая-Су, расположенную восточнее. Площадь водосбора р. Султан-Гара-Су составляет 2,6 км<sup>2</sup>. Исток поверхностного водотока находится на отметке 3070 м н.у.м., устье – 2365 м н.у.м. Средний уклон поверхностного русла р. Султан-Гара-Су составляет 9,9°. До выхода на поверхность вода проходит через разветвленную сеть подземных каналов стока с чередованием небольших озерцов. С учетом этой подземной сети каналов длина основного водотока составляет 5,3 км, а ее исток находится в районе отметок 3110 м н.у.м., около небольшого озера. Длина поверхностного водотока в результате селевого процесса изменилась с 4 км (на 2017 г.) до 4,5 км (2022 г.). На топографической карте из Атласа ледников Эльбруса (съемка 1958 г.) [Гляциогеографическая карта..., 1964] с отметки 3110 м н.у.м. отмечен поверхностный водоток.

Водосбор всего сработавшего селевого очага имеет площадь около 0,44 км<sup>2</sup> с учетом левой части прилегающего справа к очагу лавового потока, воды которого стекают по ложбинам и трещинам в сторону моренного массива. Однако водосбор верхнего очага, с которого начался селевой поток, имеет площадь всего 0,018 км<sup>2</sup>.

Моренный массив в долине р. Султан-Гара-Су, с которого сошел селевой поток в 2022 г., расположен на отметках 2960–3070 м н.у.м., что гипсометрически ниже рассматривавшегося ранее района активного формирования приледниковых озер в работах [Запорожченко, 2008; Черноморец и др., 2018].

