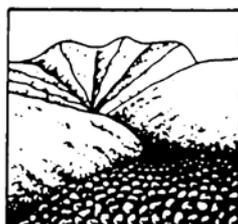


СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
8-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.



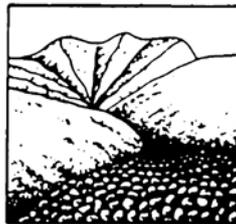
Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2025

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 8th International Conference

Tbilisi, Georgia, 6–10 October 2025



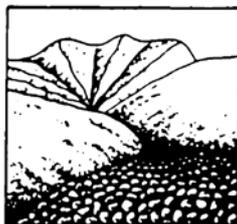
Edited by
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva

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



Мониторинг развития селей на склонах бассейна р. Мзымты в районе горного кластера Олимпийской деревни

В.Н. Голосов^{1,2}, С.В. Харченко^{1,2}, М.И. Успенский^{1,2}, В.Е. Шатохина¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, gollossov@gmail.com

²Институт географии РАН, Москва, Россия

Аннотация. Черноморское побережье Кавказа – один из наиболее селеопасных районов России, что обуславливается эпизодическими мощными ливнями, значительными объемами рыхлых отложений на склонах гор, а также высокой антропогенной нагрузкой. Масштабы селевых событий меняются от очень мелких до грандиозных. Одни и те же очаги становятся селеопасными с высокой частотой во времени, что лимитируется только частотой событий мощного стока воды и скоростью обновления обломочного материала на склоновых водосборах. Один из подобных очагов, расположенный на левом борту долины р. Мзымты непосредственно ниже Олимпийской деревни комплекса Роза-Хутор, изучается нами с 2019 г., ведутся повторные ежегодные аэрофотосъемки с БПЛА, создаются разновременные ЦМР. Неконтролируемый сток с частично заасфальтированных и застроенных водосборов 4 селевых лотков приводит к их постоянной активизации и закладке новых (за период наблюдений видоизменяется рельеф 2 центральных, наиболее крупных лотков, но еще большую активность проявляют более молодые 2 периферийные). При их сравнительно небольшой длине (не более 500 м) и очень высокой крутизне склона (25–35°, местами выше) долины р. Мзымты, прорезаемого ими, из года в год можно проследить пульсационный транспорт материала с верхних частей лотка в средние и нижние, где его движение останавливается до следующего селевого события. Таким образом, доставка селевого материала здесь не всегда осуществляется в днище долины за 1 годичный цикл. Сравнение ЦМР с разницей в 5 лет (2019–2024 гг.) показало, что объемы отрицательных изменений высот составили 37 600 м³, а положительных – 9100 м³. То есть за несколько лет безвозвратно с водосбора было вынесено 75% накопленного объема рыхлообломочного материала. Осредненная на оголенные от растительности участки величина селевой денудации составляет 90–100 см за 5 лет.

Ключевые слова: эрозия, аккумуляция, экстремальные ливни, доставка наносов

Ссылка для цитирования: Голосов В.Н., Харченко С.В., Успенский М.И., Шатохина В.Е. Мониторинг развития селей на склонах бассейна р. Мзымты в районе горного кластера Олимпийской деревни. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 158–167.

Monitoring of debris flow development on the slopes of the Mzymta river basin in the area of the Olympic Village Mountain cluster

V.N. Golosov^{1,2}, S.V. Kharchenko^{1,2}, M.I. Uspenskii^{1,2}, V.E. Shatokhina¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, gollossov@gmail.com

²Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The Black Sea coast of the Caucasus is one of the most debris-prone areas of Russia, which is caused by episodic heavy rainfalls, significant volumes of loose sediments on mountain slopes, and high anthropogenic load. The scale of debris flow events varies from very small to grandiose. The same sources become debris-prone with a high



frequency in time, which is limited only by the frequency of events of powerful water runoff and the rate of renewal of debris on slope catchments. One of such sources, located on the left side of the Mzymta River valley directly below the Olympic Village of the Rosa Khutor complex, has been studied by us since 2019, repeated annual aerial surveys are conducted from UAVs, and multi-temporal DEMs are created. Uncontrolled runoff from the partially paved and built-up catchments of 4 debris flow chutes leads to their constant activation and the formation of new ones (during the observation period, the relief of the 2 central, largest chutes changes, but the younger 2 peripheral ones are even more active). It is curious that, given their relatively short length (no more than 500 m) and the very steep slope (25–35°, higher in places) of the Mzymta valley cut by them, it is possible to trace the pulsating transport of material from the upper parts of the chute to the middle and lower ones from year to year, where its movement stops until the next debris flow event. Thus, the delivery of debris flow material here is not always carried out to the bottom of the valley in 1 annual cycle. Comparison of the DEM with a difference of 5 years (2019–2024) showed that the volumes of negative elevation changes amounted to 37,600 m³, and positive ones – 9,100 m³. That is, over several years, 75% of the volume of loose debris was irretrievably removed from the catchment area. The average debris flow denudation value for areas exposed to vegetation is 90–100 cm over 5 years.

