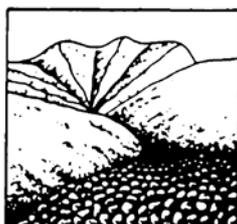


СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
8-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.



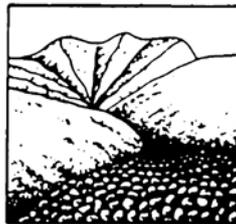
Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2025

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 8th International Conference

Tbilisi, Georgia, 6–10 October 2025



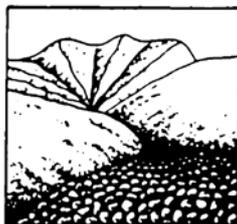
Edited by
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2025

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 6-10 ოქტომბერი, 2025



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

შპს „გეომარკეტინგი“
მოსკოვი
2025

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2025. 496 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC, 2025. 496 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო. – პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი, კ.ს. ვისხაჯიევა. – მოსკოვი: შპს „გეომარკეტინგი“, 2025. 496 ს.

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), Г.В. Гавардашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (M.V. Lomonosov Moscow State University), G.V. Gavardashvili (Tsozne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University), K.S. Viskhadzhieva (M.V. 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).

ISBN 978-5-6053539-4-2

© 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



Реконструкция катастрофического селевого события ≈ 1200 лет назад в бассейне р. Мзымта

С.В. Шварев^{1,2}, С.В. Харченко^{1,3}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия, shvarev@igras.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, shvarev@ifz.ru

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия

Аннотация. В бассейне среднего течения р. Мзымта изучены следы грандиозного селя, отложения которого сформировали днище долины р. Бешенка и террасовидную поверхность по правому борту р. Мзымта, ныне занимаемые пос. Красная Поляна. По результатам анализа материалов воздушного лазерного сканирования, крупномасштабных топографических карт и глобальных цифровых моделей рельефа реконструирована поверхность селевой террасы, конуса выноса в устье р. Бешенка и контуры подпрудного озера выше по течению р. Мзымта протяженностью около 6–8 км. С использованием методов картографического моделирования и морфометрического анализа выполнена реконструкция доселевых долин рр. Бешенка и Мзымта и получен диапазон оценок объемов селевых отложений и осадков подпрудного озера, мощности конуса выноса. Объем селевого конуса в устье р. Бешенка и шлейфа ниже по долине р. Мзымта оценен в 90,2 млн м³ (из них непосредственно в границах конуса выноса – 50–55 млн м³), при площади заполнения 2,6 км² и средней мощности 34 м. Сравнение фактического профиля русла р. Мзымта с реконструированным доселевым на основе нелинейной аппроксимации показывает аномалии высот на протяжении 5 км вниз по течению от селевой плотины, где они связаны непосредственно с селевым шлейфом, и 8 км вверх, где их происхождение объясняется аллювиально-озерными осадками подпрудного озера. Максимальное отклонение расчетных отметок высот для экспоненциального профиля от фактического русла р. Мзымта составляет 75 м на пересечении с осевой частью конуса выноса, что в совокупности с видимой высотой конуса определяет максимальную мощность селевых отложений более 100 м. Возраст катастрофического события устанавливается по захороненной в селевой матрице органике (1200 ± 60 кал. л. н.).

Ключевые слова: гигантский селя, конус выноса, подпрудное озеро,
палеорекострукция, морфометрический анализ

Ссылка для цитирования: Шварев С.В., Харченко С.В. Реконструкция катастрофического селевого события ≈ 1200 лет назад в бассейне р. Мзымта. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 414–425.

Reconstruction of a catastrophic debris flow event ≈ 1200 years ago in the Mzymta River basin

S.V. Shvarev^{1,2}, S.V. Kharchenko^{1,3}

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
shvarev@igras.ru

²Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia, shvarev@ifz.ru

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia



Abstract. This study investigates evidence of a major debris flow in the middle reaches of the Mzymta River basin. The deposits from this event formed the valley floor of the Beshenka River and a terrace-like surface on the right bank of the Mzymta River, which is now the site of the Krasnaya Polyana settlement. By analyzing airborne laser scanning (LiDAR) data, large-scale topographic maps, and global digital elevation models, we reconstructed the surface of the debris-flow terrace, the alluvial fan at the mouth of the Beshenka River, and the outline of an approximately 6–8 km long dammed lake that formed upstream on the Mzymta River. Using cartographic modeling and morphometric analysis, we reconstructed the pre-event topography of the Beshenka and Mzymta river valleys. This allowed us to estimate the volume of the debris flow deposits and the sediments of the dammed lake, as well as the thickness of the alluvial fan. The total volume of the debris flow fan at the mouth of the Beshenka River and the downstream deposit trail in the Mzymta valley is estimated at 90.2 million m³. Of this total, 50–55 million m³ are contained within the fan itself. These deposits cover an area of 2.6 km² with an average thickness of 34 m. A comparison of the modern channel profile of the Mzymta River with the reconstructed pre-event profile, based on non-linear approximation, reveals elevation anomalies extending 5 km downstream from the debris flow dam. These anomalies are directly linked to the debris flow trail. Upstream, over a distance of 8 km, the anomalies are attributed to the alluvial-lacustrine sediments of the dammed lake. The maximum deviation of the calculated exponential profile from the actual riverbed reaches 75 m at the intersection with the axial part of the alluvial fan. This deviation, combined with the fan's visible height, indicates a maximum thickness of the debris flow deposits exceeding 100 m. The age of this catastrophic event, determined from organic material buried within the debris flow matrix, is 1200 ± 60 cal. yr BP.