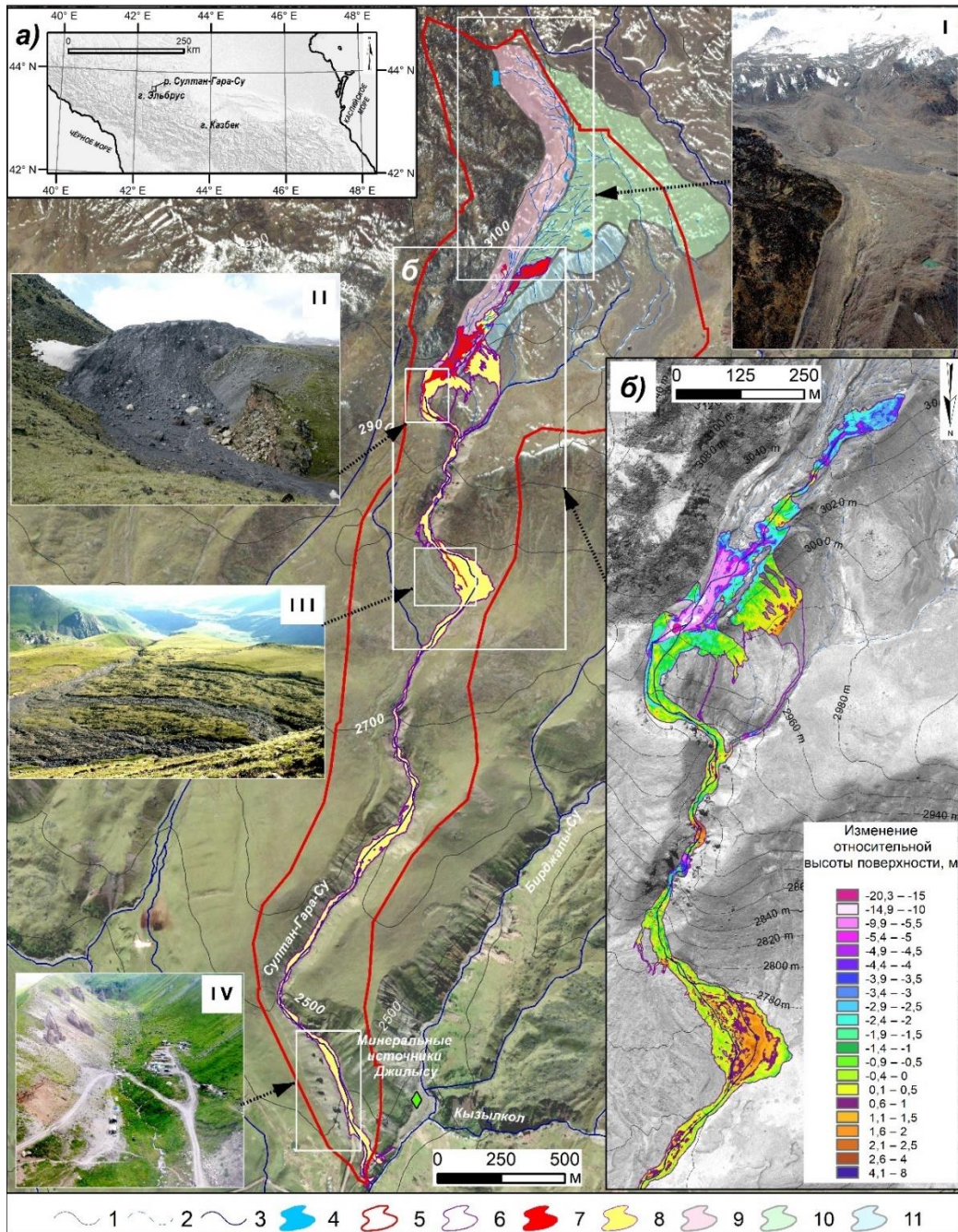


Рис. 1. Обзорная схема района: а – участок схода селевого потока 4–5 октября 2022 г. по р. Султан-Гара-Су; б – изменение относительной поверхности после прохождения селя (по результатам вычитания ЦМР 2017 и 2022 г.: 1 – изогипсы через 100 м; 2 – пути фильтрации талых и атмосферных вод в районе моренного массива; 3 – основные водотоки; 4 – места формирования временных водоемов при снеготаянии и ливнях, а также существующие небольшие озера; 5 – граница водосборного бассейна; 6 – граница селевого процесса; 7 – селевые очаги; 8 – зоны транзита и аккумуляции селевых масс; моренные комплексы середины XIX в. (согласно легенде к [Гляциогеографическая карта..., 1964]); 9 – валы боковых, срединных и конечных морен стадии оледенения середины XIX в. с поверхностью, сильно преобразованной последующими процессами; 10 – холмисто-западинные и выровненные поверхности основных морен, сильно преобразованные последующими процессами; 11 – внешний склон левой береговой морены. Фотографии: I – верхняя часть моренного массива с очагом зарождения 2022 г. (фото К. Давыдова 29.06.2006); II – состояние уступа моренного массива с ледяным ядром (фото С.С. Черноморца 18.07.2005); III – селевой конус выноса на высотах 2755–2820 м (фото С.С. Черноморца 18.07.2005); IV – зона выхода селевого потока на дорогу в устье р. Султан-Гара-Су (ур. Кала Кулак) до строительства дороги (фото М.Д. Докукина 23.07.2009)





Моренный комплекс является полигенетическим массивом, что нашло отражение на карте С.М. Мягкова [*Гляциогеографическая карта...*, 1964], составленной по материалам дешифрирования аэрофотоснимков 1957 г. с использованием полевых материалов. Правая часть массива отнесена к валам боковых, срединных и конечных морен стадии оледенения середины XIX в. с поверхностью, сильно преобразованной последующими процессами; левая часть массива – холмисто-западинные и выровненные поверхности основных морен, сильно преобразованные последующими процессами; на всем массиве отмечены следы обвального-солифлюкционного сноса (согласно легенде к карте).

В нижней части комплекса на отметках 2960–3020 м н.у.м. расположен массив с погребенным ледяным ядром, уступ которого с 1997 по 2017 гг. продвинулся вперед на 20 м. Происхождение ледяного ядра моренного массива, на наш взгляд, остается открытым, поскольку его генезис может быть разным. Версия о том, что массив погребенного льда является остатками ледника Бирджальчиран, а точнее гряды его срединной морены, тянувшейся от пика Калицкого, наиболее вероятна. Но нельзя исключать слияние нескольких гряд срединных морен и их бронирование в условиях оплывания правой береговой морены на остатки ледника Бирджальчиран, или занос флювиогляциальными отложениями, а также образование подземного льда во влажных и легко проницаемых для воды моренных накоплениях.

В центральной и правой части на поверхности моренного комплекса отмечаются светлые гранитные глыбы, которые в данном районе могли быть принесены ледником только с массива пика Калицкого. Светлые следы морены, сложенной из гранитных обломков [*Государственная геологическая карта...*, 2004], отличаются от темноцветных морен из вулканических пород и легко прослеживаются на большое расстояние. Изменение положения гранитных глыб в совокупности с изменением форм моренных валов позволило установить изменение скоростей движения материала на поверхности моренного массива в работе [*Мальнева и др.*, 2022]. Можно предположить, что наличие гранитной составляющей в этих моренах дополнительно способствует более активному их движению. Дополнительным фактором на этом участке выступают также особенности коренного вулканического рельефа, имеющего сужения и ступени, которые играют роль стремнины для моренных масс, содержащих значительное количество льда и хорошо проницаемых для воды.

Выше отметки 3020 м н.у.м. вдоль левого края моренного массива расположена выположенная зандровая площадка, на которой в разное время года возникают небольшие озера. В этом же месте имеется эрозионная форма, напоминающая крупную оплывину шириной до 70 м. На карте 1958 г. здесь был поверхностный водоток, который уходил с моренного массива влево.

Верхняя часть селевого очага между отметками 3070 и 3040 м н.у.м. испытывала меньшие по скорости движения материала. Для нее также характерны оплывины с гребня в обе стороны, движение светлых глыб, изменение формы и глубины ложбин вдоль границы селевого очага.

После выхода с участка моренного массива воды р. Сулан-Гара-Су попадают в русло в вулканических породах между отметками 2960–2820 м н.у.м. протяженностью 650 м. На этом участке в р. Сулан-Гара-Су в районе отметки 2910 м н.у.м. впадает левый приток, также берущий начало с моренного массива, но расположенный западнее. Ниже слияния река течет в извилистом каньоне глубиной 30–40 м. После выхода из каньона вода попадает на селевой конус выноса с многочисленными валами и неглубокими руслами. Ширина конуса до селя 2022 г. была 390 м, площадь – 0,11 км<sup>2</sup>. После схода селевого потока максимальная ширина конуса составила 410 м, а основное русло сместилось на 50 м вправо. Далее с отметки 2730 м н.у.м. русло снова попадает в извилистый каньон длиной 250 м, который на отметке 2640 м н.у.м. сменяется участком промежуточной аккумуляции протяженностью 570 м до отметки 2570 м н.у.м. Следующие 700 м до отметки 2490 м н.у.м. русло находится в каньоне глубиной до 40 м и шириной 15–20 м, выходя на последнее поле аккумуляции в Долине Замков в районе отметки 2440 м н.у.м. и далее до дороги, ныряя в трубу под ней.