Key words: erosion, accumulation, extreme rainfall, sediment delivery

Cite of this article: Golosov V.N., Kharchenko S.V., Uspenskii M.I., Shatokhina V.E. Monitoring of debris flow development on the slopes of the Mzymta river basin in the area of the Olympic Village Mountain cluster. 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. 158–167.

Введение

Черноморское побережье Кавказа в границах РФ и примыкающий к нему низкогорно-среднегорный пояс относятся к регионам с высокой повторяемостью внезапных паводков [Kuksina et al., 2025] и селей [Ефремов и др., 2020]. Основными факторами, способствующими их формированию, являются значительный слой дождевых осадков, литологический состав пород, слагающих склоны и всё возрастающая антропогенная освоенность территории [Шеко, 1980]. Внезапные паводки преимущественно формируются в пределах малых водотоков и рек, дренирующих предгорно-низкогорный пояс [Куксина и др., 2020], тогда как образование селей отмечено на водосборах ручьёв и временных водотоков, прорезающих склоны среднегорно-высокогорного пояса, для которых характерны достаточно большие уклоны русла, что существенно повышает транспортирующие способности потоков.

В пределах бассейна р. Мзымты рост селевой активности был обусловлен строительством горного кластера Олимпиады 2014, который располагается в верхней части бассейна выше по течению от п. Красная Поляна [Казаков и др., 2013, Шварёв и др., 2020]. Основными причинами усиления селевой активности послужили сведение растительного покрова, неправильное складирование строительных грунтов в истоках временных и постоянных водотоков и искусственное увеличение площадей водосборов отдельных водотоков при планировке склонов. Несмотря на то, что с момента завершения основных строительных работ по сооружению объектов горного кластера прошло более 11 лет, площади склонов с высокой активностью экзогенных процессов, поставляющих материал для формирования селей, продолжает расти [Derkacheva et al., 2024]. Только отчасти это связано с сооружением новых горнолыжных трасс. На большинстве нарушенных участках склонов активность выветривания коренных пород и последующего перемещения рыхлообломочного материала процессами оползания, осыпания, отседания продолжается. В результате происходит активная подготовка материала, который служит основой для периодически формирующихся селей разной мощности.



Причинами формирования селей в данном регионе являются либо сход оползней, тело которых перегораживает водоток и приводит к образованию временных водоёмов, прорыв которых приводит к формированию селей, либо выпадение ливней с большим слоем осадков [Казаков и др., 2013]. В отдельных случаях сели формируются при наложении дождевых осадков на активное снеготаяние. Однако далеко не каждый случай выпадения осадков даже со слоем свыше 100 мм в сутки приводит к формированию селей и, напротив, в отдельных случаях мощные сели образуются при практически ежегодно выпадающих в районе Красной Поляны осадках в 60–80 мм [Шварёв и др., 2020]. Это можно связать с рядом факторов. Во-первых, данные о слое осадков базируются на точечных наблюдениях за метеопараметрами на метеостанциях и в этой связи важно иметь представление о том, на какой площади выпали осадки с данным слоем. Во-вторых, для формирования селя необходим достаточный объём рыхлообломочного материала, который может быть вовлечён в перемещение. В этой связи представляется важной задачей проведение детальных наблюдений за отдельными водосборами селевого происхождения с целью оценки соотношения, формирующегося внутри них за счёт процессов выветривания рыхлообломочного материала и объёма вещества, перемещаемого различными процессами денудации как внутри водосбора, так и за его пределы. Подобные наблюдения были организованы в 2019 г. и проводятся до настоящего времени на четырёх небольших селевых водосборах, расположенных на левом борту долины р. Мзымты северо-восточной экспозиции ниже по течению от впадения в неё р. Пслух. В данной статье анализируются результаты мониторинговых наблюдений на данном объекте за период 2019–2024 гг.

Объект исследования

Участок исследования – крутой левый борт долины р. Мзымты с уклонами 15–35°, протягивающийся вдоль реки на участке выше по течению от впадения в неё руч. Сулимовский и ниже впадения р. Пслух (рис. 1). Борт долины на всём протяжении имеет длину порядка 500 м. С запада и юго-запада он граничит с водосбором руч. Сулимовский, а с востока и юго-востока – водосбором руч. Колценко. Несколько малых временных водотоков прорезают борт в основном в его центральной части. Данные водосборы имеют линейно вытянутую форму, и только верхние части их водосборов выходят на слабонаклонную ступень рельефа междуречий, в пределах которой и построена большая часть горного кластера Олимпийской деревни. Борт сложен туфами, туффитами основного состава, аргиллитами с прослоями алевролитов и песчаника ачишхинской свиты [Государственная..., 2002]. До начала работ по строительству горного кластера борт долины был в основном залесён, но на одном из участков сохранился частично заросший участок со следами формирования селя, возникшего, очевидно в связи со сходом небольшого оползня, перекрывшего сток на одном из временных водотоков, и последующего размыва тела оползня селевым потоком (рис. 1А).