Key words: *giant debris flow, alluvial fan, dammed lake, paleoreconstruction, morphometric analysis*

Cite of this article: Shvarev S.V., Kharchenko S.V. Reconstruction of a catastrophic debris flow event ≈ 1200 years ago in the Mzymta River basin. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 414–425.

Введение

Долина р. Мзымта характеризуется весьма активным развитием современной селевой и оползневой деятельности [Казаков и др., 2013; Осипов и др., 2013а]. Интенсификация процессов до уровня, в несколько раз превышающего природный фон, в настоящее время связана с масштабным освоением территории [Шварев и др., 2021; Derkacheva et al., 2024]. Очевидна и природная предрасположенность территории к интенсивным гравитационным, флювиально-гравитационным, флювиальным процессам и их парагенезу. Этому способствуют «благоприятные» геоморфологические, гидрометеорологические, геологические и гидрогеологические условия [Осипов и др., 2013б] и, прежде всего, сочетание структурно-литологических факторов – податливого коренного субстрата переслаивающихся, тектонически смятых и раздробленных осадочных образований с существенной глинистой составляющей, с набором способствующих развитию процессов морфометрических характеристик [Харченко, Шварев, 2020].

Помимо «нормального», хотя и интенсифицированного фона природно-антропогенного морфогенеза на территории исследований и в соседних районах наблюдаются аномальные по величине проявления экзогенных процессов, прежде всего, оползней и селей, в качестве триггера которых «работает» сильная сейсмичность территории, потенциально достигающая 9 баллов и связанная с развитием здесь активных сейсмогенерирующих разломов. К северу от хр. Аибга в районе субширотного отрезка долины реки расположен так называемый Мзымтинский тектонический узел [Осипов и др., 2013а], образованный несколькими пересекающимися активными разломами (с востока на запад): Бекишейским и Аибгинским, обрамляющими северный



и южный борта долины на субширотном отрезке и Мзымтинским северо-восточного простирания, определяющим соответствующий разворот долины Мзымты в антикавказском направлении к югу [Овсюченко и др., 2016]. К этому узлу приурочен, например, аномально крупный оползень (2,5 x 1,7 км, мощностью до 200 м) на склоне хр. Аибга, сформированный в позднем плейстоцене и резко выделяющийся на фоне множества прочих оползней, группирующихся в 5 генераций, четыре из которых отнесены к голоцену по морфологическим признакам [Осинов и др., 2013б]. Инструментальное датирование как самих оползневых образований, так и, непосредственно, сейсмогенерирующих разломов, позволило выделить уточнить возраст двух последних генераций в интервалах 4,0–3,1 кал. тыс. л.н. 3,3–0,6 кал. тыс. л.н. и вполне определенно соотнести их с сейсмическими событиями [Овсюченко и др., 2016]. Этот факт определяет сейсмичность в качестве основного триггера оползневой деятельности, как аномальных величин, так и массового развития. При этом, группировки дат оставляют вполне вероятной возможность четырех отдельных эпизодов сейсмогенной активизации в рамках этих двух интервалов: 1) 4,0–3,6; 2) 3,3–3,1; 3) 1,3–0,8 и 4) 0,8–0,6 кал. тыс. л.н. Закономерная приуроченность крупных оползневых, обвальнo-оползневых образований к отдельным активным разломам наблюдается не только в Мзымтинском узле, но и в других частях бассейна р. Мзымта, где наиболее крупные образования полностью или частично перекрывали долины, как, к примеру, крупный оползне-обвал в районе пос. Монастырь на пересечении с долиной р. Мзымта Кепшинского хребта и Монастырского активного разлома [Овсюченко и др., 2013].

Кроме крупных оползней и оползней-обвалов пространственной приуроченностью к активным разломам Мзымтинского узла обладают и селевые образования, отчасти непосредственно пространственно совпадающие с разломами [Осинов и др., 2013б], отчасти вызванные сильными сотрясениями и только тяготеющие к сейсмическим очагам. Крупнейшие из них имеют смешанный генезис, как, к примеру, гигантский оползень, сопряженный с глыбово-грунтовым потоком (селем) в долинах ручья Пслушонок и р. Пслух. Общая протяженность этого образования достигает 7,4 км, а расчетная мощность – 70 м [Шварев, 2015]. Сингенетичное образование, сформированное за счет трансформации оползня в мощный сель, вобрало в себя материал множества относительно небольших оползней и селей синхронно сошедших с бортов долин ручья и реки. Судя по захороненной в селевом шлейфе р. Пслух органике (датировки растительного детрита с глубины 7 и 12 м (1120+/-60 л.н. (ИГАН 3607) и 1280+/-60 л.н. (ИГАН 3612) [Шварев, 2015] в калиброванном исчислении, соответственно, 1155–926 и 1174–1298 кал. л.н.) его образование можно соотнести с эпизодом сейсмогенной активизации 1,3–0,8 кал. тыс. л.н. [Овсюченко и др., 2016].

Ключевой интерес для палеогеографических и палеосейсмических реконструкций исследуемой территории представляют крупнейшие гравитационные и флювиально-гравитационные образования, перекрывавшие днища долин рек Мзымтинского бассейна с образованием подпрудных бассейнов и резким изменением гидрологического режима и интенсивности морфогенеза. Эти образования являются свидетельствами наиболее сильных сейсмических событий, являясь частью катастрофических перестроек рельефа, синхронных с землетрясениями и провоцирующими последующие катастрофы уже экзогенного характера из-за прорыва подпрудных бассейнов. Анализ материалов геоморфологического картографирования разных лет [Кочетов, 1970; Шварев, 2009] и специальных сеймотектонических, палеосейсмических и инженерно-геологических исследований [Овсюченко и др., 2013; Осинов и др., 2013а,б; Шварев, 2015] обнаруживает в бассейне р. Мзымта 10 потенциальных участков оползневых и селевых запруд (таблица 1, рис. 1).