## Методы и материалы

В работе в качестве базовой использована космическая стереосъемка, выполненная аппаратом Pleiades 8 сентября 2017 г. в рамках проекта Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) «Assessing the impact of climate change and its effects on soil and water resources in polar and mountainous regions». Снимки имеют разрешение 0,5 м. Точность определения высот с использованием фотограмметрической RPC-модели для стереопары с данного спутника составляет около 1,5 м/пиксел измеряемого параллакса. По измерениям стереопары были построены две ЦМР, с разрешением 2,0 и 0,5 м. Первая ЦМР получена путем измерений по пикетам, набранным вручную и автоматически, по характерным точкам рельефа и по регулярной сетке соответственно, в фотограмметрической системе PHOTOMOD с визуальным стереоскопическим контролем результатов измерений. Ошибка автоматических измерений, основанных на определении коэффициента взаимной корреляции, для имеющегося изображения объекта исследования, характеризующегося малой детальностью и невысоким контрастом, в среднем составила порядка 1 пиксела, что дает среднюю ошибку определения высот 1,5 м.

Далее была предпринята попытка уменьшить ошибку определения высот путем измерения параллаксов на субпиксельном уровне – использован свободно распространяемый пакет фотограмметрического и картографического программного обеспечения NASA Ames Stereo Pipeline (ASP) [Shen D.E. et al, 2016; Alexandrov et al., 2024]. В ASP реализован большой набор алгоритмов сопоставления изображений стереопары и последующего субпиксельного уточнения измерений, с многочисленными настройками параметров, что дает возможность подобрать оптимальный режим работы программного обеспечения для конкретного вида изображений. В работе был выбран вариант, предусматривающий использование менее детальной ЦМР как начального приближения измерений. Ранее построенная ЦМР с двухметровым разрешением хорошо подошла для этой цели. Контроль качества построенной ASP ЦМР с разрешением 0,5 м проводился в среде PHOTOMOD путем визуального стереоскопического измерения расхождений высот контрольных пикетов, сгенерированных из ЦМР, и поверхности стереомодели. По нашей оценке, средняя ошибка высот вновь полученной ЦМР не превышает 0,5 м.

Вторым этапом стала стереофотограмметрическая обработка в программном комплексе Agisoft Metashape Professional v. 2.1.1 съемки с квадрокоптера DJI Mavic Air 2 от 7 октября 2022 г. Съемка была выполнена сотрудниками ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» при полевом анализе следов сошедшего селевого потока и предоставлена авторам для работы. Для привязки съемки использованы 144 опорные точки, координаты и высоты которых были получены со стереопары космического аппарата Pleiades 8 сентября 2017 г. В результате стандартных процедур обработки построена ЦМР разрешением 0,05 м/пиксел с ошибкой по высоте 0,4 м и общей ошибкой 0,16 м. Эта ЦМР использовалась при построении ортофотоплана. Полученные материалы применялись для определения особенностей селевого потока, построения карт разности рельефа и поперечных профилей, а также для сравнения следов воздействия селевого потока с результатами моделирования по ЦМР с Pleiades.

Построение карты разности рельефа проводилось в среде ArcMap с помощью инструмента Raster Math Minus с вырезанием по контуру границы селевого потока и без вырезания. В целом по массиву расхождение в высотах ЦМР 2017 и 2022 гг. на территориях, примыкающих к границе селевого потока, лежит в пределах  $\pm 0,5$  м, возрастая в местах сужений до 1–2 м. По краям ЦМР, построенной по результатам съемки с БПЛА, искажения довольно велики, но эти области не попадают в область исследования.

Для дополнительного анализа были использованы разновременные съемки, представленные в Google Earth: за 10.09.2013, 15.02.2014, 22.08.2019, 20.11.2020, космические снимки Sentinel-2 за период июль – октябрь 2019–2022 г., наземные



фотографии коллег и вертолетные фотографии из архива Главного управления МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике.

По данным метеостанции «Ледник Гарабаши», с 21 по 25 сентября выпало 113 мм осадков. Это подтверждается снимком Sentinel-2 от 26.09.2022, на котором нижняя граница залегания снежного покрова на склонах северной экспозиции отмечена на высоте 2800 м н.у.м. Под снегом был полностью скрыт будущий селевой очаг и его водосбор. Ситуация резко изменилась к 01.10.2022, когда на снимке Sentinel-2 снежный покров остался в небольшом количестве в ложбинах солифлюкционного рельефа на поверхности моренного массива. Нужно отметить, что как такового поверхностного стока по этим ложбинам в обычное время не выражено, что связано с хорошей проницаемостью вулканогенных пород.