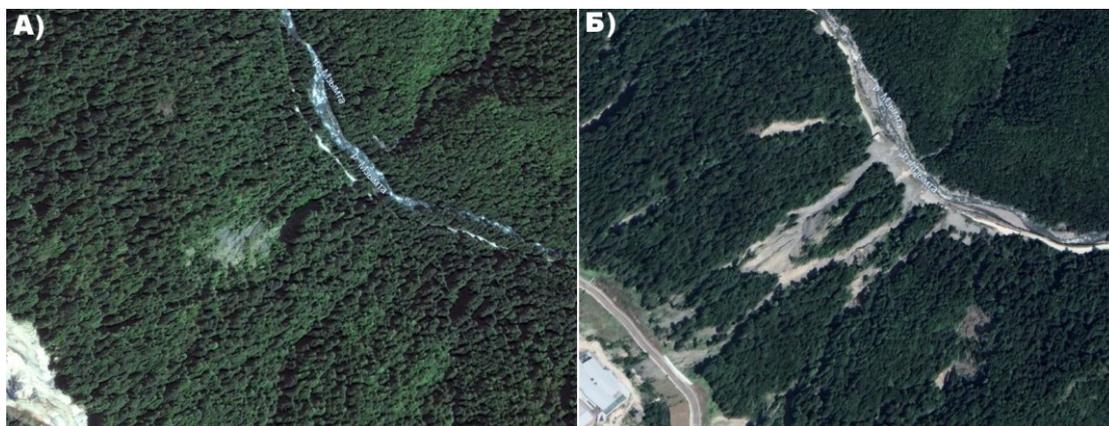


Рис. 1. Участок исследования: А – лето 2010 г.; Б – лето 2024 г.



Для участка, расположенного в пределах высот 630–1300 м над ур. моря, среднегодовое количество осадков составляет 1300–2000 мм судя по данным наблюдений по трем ближайшим гидрометеостанциям: Красная Поляна ($H_{абс} = 567$ м), Кордон Лаура ($H_{абс} = 576$ м) и Аибга ($H_{абс} = 2226$ м). Наибольшее ежемесячное количество осадков характерно для зимнего периода. Интенсивность осадков теплого времени года постепенно снижается к середине лета и вновь увеличивается осенью. Повторяемость сильных (свыше 60 мм) дождей значительно варьирует по годам при отсутствии какого-либо выраженного тренда. Более 100 мм за сутки выпадает сравнительно редко, но часто встречаются периоды, когда за несколько дней может выпасть до 200 мм осадков.

Обилие осадков в сочетании с высоким температурным фоном в теплое время года способствует очень быстрому росту растительности, в том числе на участках, подверженных воздействию селей. Это отчасти сдерживает активность рельефообразующих процессов. На исследуемом участке растут буковые, грабовые и пихтовые леса.

Материалы и методы

Мониторинг динамики рельефа селевых лотков осуществлялся с помощью подхода Structure from Motion (структура из движения) [Westoby et al., 2012]. За период наблюдений осуществлялись повторные аэрофотосъемки участка с использованием БПЛА DJI Mavic Pro (2019, 2022, 2023), DJI Phantom 4 Pro v.2 (2021) и DJI Mini 4 Pro (2024). В 2020 г. по техническим причинам съемка данного участка не удалась. Из серий аэрофотоснимков в Agisoft Metashape восстанавливались цифровые модели местности и ортофотопланы по стандартной процедуре [Lastilla et al., 2021]. В силу сложности обеспечения геодезического планового-высотного обоснования для взаимной привязки в данной местности разновременных данных использовались методы корегистрации цифровых моделей высот. Первичное грубое совмещение осуществлялось в CODEM [NCALM-UH/CODEM, 2023], затем точное совмещение проводилось с использованием ILEM [Харченко, 2024]. В основе первого из них лежит комбинация методов RANSAC (RANdom SAmple Consensus) и ICP (iterative closest point), создается матрица аффинной трансформации (сдвиг по трем осям, поворот по трем осям, масштабирование), которая затем применяется ко всей регистрируемой модели разом. Оптимальные параметры трансформации подбираются с учетом минимизации среднего квадрата ошибки (расстояния между референсной и регистрируемой ЦММ). Данный метод не позволяет учитывать локальные вариации ошибок, разных по величине и направлению, в пределах участка, для которого выполняется стереореконструкция поверхности. К привязанной в первом приближении регистрируемой ЦММ применяется второй алгоритм – ILEM, нацеленный на определение параметров трансформации за счет поиска стабильных, не изменившихся площадок за выбранный период времени. В качестве референсной модели, с которой совмещались все остальные, использовалась модель рельефа 2024 г., как наиболее детальная, а также с расчетом на будущие съемки (совмещать будущие ЦММ меняющегося рельефа проще с более поздней моделью, с меньшим накопленным объемом изменений, чем с более ранними). Остаточная ошибка регистрации определяется на каждой стадии (и после применения CODEM – по 3 осям отдельно и общая, и после применения ILEM – по высоте). Для CODEM ошибка характеризует неопределенность привязки каждой из ЦММ, а, следовательно, может использоваться для вычисления слоя неопределенности изменений высот по стандартной формуле:

$$UL = \pm 2 \times (Z1^2 + Z2^2)^{0.5}, \quad (1)$$

где UL – слой неопределенности (uncertainty layer), диапазон изменений высот из разновременных ЦММ/ЦМР, находящийся в пределах погрешности их взаимной привязки с вероятностью 95% ($\pm 2\sigma$), м; $Z1$ – ошибка регистрации первой сравниваемой модели по высоте, м; $Z2$ – ошибка регистрации второй сравниваемой модели по высоте, м