Два крупнейших образования из этого перечня связаны с гигантскими селями и обладают пространственной близостью и сходной морфологией. Эти участки морфологически выражены протяженными, более 4–5 км, селевыми террасами в днищах относительно крупных долин (ручьев Пслушонок и Бешенка), замыкающимися в дистальной части конусами выноса – шлейфами, вытягивающимися по приемным долинам (рек Пслух и Мзымта, соответственно), заведомо свидетельствуя о перекрытии речного стока в момент формирования.



Таблица 1. Потенциальные участки развития подпрудных бассейнов в бассейне р. Мзымта.

№ участка	Экзогенный агент формирования запруды	Высота русла перекрытия водотока (н.у.м.)	Высота плотины, м	№ потенциального седиментационного бассейна	Высота зеркала подпрудного озера (н.у.м.)	Площадь бассейна (км ²)
1	Оползневое тело	120	20–30	1	140–150	0,7–0,8
2	Обвалы с участием оползней, отседания и селей	170	20–30	2	190–200	2300–2400
3	Селевые шлейфы, оползневое тело	230	5–10	3	235–240	0,5–0,6
4	Селевые шлейфы	470	40–50	4	510–520	2100–2200
5	Селевой шлейф	1200	5–10	5	1205–1210	0,4–0,5
6	Оползневое тело	280	10–20	6	290–300	0,1–0,2
7	Оползневые тела	380	50–100	7	420–480	0,08–0,09
8	Селевой шлейф	500	40–50	8	540–550	0,07–0,08
9	Селевой шлейф	700	40–50	9	740–750	0,08–0,09
10	Селевой шлейф	990	20–30	10	1010–1020	0,3–0,4

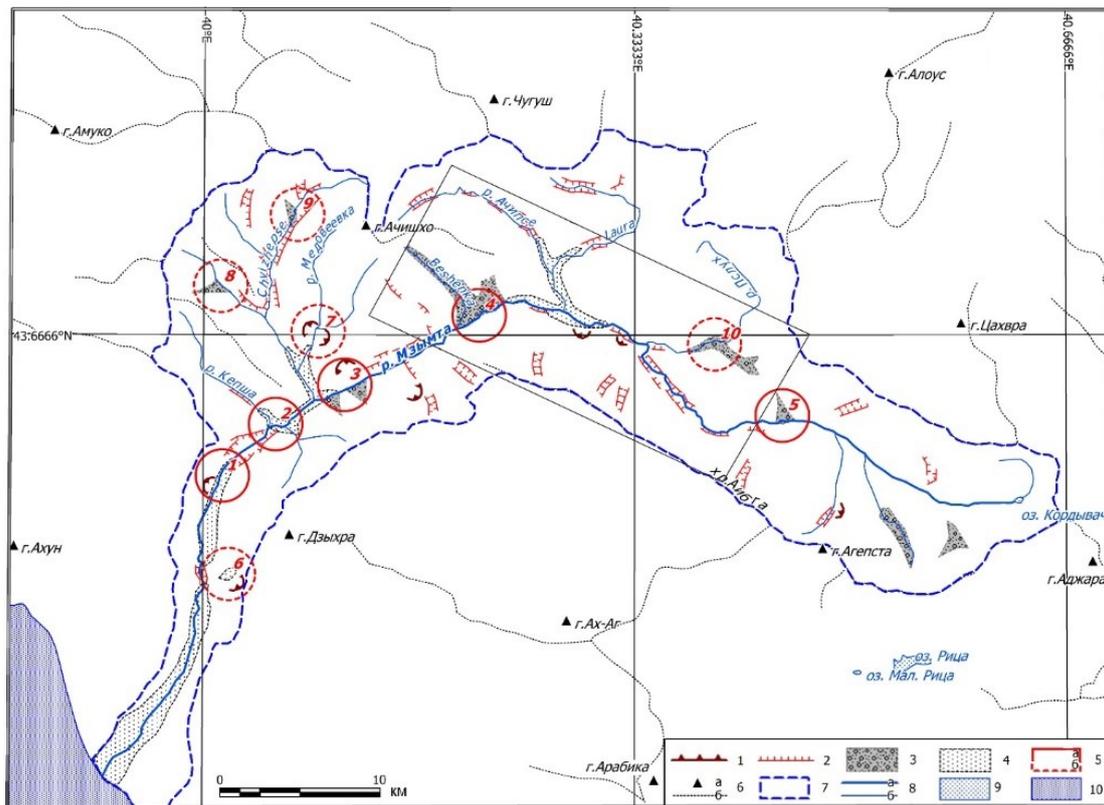


Рис. 1. Потенциальные участки оползневых и селевых плотин и подпрудных бассейнов. Основные зоны катастрофических проявлений экзогенных процессов в бассейне р. Мзымты (с использованием [Кочетов, 1970]): 1 – оползневые уступы; 2 – эрозионные уступы; 3 – пролювиально-селевые шлейфы и конусы; 4 – аккумулятивные террасы; 5 – потенциальные участки запруд: а – в русле р. Мзымты; б – в руслах притоков; 6 – элементы орографии: а – горные вершины; б – хребты; 7 – границы бассейна р. Мзымты; 8 – элементы речной сети: а – русло р. Мзымта; б – русла основных притоков; 9 – озера; 10 – Черное море