На космическом снимке Sentinel-2 от 04.10.2022 свежий снег лежит на отметке 2950 м н.у.м., т.е. у подошвы моренного массива, а на снимке от 10.11.2022 в верховьях одного из притоков р. Кара-Кая-Су видны следы селевого потока, сошедшего до высоты 2570 м н.у.м., что может косвенно указывать на очень локальный интенсивный ливень, сопровождавшийся снеготаянием.

На рис. 2 приведены суточный ход срочных температур и осадки по метеостанциям «Терскол» (высота 2140 м н.у.м.), «Чегет» (3040 м н.у.м.) и «Ледник Гарабаши» (2326 м н.у.м.).

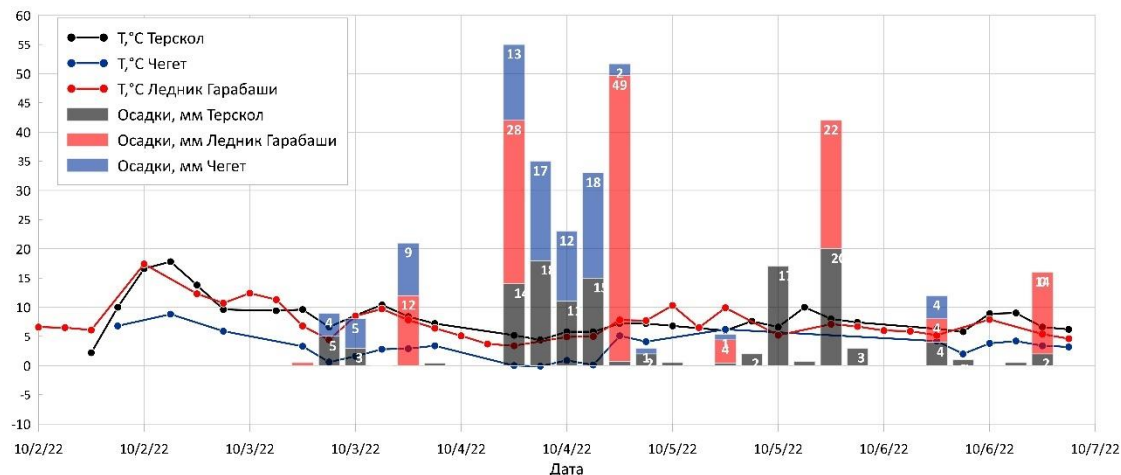


Рис. 2. Суточный ход осадков и температуры по метеорологическим станциям «Ледник Гарабаши», «Терскол» и «Чегет» за период 02.10–07.10.2022<sup>3</sup>

Расчет потока в зоне транзита и аккумуляции осуществлялся с помощью двумерной гидродинамической модели FLO-2D [O'Brien et al., 1993]. В основе модели лежит решение уравнений Сен-Венана [Кюнж, 1985; O'Brien et al., 1993]. Схематизация в модели осуществляется с помощью регулярной прямоугольной расчетной сетки. Важной особенностью модели FLO-2D является наличие селевого блока. Расчет селевого потока осуществляется с помощью реологической модели Бингама [O'Brien et al., 1993].

В качестве входных данных рельефа использовались две ЦМР, полученные при обработке космической стереосъемки с аппарата Pleiades 8 сентября 2017 г. разрешением 2 и 0,5 м/пиксел, соответствующие сценариям I и II. Обе ЦМР интерполированы на расчетную сетку с шагом 2 × 2 м. Район выхода селевого потока на дорогу был отредактирован, т.к. на момент съемки 2017 г. дорога отсутствовала.

<sup>3</sup> Данные по станции «Ледник Гарабаши» взяты с сайта <https://ru4.rp5.ru/download/files.synop/37/37207.01.10.2022.07.10.2022.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz>, «Терскол» – <https://ru4.rp5.ru/download/files.synop/37/37204.01.10.2022.07.10.2022.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz>, «Чегет» – <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=37205&bday=1&fday=6&amonth=10&ayear=2022&bot=2>



## Реконструкция селевого потока

Селевой поток 4–5 октября 2022 г. начался с поверхностного оползневого процесса глубиной в среднем 3 м с отметки 3070 м н.у.м. в обводненном массиве морены, разбитом трещинами (таблица 1, очаг № 1). В районе отметки 2995 м н.у.м. в процесс было вовлечено небольшое озерко, существовавшее на задровой площадке в левой части массива. На снимке Sentinel-2 от 01.10.2022 в искусственных цветах оно едва заметно.

В верхней части долины высокие уклоны способствовали набору потоком высокой скорости. Ниже задровой площадки начинается участок, в котором средняя толщина сноса составила 6 м (таблица 1, очаг № 2). Здесь мы наблюдаем многочисленные цирки, вероятно, приуроченные к небольшим линзам льда в массиве. Но не наблюдаем крутых стенок со льдом, что говорит о том, что основной массив ледяного ядра на этом участке затронут не был. При этом ширина водного потока на поверхности после схода селя здесь составляет 1 м, а на участке с отметкой 2990 м н.у.м. в районе выхода потока из-под ледяного ядра уже около 2 м.

Таблица 1. Параметры основных селевых очагов по результатам определения разницы рельефа 2017 и 2022 гг.