ЦЕМ в ходе процедуры корегистрации в качестве одного из результатов выдает среднеквадратическое отклонение разности высот Z_{err} для стабильных площадок (то есть, в реальности эта разность должна быть равна 0). Значение $\pm 2 \times Z_{err}$ является слоем неопределенности. При этом нет возможности получить оценку ошибки привязки каждой конкретной модели в отдельности, только их разницы. На рис. 2 показан фрагмент профилей за 2024 и 2019 гг. для поверхности стабильного техногенного склона (кровли и скатов противоселевой галереи), расположенной в основании исследуемого склона долины Мзымты и защищающей от селей автодорогу. Очевидно, что оба профиля имеют крайне высокую степень сходства. Среднеквадратическое отклонение высот достигает 5,4 см, ширина слоя неопределенности (в рамках этого микросклона, а не всего участка) – 10,8 см.

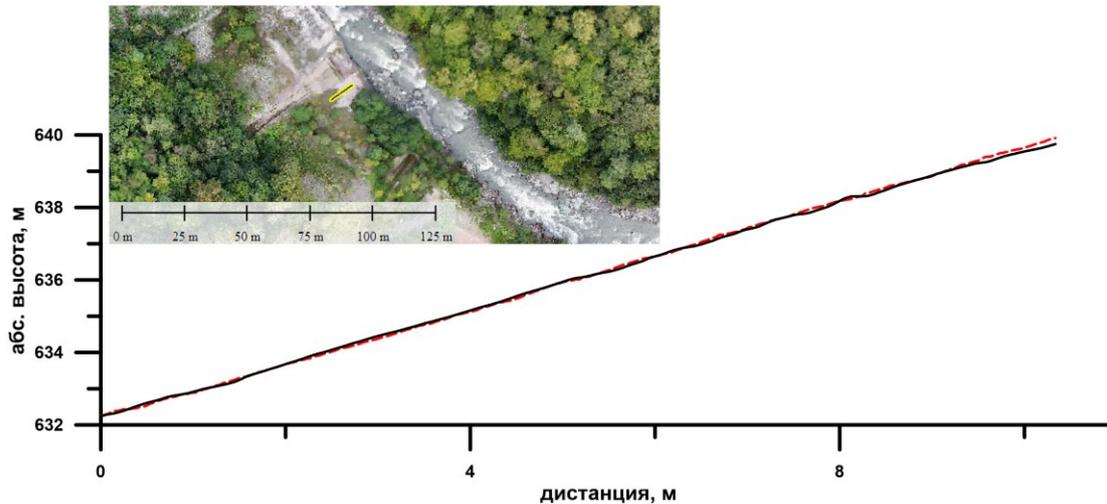


Рис. 2. Гипсометрические профили стабильного склона (бетонная крыша туннеля). Черная сплошная линия – 2024 г. (референсная ЦММ), красная пунктирная линия – 2019 г. (регистрируемая ЦММ). Жёлтая линия на снимке – расположение бетонный водослив в нижней части склона на участке мониторинга

Попарное совмещение разновременных моделей возможно двумя путями: 1) для оценки кумулятивного изменения рельефа сравниваются хронологически первая модель со второй, третьей и так далее, 2) для оценки изменений рельефа за отдельные временные срезы – сравниваются первая модель со второй, вторая с третьей и т.д. Нами для показа разных аспектов динамики селевых лотков использована комбинация обоих подходов. В случае нулевых ошибок географической привязки интервальные оценки легко и математически строго конвертируются в кумулятивные, и наоборот. Однако, разные по величине ошибки географической привязки данных за разные временные срезы и их пары делают такие переходы невозможными, поэтому оба подхода используются независимо.

Вычитание из более поздней ЦММ более ранней – позволяет получить цифровую модель разности высот (т.н. DEM of Difference, DoD), из которой затем вырезаются участки с величиной изменений в пределах погрешности (слой неопределенности). Остальные изменения высот с вероятностью 95%, после удаления артефактов, считаются полезным сигналом. На рис. 3 продемонстрированы этапы получения DoD для периода 2019–2024 гг. По полученной итоговой DoD рассчитываются площади и объемы отрицательных (денудация) и положительных (аккумуляция) изменений рельефа, анализируется доля материала, выносимого за пределы участка (в реку) за один цикл наблюдений, а также объем переотложенного в пределах участка материала. Разновременные ортофотопланы облегчают проведение геоморфологической интерпретации оцененных изменений высот. Кроме того, по ортофотоплану на 2024 г. были оконтурены залесённые участки. Изменения высот на залесённых участках не



брались в расчет. Следует отметить, что ошибка по высоте при использовании алгоритма корегистрации ILEM повышает точность оценок перемещённого материала в 2–3 раза.