Возникает закономерный вопрос, не являются ли эти два крупнейших образования следами единого, сильнеешего в бассейне р. Мзымта флювиально-гравитационного катастрофического события, спровоцированного мощным землетрясением? Поскольку один из этих гигантских оползне-селевых комплексов в долине р. Пслух был охарактеризован ранее [Шварев, 2015], то задачей исследования явилась реконструкция комплекса в долине руч. Бешенка: детальное исследование морфологии комплекса, реконструкция порогов стока и параметров потенциального подпрудного озера – уровня, глубины, объема; оценка перемещенных масс и объемов с учетом видимых аккумулятивных и денудационных форм; расчет доселевых параметров рельефа и соответствующих им объемов заполнения; оценка современного вреза р. Мзымта в аккумулятивные образования селевого шлейфа и озерных осадков; определение возраста катастрофического события.

Методы и материалы

Современное состояние шлейфа и конуса выноса, построение 3D-моделей, продольных и поперечных профилей выполнено с использованием материалов воздушного лазерного сканирования, осуществленного НИПИ «ИнжГео» (г. Краснодар) в 2006 г. Реконструкция подпрудно-селевого комплекса осуществлено с использованием данных топографических карт, цифровой модели рельефа на базе данных SRTM и космических снимков высокого разрешения (сервисы GOOGLE и Яндекс). Для расчетов доселевого рельефа использовано программное обеспечение SAGA GIS. Оценка возраста проведена на основе анализа образцов захороненной органики в теле конуса выноса, отобранных в результате полевых исследований и расчисток в эрозионном врезе р. Мзымта в осевой части конуса выноса. Возраст образцов установлен по стандартной методике в лаборатории СПбГУ.

Результаты

Строение конуса выноса

Анализ материалов воздушного лазерного сканирования, полученного перед строительством объектов Олимпиады-2014, позволил установить основные параметры дистальной части конуса выноса и соотношение его с долинными формами р. Мзымта (рис. 2).

Строение продольных профилей дистальной части конуса выноса позволяет утверждать, что конус выноса полностью перекрывал днище долины р. Мзымта с расположением дистальной части первичной поверхности на высотах от 485 м в наиболее верхней по течению р. Мзымта точке (профиль 1–2), до 475 м в центральной части (профиль 1–1) и 465 м в нижней части (профиль 1–3). Фрагменты отчлененных руслом р. Мзымта частей конуса по левому борту долины р. Мзымта местами прослеживаются в виде ступеней со слабозапрокинутой в сторону левого борта поверхностью (профиль 1–3). Врез долины р. Мзымта в пределах конуса выноса имеет трапецевидную форму поперечного профиля с плоским днищем шириной 70–90 м и крутыми бортами, симметричными по уклонам и осложненными сегментами ступеней, расположенных на высоте 10–20 м над днищем долины фрагментарно по обоим бортам, закономерно снижающимся вниз по течению. Глубина вреза р. Мзымта в конус выноса нарастает от 40 м в верхней по течению части до 55–60 м вниз по течению.

На поперечных профилях также наблюдается врез долины р. Мзымта с плоским днищем и единственной ступенью, фрагментарно выраженной на бортах и выработанной в эрозионном уступе дистальной части конуса. Продольный уклон днища долины р. Мзымта устойчиво сохраняется на протяжении всего участка пересечения конуса выноса. Его прямолинейность косвенно указывает на неполную выработанность продольного профиля.

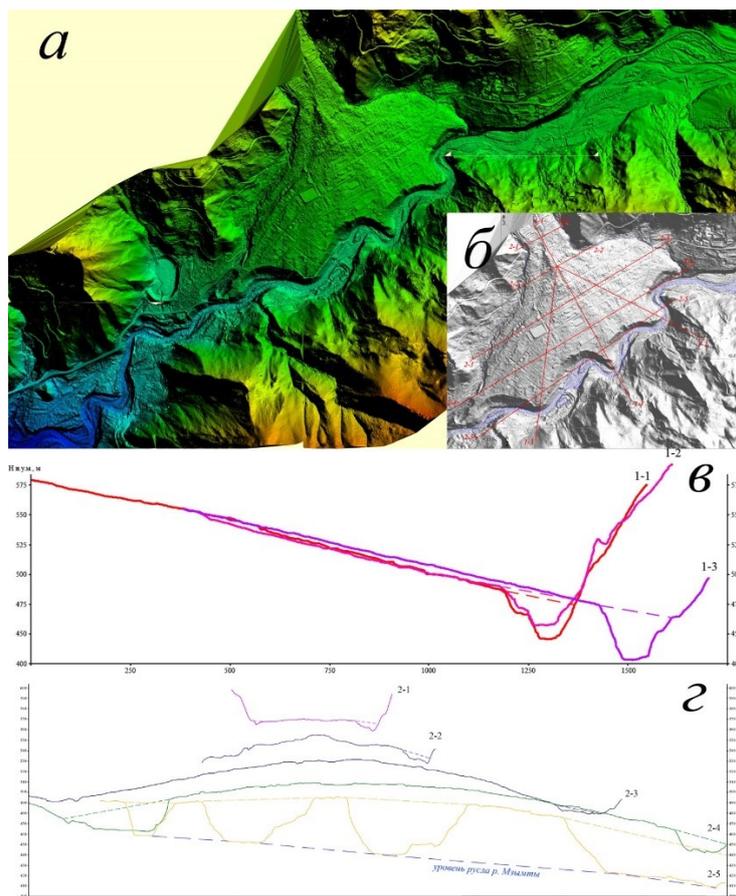


Рис. 2. а – Цифровая модель рельефа селевого конуса выноса на участке № 4; б – расположение профилей в пределах конуса выноса; в – продольные профили; г – поперечные профили