№ очага	Площадь, тыс. м <sup>2</sup>	Разница объемов 2017 и 2022 гг., м <sup>3</sup>	Средняя толщина слоя, м	Максимальная отметка высоты, м н.у.м.	Минимальная отметка высоты, м н.у.м.	Превышение, м	Горизонтальное проложение, м	Угол наклона, °	Тангенс угла наклона
1	7,1	22 250	3	3070	3030	40	210	10,8	0,19
2	11,2	61 250	6	3020	2980	40	215	9,2	0,19
3	1,5	14 100	9	2990	2955	35	70	29,7	0,50
4	2	3600	2	2960	2900	60	340	10,0	0,18
<b>Сумма</b>	<b>21,8</b>	<b>101 200</b>	–	–	–	–	–	–	–
Зона воздействия селя	161,3		0,6±2,3	3 070	2 335	735	4 400	9,4	0,16

Для уступа ледяного ядра моренного массива (таблица 1, очаг № 3) характерны очень крутые стенки. На ортофотоплане 2017 г. эта часть массива имеет выпуклую форму. Здесь же образовался наиболее глубокий эрозионный врез при селевом процессе 2022 г. Ранее на космических снимках на уступе отмечались процессы образования оплывин и небольших врезов. Эта часть является также наиболее динамичной в плане изменения характера поверхности. Максимальное повышение поверхности за период 2017–2022 гг. на данном участке составило 4 м, а максимальное понижение (на 20 м) произошло в глубокой части селевого вреза.

После выхода с моренного массива в свежих селевых отложениях наблюдается протяженный селевой врез шириной 5–10 м и глубиной до 2 м, что говорит о возможном прохождении водного потока после выноса основных масс с моренного массива.



Вероятно, это происходило в тот момент, когда на метеостанции «Гарабаши» было зафиксировано 49 мм осадков. Нужно отметить, что при анализе следов прохождения селя на этом участка и в каньоне ниже не наблюдается участков заплеска или виражей на поворотах. Поток прекрасно «адаптировался» к подстилающей поверхности, проходил транзитом в узких местах, не задерживаясь и не подпруживая сам себя. Скорее всего, это связано с особенностями вулканогенных пород.

При выходе на промежуточный конус выноса селя выплеснулся на наиболее пологую его часть, обходя возвышенный участок и затекая в левую сторону. Здесь мы наблюдаем наиболее тонкие отложения, вероятно, за счет большого содержания песка в селевых массах. В центральной части этого конуса имеется свежее селевое русло глубиной до 1,5 м и шириной до 7 м, вероятно, тоже как результат второй фазы после интенсивных осадков.

Далее оставшийся путь селевой поток проследовал так же легко, адаптируясь к условиям рельефа: то расширяясь на более пологих участках до 60 м, то сужаясь в каньонах до 7 м. Подойдя к дороге, он забил трубу, заполнил выемку перед дорогой и далее пошел поверх нее, затапливая дорогу и прилегающую территорию вплоть до стоянки с сервисными зданиями, заноса их грязью с небольшим содержанием крупных валунов. На дороге находились несколько припаркованных автомобилей, они были незначительно повреждены.

Полученные значения объемов материала для селевых очагов (таблица 1), нужно воспринимать как ориентировочные, поскольку массив к моменту схода селевого потока претерпел изменения за счет движения морен и деградации льда, а также во время схода небольших оплывин с уступа в период до 22.08.2019.

В ходе селевого процесса по результатам вычислений при вычитании ЦМР в среде ГИС до и после события объем выемок составил 181,5 тыс. м<sup>3</sup>, объем насыпей – 68,5 тыс. м<sup>3</sup>. Общий объем материала, вынесенного за период 2017–2022 гг., достиг 113 тыс. м<sup>3</sup>.

При таких параметрах можно подсчитать, что при площади 0,16 км<sup>2</sup> мы получаем среднюю толщину отложений 0,7 м. Эти значения хорошо согласуются с данными анализа поперечных профилей, на которых, за исключением района селевых очагов на моренном массиве в верховьях, отмечаются изменения глубин от –1,5 до 2 м.

Однако не стоит забывать, что в моренном массиве в большом количестве имелся погребенный лед. Поэтому не наблюдается больших скоплений перемещенного или переотложенного твердого материала на снимках с БПЛА. Более характерны размывы вследствие боковой и глубинной эрозии. Ушедший в результате селя объем материала включает как рыхлообломочные отложения, так и ледовую массу. Если учесть, что лед занимал примерно 1/3 от объема селевого очага № 2 и 2/3 от объема очага № 3, то, следовательно, мы имеем приблизительно 73 500 м<sup>3</sup> твердого материала, вынесенного с моренного массива и из вреза у его подножия за 2017–2022 гг.

При этом объем льда составил около 30 000 м<sup>3</sup>. Таким образом, с учетом общего количества вещества, вынесенного за указанный выше период, и объема насыпей, по разнице получается не более 10 000 м<sup>3</sup> твердого материала, вынесенного за пределы селевого бассейна.