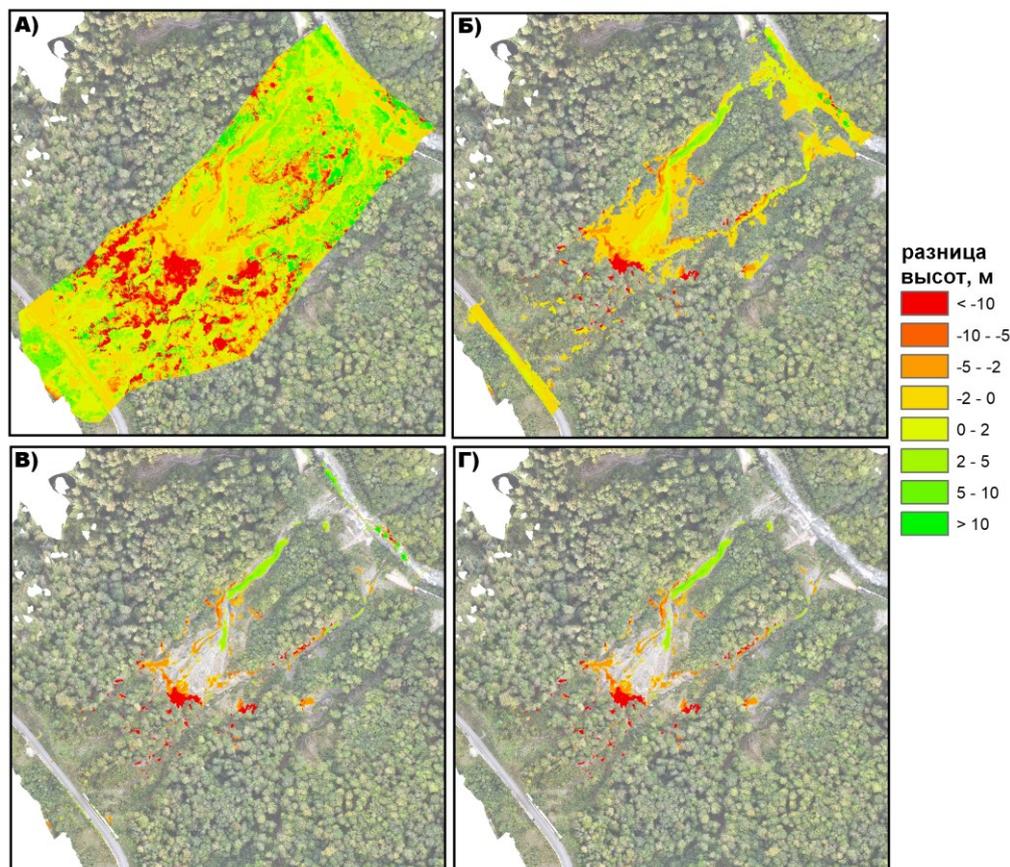


Рис. 3. Этапы получения данных о разнице высот на исследуемом участке за период 2019–2024 гг.: А) после корегистрации с помощью CODEM, Б) после маскирования растительности, В) после маскирования слоя неопределенности ($\pm 2 \cdot 0,786$ м), Г) после удаления артефактов в русле Мзымты и вдоль автодороги

Результаты

Сопоставление ЦМР, построенных по результатам проведения съёмок участка мониторинга с БПЛА, позволило оценить площади и объёмы перемещённого рыхлообломочного материала в целом за весь срок наблюдений и за отдельные периоды (таблица 1).

Следует отметить, что съёмка во все годы проводилась в последних числах сентября-первых октября, что позволяет объективно сравнивать различия между отдельными годами. Обращает на себя внимание достаточно большие различия между оценками объёмов выноса между двумя методами корегистрации цифровых моделей высот (CODEM и CODEM+ILEM). Вариант расчётов на основе CODEM+ILEM представляется более точным, хотя и он не лишён недостатков. Во-первых, при используемой технологии съёмки не учитывается перемещение материалы под кронами деревьев. Во-вторых, большая точность могла бы быть достигнута при наличии ряда опорных точек внутри селевых водосборов. Но последнее неосуществимо в связи с высокой динамикой рельефа за счёт процессов выветривания и денудации. Тем не менее, можно констатировать, что наиболее значимый вынос произошёл в период 2023–2024 гг., тогда как локальное перераспределение рыхлообломочного материала было более существенным в период 2019–2021 гг. Несмотря на то, что в данном случае оценки даны за два года можно предположить, что перемещение произошло за счёт формирования обвала или оползня, при практически одновременном дальнейшем



смещении материала в нижнюю часть склона селевым потоком. На это указывает распределение зон эрозии и переотложения (рис. 4А). В остальные годы перемещение материала носило пульсационный характер, с постепенным смещением материала вниз по склону (рис. 4 Б–Г). Суммарный вынос наносов за пределы водосбора составил 28,5–34,5 тыс. м³, а слой денудации на всю площадь пересечения съёмок 2019 и 2024 гг. – 20–27 см / 5 лет. При этом если учитывать только безлесную площадь (37 тыс. м²) – показатели составляют уже 90–100 см за 5 лет. Следует учитывать, что нижние части склона, на которых расположены конуса выноса двух юго-восточных селевых лотков находятся за пределами участка съёмки. Поэтому доля материала, вынесенного за пределы собственно склона долины р. Мзымты, скорее завышена.