Реконструкция подпрудного бассейна

Высота сформированного порога стока для р. Мзымта при перекрытии русла конусом определяется в 485 м н.у.м., а максимальная глубина вреза, образовавшегося при переливе подпрудного озера – в 60 м. По-видимому, глубинное врезание р. Мзымта было неравномерным и разделяется на 2 этапа, граница которых маркируется террасовидной эрозионной ступенью на бортах долины и выработанной в отложениях конуса выноса.

Исходя из приведенных параметров можно реконструировать ситуацию с максимальным развитием подпрудного бассейна (рис. 3). Реконструируемый подпрудный бассейн имел протяженность около 6 км и, по-видимому, замыкался в районе устья р. Ачипсе (Лаура). Ширина озера достигала 700–900 м, а максимальная глубина в момент прорыва 30–35 м (вблизи подпрудной дамбы). В период существования озерного бассейна в его верхней части происходило накопление аллювиальных осадков, выносимых из долин Мзымта и Лауры. Об этом можно судить по характерной веерообразной форме и пологому уклону террасовидной поверхности по правому борту р. Мзымта, сохраняющиеся на протяжении около 1,5 км ниже устья р. Ачипсе.

Реконструкция доселевого рельефа и объемов селевых отложений

Объем полой формы долины р. Бешенка рассчитывался по следующему принципу. Для верхней точки селевого конуса (место сочленения долины Бешенки и Мзымты) был околтурен водосбор, с которого потенциально могло поступать твердое вещество во время катастрофических селей / селя. Площадь водосбора составила 18,2 км². Из ЦМР



по линии водосбора были извлечены отметки гребней, по которым простой триангуляцией восстановлена условная поверхности прямого юго-восточного склона г. Ачишко. Затем для той части площади бассейна, где современные высоты по ЦМР ниже реконструированной поверхности, подсчитывались объемы удаленного вещества. Безусловно, этот подход груб, он предполагает отсутствие отрицательных форм любого генезиса, осложняющих склон, но позволяет получить максимальную, верхнюю оценку комплексной денудации в границах водосбора (если принять, что водоразделы понижаются несоизмеримо медленнее склонов и днища долины). Средний слой сноса по площади бассейна Бешенки составил 246 м, а общий объем – 4,46 км³.

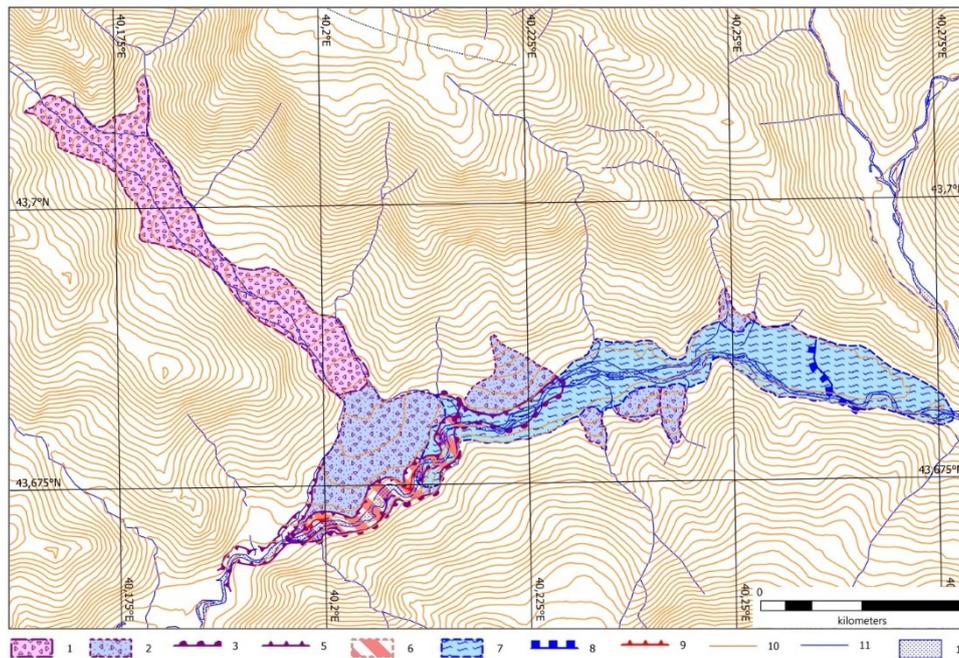


Рис. 3. Схема озерно-селевого комплекса в районе пос. Красная Поляна: 1 – селевая терраса; 2 – пролювиально-селевые конусы выноса; 3 – реконструируемая фронтальная часть конуса; 5 – эрозионный уступ в теле конуса выноса, относящийся к первому этапу врезания; 6 – врез р. Мзымта в конус выноса; 7 – реконструируемый подпрудный бассейн; 8 – фронтальная часть аллювиального конуса выноса, предположительно развивавшегося в период существования подпрудного озера; 9 – эрозионный уступ р. Мзымта, относящийся ко 2-му этапу врезания; 10 – изогипсы (по данным SRTM); 11 – ручьи; 12 – крупные реки

С подсчетом объемов селевых аккумулятивных тел ситуация обстоит сложнее, т.к. не известно положение их ложа. Этот подсчет можно осуществить сценарно, при разных вводных характеристиках и получить, тем самым, набор оценок.