### Результаты моделирования

Скорость потока оценивалась с использованием данных видеосъемки, выполненной свидетелями, на основе методики [Соколова и др., 2019; Arattano, Marchi, 2000]. Средняя скорость составила около 1,5–2 м/с. Глубина потока в районе выхода на дорогу согласно видеоматериалам [Джилысу..., 2022; Сель..., 2022] варьировалась от 0,6 до 1 м. Таким образом, при средней ширине потока в 20 м значения расходов могли составлять от 18 до 40 м<sup>3</sup>/с.

В описываемом исследовании принято значение расхода селевого потока, равное 24 м<sup>3</sup>/с.



По результатам моделирования селевого потока глубина в долине для сценариев I и II в среднем составляла около 1,5 м, при максимальной в 2,4 м. Наибольшие скорости в местах сужения для сценария I достигали 9,5 м/с, для сценария II – 9,9 м/с.

До селевого потока 2022 г. основное русло реки на промежуточном конусе выноса располагалось примерно в 50 м западнее, чем после селевого потока. По результатам моделирования можно сделать вывод, что по сценарию I русло селевого потока лишь частично оказывается в зоне затопления. При этом глубина потока в основном русле достигает 1,4 м, а в русле селевого потока – 0,5 м (рис. 3а). По сценарию II зона затопления на данном участке оказывается больше. Глубина в русле селевого потока достигает 0,5 м (рис. 3б). Несмотря на это, селевое русло не становится основным. В русле реки, которое наблюдалось до прохождения селя, глубина достигает 1,5 м.

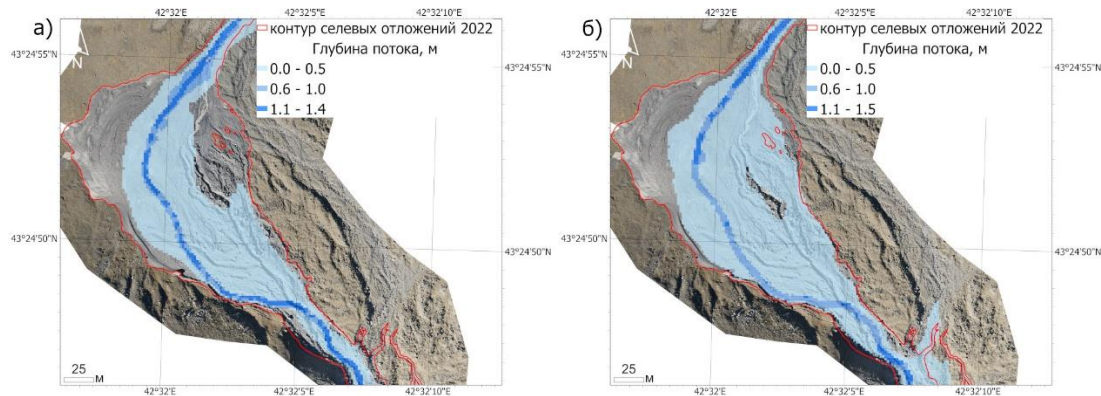


Рис. 3. Результаты математического моделирования селевого потока на основе программного комплекса FLO-2D на участок промежуточного конуса выноса: а) сценарий I (ЦМР 2017 г. 2 м/пиксел); б) сценарий II (ЦМР 2017 г. 0,5 м/пиксел). Подложка – ортофотоплан 07.10.2022

Положение русла на участках аккумуляции нестабильно, и может меняться при прохождении паводка или селевого потока. В гидродинамической модели FLO-2D не учитываются эрозионные процессы, поэтому в случае прохождения катастрофического паводка картина зоны затопления может значительно измениться. При этом изначально такая территория может не выделяться как потенциально опасная при моделировании с использованием ЦМР высокого разрешения. Таким образом, увеличение детальности ЦМР в сценарии II, которая была получена по данным 2017 г., не отражает формирование нового русла при прохождении селевого потока.

Согласно результатам моделирования по сценарию I глубина на конусе выноса селевого потока будет варьироваться в среднем от 0,3 до 1 м (рис. 4а). Скорость потока на большей части будет составлять около 3 м/с. В сценарии II площадь затопления увеличивается, при этом наблюдается меньшее растекание потока выше по дороге. Происходит также перелив потока через дорогу, что наблюдалось в видеоматериалах [Сель..., 2022]. В зоне затопления оказываются постройки, которые пострадали при прохождении селя в 2022 г. Глубина потока при этом варьировалась в среднем от 0,3 до 1 м (рис. 4б). Скорости потока на большей части территории достигали 2–3 м/с. Расход селевого потока на вершине конуса выноса составил для обоих сценариев около 16 м<sup>3</sup>/с (по модели, составленной по материалам съемки со спутника Pleiades разрешением 0,5 м/пиксел – 16,3 м<sup>3</sup>/с, по модели разрешением 2 м/пиксел – 16,5 м<sup>3</sup>/с).

Полученные результаты моделирования по сценарию II в целом соотносятся с данными видеоматериалов. Однако на участках аккумуляции, а также на антропогенно не измененных конусах выноса использование ЦМР, полученных до селевого потока, даже с высокой детальностью, для гидродинамической модели FLO-2D может не отражать реальную картину при прохождении селевого потока.