Таблица 1. Результаты оценок площадей зон сноса и аккумуляции и объёмов перемещённого, переотложившегося и вынесенного за пределы участка мониторинга материала

Период	CODEM (площадь / объём изменений)*			CODEM+ILEM (площадь / объём изменений)*		
	Вынос за пределы участка в р. Мзымта	Эрозия	Аккумуляция	Вынос за пределы участка в р. Мзымта	Эрозия	Аккумуляция
Суммарные значения за период 2019–2024 гг.						
2019-2024	7,2 / -34,5	5,2 / -41,1	1,9 / 6,6	12,9 / -28,5	8,2 / -37,6	4,8 / 9,1
Изменения за годичные интервалы						
2019-2021	4,4 / -16,9	2,1 / -27	2,2 / 10,1	10,9 / -14,6	5,4 / -28	5,6 / 13,4
2021-2022	2,8 / -1,6	1,6 / -8,8	1,2 / 7,2	9,6 / -5,9	6,8 / -13,7	2,8 / 7,8
2022-2023	2,3 / -0,9	1,3 / -8,8	0,9 / 7,9	8 / 1,4	4,1 / -8,1	3,9 / 9,5
2023-2024	4,6 / -11	3,3 / -24	1,3 / 13	12,6 / -10	8,1 / -23,9	4,5 / 13,9

* Числитель – площадь, тыс. м², знаменатель – объём, тыс. м³.

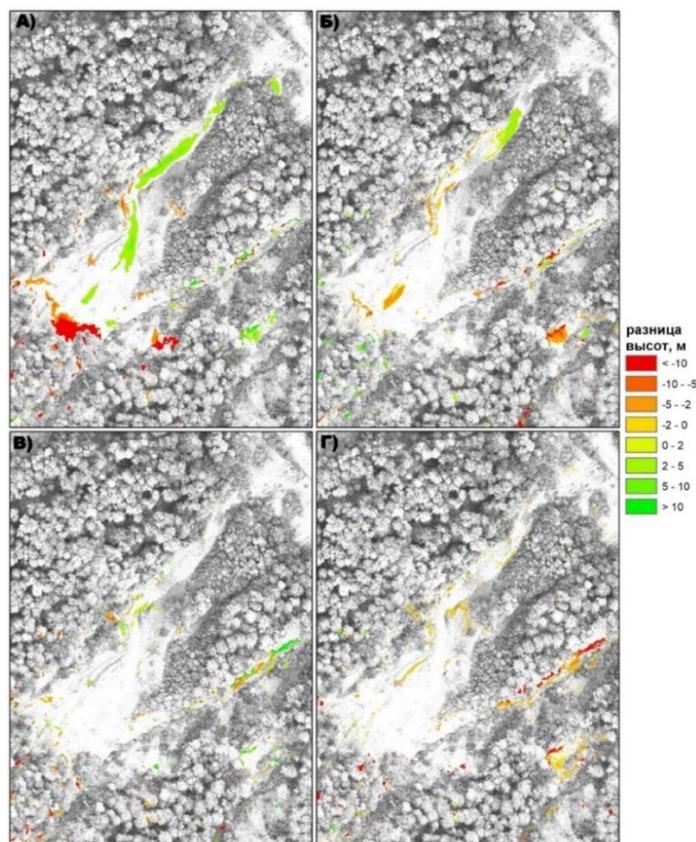


Рис. 4. Динамика изменений земной поверхности на участке мониторинга по периодам: А) 2019–2021 гг., Б) 2021–2022 гг., В) 2022–2023 гг., Г) 2023–2024 гг.



Обсуждение

Левый борт долины р. Мзымты на участке исследования в период до начала строительства горного кластера объектов Олимпиады 2014 г. был практически полностью залесён. Но в его центральной части примерно на середине склона существовал относительно открытый участок с молодой порослью леса, что позволяет предположить, что сравнительно недавно в этом месте был спływ, образовавшийся вдоль периодически пересыхающего ручья, истоки которого располагаются на террасовидной поверхности, расположенной над данным крутым склоном. Известно [Казаков и др., 2013], что все ныне существующие селевые лотки и селевые конуса и шлейфы, находящиеся у подножья склона, либо выходящие непосредственно в днище долины р. Мзымта сформировались в период проведения строительных работ до 2014 г. Их формирование обусловлено катастрофическим размывом складированного на террасовидной площадке грунта [Казаков и др., 2013]. В результате два селевых лотка образовали обширный участок с максимальной степенью оголения поверхности склона от древесной растительности. Ряд других селевых лотков сформировались справа и слева от этих центральных лотков. Они на всём или на большем своём протяжении являются достаточно узкими врезами в склоновый чехол под лесом. Поэтому кроны деревьев в основном закрывают их, и на космических снимках фрагментарно прослеживается направление основного вреза, фрагментарно видимого. Тем не менее, наличие конусов выноса у подножья склона позволяют чётко их идентифицировать. В тоже время в центральных лотках наиболее активно идут процессы выветривания коренных пород из-за большей контрастности дневных и ночных температур на открытых участках склона, незащищенных кронами деревьев. За период наблюдений с 2019 г. зафиксировано, по меньшей мере, два случая формирования достаточно крупных склоновых селей, один из которых сошёл в селевом лотке, расположенном слева от центральных селевых лотков. Селевым материалом в очередной раз была перегорожена автодорога, которая на этом участке не защищена противоселевыми сооружениями. Во втором случае скорее всего собственно сель сформировался только в нижней трети склона за счёт размыва борта русла, ранее прорезавшего селевой конус выноса (рис. 5 А, Б).