Сценарий с минимальной оценкой объема аккумуляции базируется на допущении (недоказанном, а скорее всего и неверном), что после формирования селевого конуса, перекрывшего все днище долины, река «пропилила» всю его толщу и достигла прежнего состояния равновесия продольного профиля. Тогда для оценки положения доселевой поверхности проводятся следующие операции: 1) ручным дешифрированием определяются границы фрагментов конуса выноса, 2) по этим границам из ЦМР удаляется поверхность, отвечающая конусу, но оставляются отметки вдоль тальвега реки, 3) получившая пустота заполняется каким-либо методом интерполяции (расчеты проведены нами в SAGA GIS и R). В силу того, что ни один метод интерполяции не в состоянии строго воспроизвести географически правдоподобную доселевую поверхность, нами применялись разные методы, в итоге был получен диапазон оценок: В-сплайны – 16,3 млн м³, пошаговый ресемплинг (stepwise resampling) – 17,8 млн м³, триангуляция – 12,7 млн м³, сплайны тонких пластин (thin plates splines) – 21,9 млн м³. Таким образом, оценки аккумуляции 12,7–21,9 млн м³. В то же время данная оценка не



учитывает, как минимум, объем постселевого эрозионного вреза на конусе. Потенциально возможно до интерполяции маскирование не только сохранившихся фрагментов конуса, но и контура вреза. Однако, при таком подходе теряется информация об отметках тальвега, и интерполяция не может корректно восстановить поверхность.

Разумно предположить, что Мзымта, вероятно, не успела за постселевое время врезаться до прежних уровней и восстановить форму продольного профиля. Для участка русла Мзымты выше и ниже конуса выноса Бешенки (примерно 10–12 км в обе стороны, суммарная длина отрезка русла – 23 км) был построен продольный профиль. Профиль (рис. 4) ясно свидетельствует, что характер его – невыработанный. Ясной связи выпуклых переломов профиля со структурными условиями – не прослеживается. Вероятно, такая форма профиля – следствие заполнения дна селевыми наносами (в створе устья Бешенки, несколько выше и значительно ниже его). По минимумам (низшие отрицательные значения) кривизны профиля определены точки его вогнутых перегибов, т.е. перехода от положительной аномалии высот к нормальной форме профиля. Для части профиля за пределами этой аномалии нелинейной аппроксимацией получено экспоненциальное уравнение формы профиля (достоверность $R^2 > 0,99$):

$$Z = -231 + 468 * \exp(2,6 \times 10^{-5} \times X), \quad (1)$$

где Z (м) – абсолютная высота; X (м) – длина профиля от нижнего створа; калибруемые коэффициенты:

-231 (м) – абсолютная высота, к которой профиль стремится асимптотически, в случае удачно подобранного уравнения аппроксимации и идеализированного выработанного профиля – это базис эрозии;

468 (м) – амплитуда высот по профилю, при его фиксированной длине отвечающая осредненному наклону линии;

$2,6 \times 10^{-5}$ (1/м) – коэффициент, отвечающий кривизне профиля, мера его прогиба.

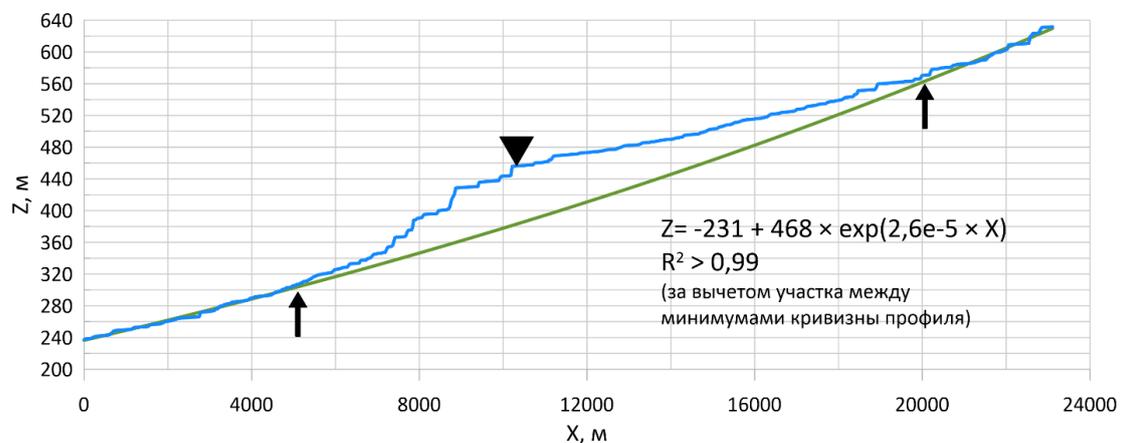


Рис. 4. Продольный профиль тальвега долины р. Мзымты. Синий – современный, зеленый – идеализированный выработанный. Стрелки показывают границы положительных аномалий отметок тальвега. Треугольник – место с наибольшей разницей отметок на двух профилях (положение селевого конуса Бешенки).

Все рассчитанные коэффициенты – статистически значимы, вероятность их случайного характера почти неотличима от нуля ($< 2 \times 10^{-16}$). Получившаяся отметка базиса эрозии обусловлена тем, что на всем протяжении русла Мзымты (а не на выбранном коротком отрезке) проявляются структурно-геологические отличия, выражающиеся в серии смен генерализованной формы продольного профиля, в частности, резких падениях его уклона вниз по течению.