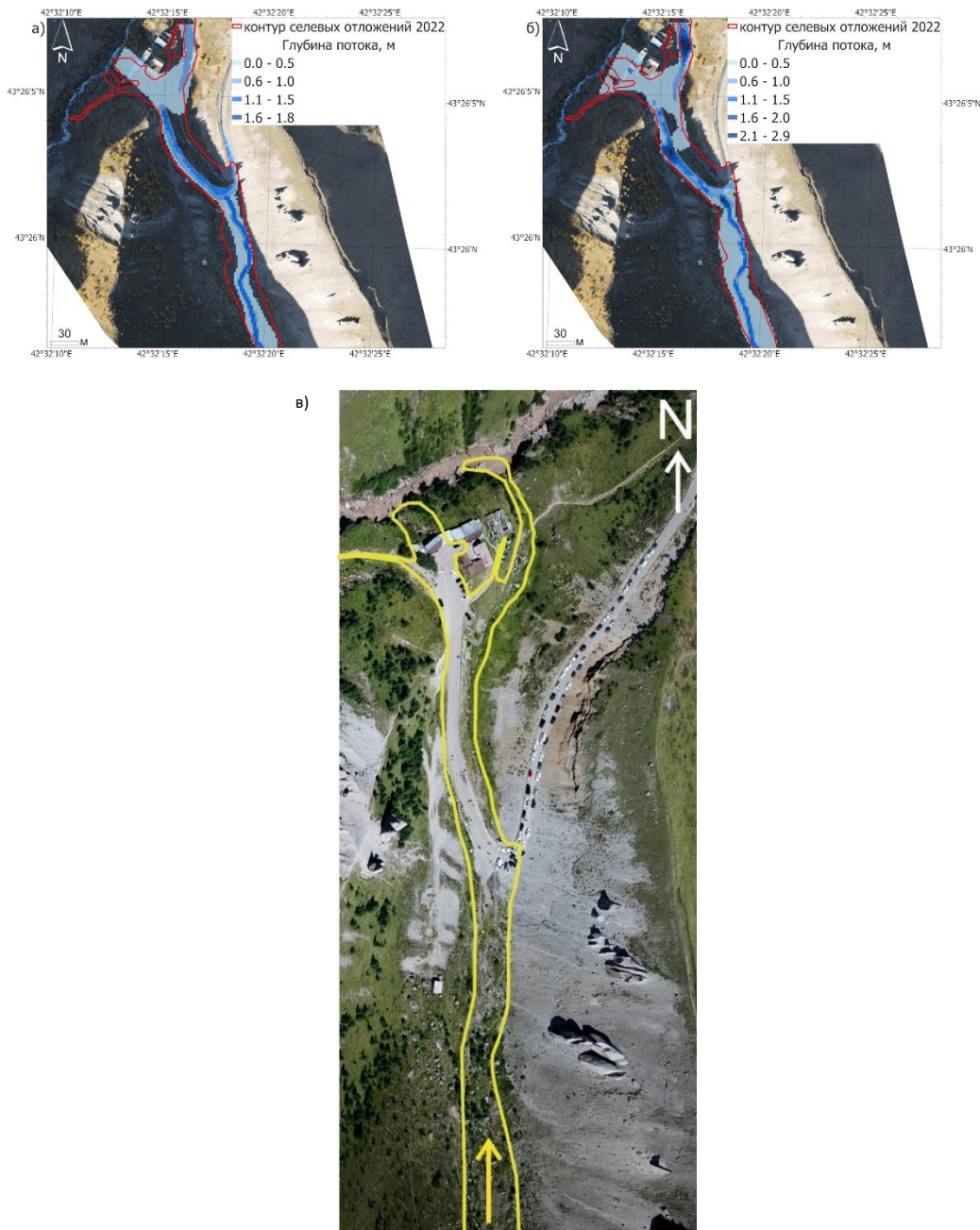


Рис. 4. Зона воздействия селевого потока на дорогу в устье р. Султан-Гара-Су по результатам математического моделирования селевого потока на основе программного комплекса FLO-2D: а – по сценарию I (ЦМР 2017 г., разрешение – 2 м/пиксел), б – по сценарию II (ЦМР 2017 г., разрешение – 0,5 м/пиксел), подложка – ортофотоплан по результатам съемки 07.10.2022; в) фактическая (по видео и съемке с БПЛА). Фото С.С. Черноморца 12.08.2021

### Выводы

Актуальность исследования, результаты которого представлены в данной статье, продиктована необходимостью изучения и учета современных изменений в моренных массивах и их возможностью генерировать селевые потоки, которые достигают объектов инфраструктуры в рекреационном районе Северного Приэльбрусья.

Использование разновременных съемок подтвердило движение материала в моренном массиве. Последнее играет важную роль при формировании активных участков (для вовлечения их в селевой процесс и трансформации гидрологического



режима) и путей фильтрации внутри массива. Открытым остается вопрос о том, насколько возобновляем на данном этапе селевой очаг с ледяным ядром, т.е. является ли он «одноразовым», либо будет работать в качестве селевого очага и в будущем.

При оценке количества вынесенного вещества на участках с активным движением, включающих лед и горные породы, наиболее точную оценку объемов твердого материала можно осуществить только при использовании ЦМР, построенных по данным, полученным в даты, наиболее близкие к случаям схода селевых потоков. В современных условиях деградации многолетнемерзлых массивов и погребенных льдов разница в 5 лет может быть существенной. Это выражается в различии в оценках объемов селевых потоков. При этом разница может достигать 100%.