Особенностью проявления селевых процессов на участке проведения мониторинга является формирование небольших селей. Из-за их небольших размеров и мощности существенная часть селевого материала переоткадывается ближе к подножию склона, где уклоны ниже (рис. 5В). Об этом свидетельствует как выявленное в процессе наших мониторинговых наблюдений перераспределение и частичный вынос рыхлообломочного материала (рис. 4), так и отсутствие зарастания лотка. В отсутствие регулярного размыва зарастание рыхлообломочных толщ в данных климатических условиях происходит исключительно быстро. Примером может служить зарастание борта селевого лотка, расположенного справа от центральных селевых лотков, на которых проводится мониторинг (рис. 5Б).

Процессы формирования склоновых селей на левом борту долины р. Мзымта стимулируются за счёт того, что на значительной части верхние части их водосборов, расположенные выше автодороги, заасфальтированы или застроены, то есть коэффициент стока с этой части водосбора близок к 1. В результате при выпадении сильных ливней формируется мощный поверхностный сток, который в концентрированном виде стекает на крутую часть склона после прохождения дюкеров.

Помимо трёх метеостанций гидрометеослужбы, которые расположены на довольно большом удалении от участка мониторинга, на горнолыжном курорте существует сеть автоматических метеостанций, которые находятся на разных высотах (1400–2200 м), но при этом в секторе курорта, достаточно близком к участку наших наблюдений. Имеющиеся суточные данные наблюдений за слоем осадков за период 2013–2022 гг. свидетельствует о том, что ливни со слоем свыше 60 мм выпадают практически ежегодно и слой осадков на метеостанциях, расположенных на разных высотах, при их выпадении достаточно близок. Это позволяет предположить, что слой выпавших осадков практически такой же вплоть до днища долины р. Мзымта. Так как



на настоящий момент мы не располагаем данными о суточных осадках на автоматических метеостанциях за 2023 и 2024 гг., преждевременно проводить анализ влияния повторяемости сильных ливней на формирование селевых паводков разной мощности по отдельным годам и за весь период наблюдений, но предварительно следует отметить, что в период 2019–2022 гг. были зафиксированы осадки свыше 100 мм за сутки и свыше 200 мм за четыре дня. Можно предположить, что при этих дождях с высокой долей вероятностью формировался достаточно мощный поверхностный сток.