Сравнивая реконструированный, близкий к экспоненциальному (насколько возможно для рек тектонически активных горных систем) профиль с фактическим, можно оценить аномалии высот дна долины. Они прослеживаются почти на 5 км вниз



по течению. Наибольшая разница между фактическим урезом Мзымты и ожидаемым положением профиля – составляет 75 метров, такие величины характерны как раз для положения селевого конуса (координаты точки 43,67433° с.ш., 40,20667° в.д.). Разумеется, аномалии отметок продольного профиля прослеживаются и вверх по течению, причем почти на 8 км. Мы предполагаем, что небольшая часть этого заполнения долины – селевые наносы Бешенки, но львиная доля – безусловно, озерно-аллювиальные осадки, заполнившие днище в результате подпора долины селевым конусом. Определить конкретные пропорции крайне трудно, а без проведения дополнительных изысканий – вряд ли возможно. Поэтому будем считать, что селевое заполнение днища долины – распространяется от верхней (по течению Мзымты) части конуса и далее вниз по долине.

Расчет объема заполнения осуществляется по тому же принципу, что был описан ранее – из ЦМР удаляется днище долины в границах тыловых швов. На освободившееся место помещаются точки, маркирующие современное положение русла (допущение, не влияющее значительно на итоговые расчетные показатели), с присовокупленными отметками реконструированного профиля. Затем производится интерполяция отметок высот от современных тыловых швов до реконструированного тальвега. Применение триангуляции позволяет получить оценку объема конуса и заполнения ниже по долины в 90,2 млн м³ (из них непосредственно в границах конуса выноса Бешенки – 50–55 млн м³), при площади заполнения 2,6 км² и средней мощности 34 м. Наибольшая разница между современной и реконструированной поверхностью превышает 100 м у бровки селевого конуса, подрезанного Мзымтой. Общая схема предполагаемого селевого заполнения днища долины Мзымты приведена на рис. 5.

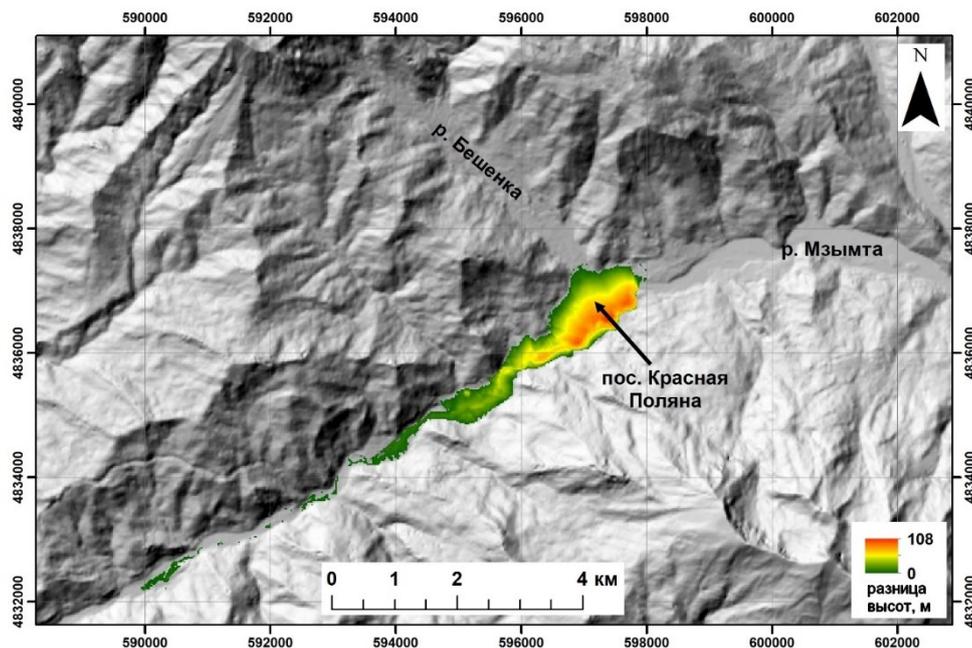


Рис. 5. Схема мощностей заполнения днища долины Мзымты селевыми отложениями, поставляемыми из долины Бешенки. Рельеф по SRTM. Координатная система – UTM 37N.

Возраст события

В дистальной части конуса выноса по правому борту долины р. Мзымта выполнен разрез на бровке эрозионной ступени высотой около 6 м над уровнем реки. Поверхность ступени пологовогнутая, вблизи бровки крутизной 3–5°, выше постепенно увеличивающая крутизну с достижением в верхней части уступа крутизны 30–60°. Террасовидная поверхность сильно обводнена и перекрыта многочисленными оползнями, преимущественно потокового типа.



В разрезе вскрывается трехчленная толща (рис. 6):

А – верхняя часть (0,0–0,9 м) несортированные галька, щебень, гравий в темно-коричневом среднем суглинке, опесчаненном;

Б – средняя часть (0,9–1,3 м) торф, хорошо разложившийся, выдержанной мощностью около 0,5 м, пронизанный корнями растений, темно-коричневого цвета, слабо наклонный к руслу р. Мзымта (3–5°);

В – нижняя часть (1,3–2,4 м (видимая)) несортированный щебень, валуны, дресва в тяжелосуглинистой матрице серого цвета, сильно обводненной, местами палевого, в верхней части рыжего со следами ожелезнения. По разрезу местами встречаются фрагменты растительности.