На участке перехода русла с дорожной насыпью и дренажной трубой довольно сложно смоделировать рельеф, чтобы получить адекватные скорости и глубины потока. Частично это связано с тем, что в реальности дренажные трубы быстро забиваются селевым материалом, а в дополнение к крупным валунам на пути встречаются низкие дорожные ограждения, сопоставимые с глубиной самого селевого потока, что является для него дополнительным тормозящим фактором, способствующим растеканию.

На участках дорог в районах распространения селевых отложений, подобных переходу р. Султан-Гара-Су, рекомендуется устанавливать однопролетные мосты и сохранять естественный уклон русла без отсыпки дорожной насыпи. При пересечении селевых водотоков следует избегать использования дренажных труб малого диаметра, чтобы селевые потоки малых расходов свободно проходили в естественном русле без растекания по дороге.

### Благодарности

Авторы признательны коллективу ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» – А.Р. Акаеву, М.Д. Докукину, Р.Х. Калову и М.Ю. Беккиеву – за предоставленные материалы съемки от 07.10.2022, возможность их использования в исследованиях и участие в обсуждениях причин возникновения селя.

Работа выполнена в рамках темы 1.7 121051300175-4 «Опасность и риск природных процессов и явлений» (ГЗ) и проекта IAEA INT5153 «Assessing the impact of climate change and its effects on soil and water resources in polar and mountainous regions».

### Список литературы

- Гляциогеографическая карта северного и северо-восточного склона Эльбруса. Масштаб 1:25 000 // Атлас ледников Эльбруса. Ч. 2. Специальные карты / сост. С.М. Мягковым. – 1964.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Кавказская. Лист К-38-1, VII (Кисловодск) / А.Н. Письменный, М.А. Зарубина – 2004.
- Джилы-Су. После селя. 2022 г. URL: <https://youtu.be/v-ОбzYnOg48>.
- Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Хаткутов А.В. Эволюция озер у ледника Джикиганкез (Северное Приэльбрусье) в 1957–2020 гг. с учетом подземных каналов стока // Лед и Снег. – 2022. – Т. 62. – № 1. – С. 47–62.
- Запорожченко Э.В. Селевые потоки по рр. Кара-Кая-Су и Бирджалы-Су в Кабардино-Балкарии: сравнительный анализ прошлой и новейшей истории // Вестник Владикавказского научного центра. – 2008. – Т. 8. – № 1. – С. 33–43.
- Кюнж Ж. Численные методы в задачах речной гидравлики / Ж. Кюнж, Ф. Холли, Ф. Вервей. М.: Энергоатомиздат, 1985. 255 с.
- Лебедева Л.С., Капица В.П., Такибаев Ж.Д., Гончаренко В.В., Лыткин В.М., Камалбекова А.Н. О влиянии динамики каменных глетчеров на сток в бассейне р. Улкен Алматы (Большая Алматинка), Северный Тянь-Шань // Лед и Снег. – 2024. – Т. 64. – № 1. – С. 54–65. <https://doi.org/10.31857/S2076673424010041>.
- Мальнева И.В., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Акаев А.Р. Селевой поток в урочище Джилы-Су (Северное Приэльбрусье) 4 октября 2022 г.: причины и факторы // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: материалы





- Общероссийской научно-практической конференции. М.: ООО «Геомаркетинг», 2023. – С. 111–118.
- Сель сошел в северном Приэльбрусье 05 октября 2022 года. URL: [https://youtu.be/S\\_PNQf7H0YM](https://youtu.be/S_PNQf7H0YM).
- Соколова Д.П., Куровская В.А., Осташов А.А., Казаков Н.А. Оценка динамических характеристик селевого потока по видеоматериалам // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2019. – Т. 1. – Вып. 1. – С. 31–51.
- Сход сели в Зольском районе. 2022. URL: <https://07.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informaciya/4854192>.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне г. Эльбрус 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // Материалы гляциологических исследований. – 2007. – № 102. – С. 225–229.
- Arattano M., Marchi L. Video-derived velocity distribution along a debris flow surge // Physics and Chemistry of the Earth. Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. 2000. – Vol. 25. – Issue 9. – P. 781–784.
- O'Brien J.S., Julien P.Y. Laboratory analysis of mudflow properties // J. Hydraulic Eng. 1988. Vol. CXIV. – No. 8. – P. 877–887.
- O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // J. Hydraulic Eng. 1993. – Vol. CXIX. – No. 2. – P. 244–261.
- Alexandrov O., McMichael S., Broxton M., Lundy M., Beyer R., Husmann K., Edwards L., Nefian A., Smith B., Shean D., Smith T., Annex A., Moratto Z., Dehecq A., Nodjoumi G., Aravkin A., Purinton B., ... Laura J. NeoGeographyToolkit/StereoPipeline: 2024-03-23-daily-build (2024-03-23-daily-build). Zenodo. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10864208>.
- Shean D.E., O. Alexandrov, Z. Moratto, B. E. Smith, I. R. Joughin, C. C. Porter, Morin, P. J. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very high-resolution commercial stereo satellite imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. – Vo. 116. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012>.