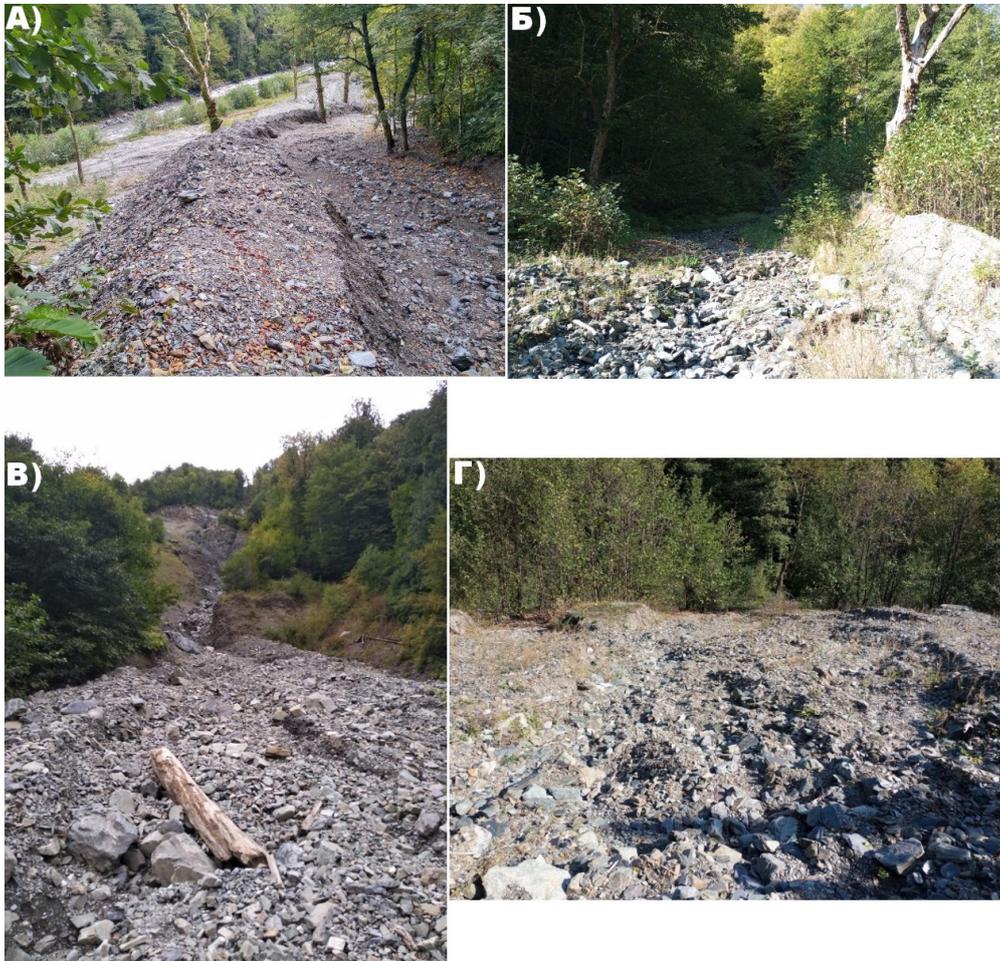


Рис. 5. Приустьевая часть селевого лотка, расположенного справа от центрального селевого лотка: А – в сентябре 2019 г.; Б – в сентябре 2023 г. Вид снизу вверх, засохшее дерево в левой части снимка, то же самое, что на рис. 5А в центре снимка. В – вид одного из селевых лотков на левом борту долины р. Мзымты; Г – прорезанный свежим врезом участок конуса выноса одного из селевых лотков

Заключение

Строительство горного кластера объектов Олимпиады 2014 г. в Большом Сочи стимулировало активизацию экзогенных процессов на склонах бассейна р. Мзымты. Скорости различных экзогенных процессов определяют мощность селей, формирующихся как на водотоках, являющихся притоками р. Мзымты, так и склонах. Склоновые сели в отличие от селей, формирующихся в постоянных водотоках, слабо исследованы, хотя в отдельных случаях при их формировании перемещаются значительные объёмы рыхлообломочного материала.

Результаты пятилетнего мониторинга развития селевого водосбора, расположенного на крутом левом борту долины р. Мзымта на участке ниже по течению от впадения р. Пслух, позволили оценить объёмы перемещаемого внутри склона и



вынесенного за его пределы рыхлообломного материала, которые составили 37,6–41,1 тыс. м³ и 28,5–34,5 тыс. м³ соответственно. Максимальные годовые объёмы выноса, составившие 10–11 тыс. м³ наблюдались в период с октября 2023 г. по конец сентября 2024 г. Суммарный слой денудации с безлесной части водосборов селевых лотков за пять лет оценивается в 90–100 см.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 25-17-00143 (обработка и анализ данных съёмки с использованием БПЛА) и мегагранта Правительства Российской Федерации, реализуемого в рамках Соглашения № 075-15-2025-008 от 27.02 2025 (сбор и обработка гидрометеорологических данных, обсуждение результатов).

Список литературы

- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Геологическая карта дочетвертичных образований. Кавказская серия. Масштаб 1:200 000. Лист К-37-V / под ред. Н.И. Пруцкого. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2002. – 1 л.
- Ефремов Ю.В., Чернявский А.С., Николайчук А.В., Шуляков Д.Ю. Селевые процессы на Западном и Северо-Западном Кавказе // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды Международной конференции. – Пятигорск: Институт «Севкавгипроводхоз», 2008. – С. 147–150.
- 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. Геоэкология. – 2013. – № 6. – С. 516–529.
- Куксина Л.В., Голосов В.Н., Промыхова Е.В. Причины возникновения и география внезапных ливневых паводков // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2020. – № 1. – С. 11–22.
- Харченко С.В. Новый алгоритм корегистрации цифровых моделей высот (IEM) // Геоморфология и палеогеография. – 2024. – Т. 55, № 4. – С. 192–204.
- Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И. Количественная оценка факторов активизации селей в 2006–2019 гг. на склоне хребта Аигба (Западный Кавказ) // География и природные ресурсы. – 2021. – Т. 42, № 2. – С. 41–50.
- Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. – М.: Недра, 1980. – 296 с.
- 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 // Nat Hazards. – 2024. – Vol. 120. – P. 2847–2868.
- Kuksina L., Belyakova P., Golosov V. et al. Flash floods on the northern coast of the black sea: Formation and characteristics // International Journal of Sediment Research. – 2025. – Vol. 40, No. 1. – P. 192–207.
- Lastilla L., Belloni V., Ravanelli R., Crespi M. DSM generation from single and cross-sensor multi-view satellite images using the new Agisoft Metashape: The case studies of Trento and Matera (Italy) // Remote Sensing. – 2021. Vol. 13, No. 4. – 593.
- Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // Geomorphology. – 2012. – Vol. 179. – P. 300–314.
- NCALM-UH/CODEM [Electronic data]. Access way: <https://github.com/NCALM-UH/CODEM/tree/main> (access date: 09.09.2023).