Рис. 6. Разрез на уступе селевого конуса выноса по правому борту долины р. Мзымта в районе пос. Красная Поляна (участок № 4)

В толще отобраны три образца для радиоуглеродного датирования – в кровле и подошве торфяного горизонта на глубинах 1,2–1,3 м и 1,5–1,6 м и растительный детрит в нижнем слое на глубине около 2,3 м, обработанные в лаборатории СПбГУ (таблица 2).

Таблица 2. Возраст захороненной органики в отложениях селевого шлейфа.

Лаб. номер	Описание	Радиоуглеродный возраст, лет	Калиброванный возраст (календарный), кал.лет*
LU-11199	№ 100-3. Красная Поляна, долина р. Мзымта, терраса высотой 6–7 м. гл. 1,2–1,3 см. кровля торфа	310±70	360±100
LU-11200	№ 100-2. Красная Поляна, долина р. Мзымта, терраса высотой 6–7 м. гл. 1,5–1,6 см. подошва торфа	470±50	500±50
LU-11201	№ 100-1. Красная Поляна, долина р. Мзымта, терраса высотой 6–7 м. гл. 2,3 см. Обводненный глинистый горизонт с органикой в селевой матрице	1290±60	1200±60

Полученные датировки позволяют сделать заключение о некоторых временных этапах развития подпружного бассейна. Нижняя часть разреза (слой В) – селевые отложения конуса выноса, перекрывшего долину р. Мзымта в результате катастрофического события, произошедшего в интервале 1140–1260 л.н. Последующий врез р. Мзымта до уровня около 6 м над современным урезом продолжался в течение



около 700 лет, а до современного уровня еще около 500 лет. В период от 500 до 360 лет на правом борту р. Мзымта существовала заболоченная терраса (слой Б), которая на последнем этапе оказалась захороненной оползневыми массами (слой А).

Выводы

Полученные данные свидетельствуют о том, что в результате катастрофического селевого события в долине руч. Бешенка сформировалась селевая терраса в устьевой части ручья переходящая в конус выноса, полностью перекрывавший долину р. Мзымта, в результате чего было образовано подпрудное озеро протяженностью около 6–8 км. Ширина озера достигала 700–900 м, а максимальная глубина в момент прорыва 30–35 м. С использованием методов картографического моделирования и морфометрического анализа выполнена реконструкция доселевых долин рр. Бешенка и Мзымта и получен диапазон оценок объемов селевых отложений и осадков подпрудного озера, мощности конуса выноса.

Применение триангуляции позволяет получить оценку объема селевого конуса в устье р. Бешенка и шлейфа ниже по долине р. Мзымта в 90,2 млн м³ (из них непосредственно в границах конуса выноса – 50–55 млн м³), при площади заполнения 2,6 км² и средней мощности 34 м. Сравнение фактического профиля русла р. Мзымта с реконструированным доселевым на основе нелинейной аппроксимации показывает аномалии высот на протяжении 5 км вниз по течению от селевой плотины, где они связаны непосредственно с селевым шлейфом, и 8 км вверх, где их происхождение объясняется аллювиально-озерными осадками подпрудного озера. Максимальное отклонение расчетных величин экспоненциального профиля от фактического русла р. Мзымта составляет 75 м на пересечении с осевой частью конуса выноса, что в совокупности с видимой высотой конуса определяет максимальную мощность селевых отложений более 100 м.

Возраст катастрофического события устанавливается по захороненной в селевой матрице органике (1200 ± 60 кал. л.н.). С учетом результатов датирования аналогичного гигантского селевого комплекса Пслушонок/Пслух по наиболее молодым органическим осадкам (1155–926 кал. л.н.) можно утверждать единый возраст для обоих комплексов в интервале 1140–1155 кал. л.н. Этот возраст отвечает одному из эпизодов голоценовой сейсмогенной активизации, определяя его как наиболее мощный.

Финансирование

Работа выполнена в рамках госзаданий ИГ РАН FMWS-2024-0005 (реконструкции палеорельефа) и ИФЗ РАН FMWU-2025-0038 (оценка палеосейсмичности)

Список литературы

- Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В., Казакова Е.Н., Морозов Г.Л. Селевые процессы в бассейне р. Мзымта (Красная Поляна) и их влияние на территорию строительства объектов Олимпийского комплекса // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2013, 6: 516–529.
- Кочетов Н.И. К геоморфологии долины р. Мзымта (Западный Кавказ) // Известия ВУЗов. Геология и разведка, 1970, 6: 21–27.
- Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Условия развития опасных геологических процессов на территории строительства горно-спортивных сооружений в Краснополянском районе г. Сочи // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013а, 4: 291–302.
- Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Оценка и ранжирование по степени оползневой опасности участков строительства олимпийских объектов в г. Сочи // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013б, 6: 530–537.



- Харченко С.В., Шварев С.В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа // Вестник Московского университета, Серия 5, География, 2020, 3: 22–33.
- Шварев С. В. Детальное геоморфологическое картографирование в верховьях реки Мзымты // Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: Материалы международной конференции ИнтерКарто – ИнтерГИС 15. Пермь, 2009 с. 462–464.
- Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И. Количественная оценка факторов активизации селей в 2006–2019 годах на склоне хребта Аибга (Западный Кавказ) // География и природные ресурсы, 2021, 2: 41–50.
- Derkacheva A., Golosov V., Shvarev S. Hazardous exogenous geological processes in the mountains under the pressure of human activity: 15-year observations from a natural landscape to a large ski resort // Natural Hazards, 2024, 120: 2847-2868. doi: 10.1007/s11069-023-06309-y.