

Научная статья
УДК 502/504:551:311.2
DOI 10.46698/VNC.2026.73.60.001

Мониторинг трансформации руслового рельефа при селевых воздействиях с применением беспилотных авиационных систем

Зайна Жамаловна Гергокова

Высокогорный геофизический институт, лаборатория геоэкологического мониторинга отдела экологических исследований, научный сотрудник, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, zayna.gerg@mail.ru

Аннотация. В работе показан опыт применения цифровых методов дистанционного зондирования для количественной оценки морфометрических последствий схода селевого потока в русле горной реки. По материалам разновременной БПЛА-аэрофотосъёмки участка р. Нальчик у с. Хасанья (до и после события) построены ортофотопланы и цифровые модели местности, на основе которых рассчитаны объёмы денудации и аккумуляции грунта. Вынос грунта в зоне разрушения автодороги составил 4,3 тыс. м³, накопление наносов выше автодорожного моста – 4,6 тыс. м³. Полученные данные интегрированы в базу расчётов для разработки инженерно-защитных мероприятий. Показана высокая эффективность метода для оперативного мониторинга горных территорий при минимальных затратах.

Ключевые слова: цифровая модель местности, ортофотоплан, селевой поток, русло, морфометрия, беспилотный летательный аппарат, дистанционное зондирование

Для цитирования: Гергокова З.Ж. Мониторинг трансформации руслового рельефа при селевых воздействиях с применением беспилотных авиационных систем // Вестник Владикавказского научного центра РАН. 2026. Т. 26. № 3. С. 89–93. DOI 10.46698/VNC.2026.73.60.001

Monitoring the transformation of channel relief under the influence of mudflows using unmanned aerial systems

Zayna Zh. Gergokova

High-mountain geophysical institute, Geoecological Monitoring Laboratory of the Environmental Research Department, Scientific Researcher, Russia, Nalchik, zayna.gerg@mail.ru

Abstract. The paper shows the experience of using digital remote sensing methods to quantify the morphometric consequences of a mudflow in a mountain riverbed. Based on multi-temporal UAV aerial surveys of a section of the Nalchik River near the village of Khasanya conducted before and after the event, orthophotomaps and digital terrain models (DTMs) were generated, on the basis of which the volumes of denudation and sediment accumulation were calculated. The volume of material in the area where the highway was destroyed amounted to 4.3 thousand m³, while sediment accumulation upstream of the highway bridge amounted to 4.6 thousand m³. The data obtained were integrated into a calculation database for developing engineering protection measures. The study demonstrates the high efficiency of the method for operational monitoring of mountainous areas at relatively low cost.

Keywords: digital terrain model, orthophoto plan, mudflow, riverbed, morphometry, unmanned aerial vehicle, remote sensing

For citation: Gergokova Z.Zh. Monitoring the transformation of channel relief under the influence of mudflows using unmanned aerial systems // Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center of RAS. 2026. Vol. 26. No.3. P. 89–93. DOI 10.46698/VNC.2026.73.60.001

Введение. Ввиду нарастания частоты экстремальных природных явлений мониторинг опасных геоморфологических процессов в руслах горных рек и на прилегающих склонах приобретает всё большее значение [1]. Выявление угроз, связанных с пространственно-временными трансформациями морфометрических параметров ландшафта, и количественная оценка их масштаба становятся возможными благодаря стремительному развитию технологий дистанционного зондирования и циф-

ровой обработки данных. Именно эти инструменты сегодня формируют основу комплексных методик изучения опасных процессов в горных районах [1, 2].

Опыт полевых исследований в горных регионах наглядно демонстрирует, что точность определения морфометрических изменений во времени и пространстве здесь существенно ниже, чем на равнинных территориях, – прежде всего из-за труднодоступности объектов [3]. Несмотря на значительное

расширение объема данных, получаемых из общедоступных спутниковых источников, авиационные обследования остаются связаны с высокими затратами и техническими сложностями [4]. В качестве наиболее эффективного способа наблюдения за потенциально опасными участками высокогорных ландшафтов выделяется применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сочетании с профильным программным обеспечением [5]. Формирование детализированных цифровых моделей рельефа, привязанных к единой системе координат, стало возможным именно благодаря систематическим высокоточным съёмкам с применением специализированных БПЛА [3, 6].

Данная работа опирается на результаты разновременных БПЛА-съёмок прибрежной зоны реки Нальчик. Возможности метода иллюстрируются на примере количественного анализа изменений морфометрии, обусловленных процессами отложения наносов и эрозии почв, вызванными селевыми потоками. Район исследований – пригород Нальчика, где последствия селя оказались особенно значимы для объектов дорожной инфраструктуры.

Целью представленной статьи является оценка возможностей метода дистанционного зондирования на основе данных БПЛА для мониторинга горных территорий, подверженных опасным русловым и склоновым процессам.

Предметом исследования послужил участок русловой части реки Нальчик в районе с. Хасанья (пригород г. Нальчика), где зафиксировано проявление интенсивного наносоводного селевого потока с низкой плотностью ($1\ 100\text{--}1\ 500\text{ кг/м}^3$) [1, 11], вызванного продолжительными ливневыми осадками. Для количественной оценки морфометрии селевого русла и прилегающих территорий применялся визуальный анализ признаков, выявленных на ортофотопланах, полученных в обеих временных

точках. Сопоставление материалов двух съёмок позволило зафиксировать характер и пространственный масштаб произошедших изменений.

Материалы и методы. Облеты проводились с применением БПЛА DJI Mavic Air 2 в два этапа: 29 мая – до прохождения потока и 1 июня – на следующий день после его схода; оба вылета проводились по одинаковому маршруту около 12:00 при высоте полёта 60–70 м. Нормативно-технические требования соблюдены: мониторинг отдельно расположенных объектов – ГОСТ Р 70611-2022; картографическая обработка результатов – ГОСТ Р 70174-2022. Площадь покрытия аэрофотосъёмкой составила 302 тыс. м². Обработка материалов осуществлена с помощью программного обеспечения Agisoft Metashape Professional; исходные данные – плотное облако точек. Классификация облака автоматическая. Итогом обоих полётов стали геопривязанные материалы, пригодные для непосредственного сравнительного анализа [1, 7].

Цифровые модели местности (ЦММ), представленные в виде растровых изображений, где высотное значение каждой ячейки отображается через соответствующий пиксель, строились на основе плотных облаков точек. Камеральная обработка включала этапы фототриангуляции и полуглобального сопоставления точек [2]. Более 104 миллионов точек в облаке данных позволили получить количественные морфометрические характеристики объекта до, после и в промежутках времени после селевого события. На ортофотопланах визуально выделялись два полигона русла, в которых прослеживались существенные ландшафтные трансформации, способствовавшие развитию чрезвычайных ситуаций. Объёмы грунта, смытого вследствие разрушения автодорожного полотна, а также отложенных наносов, рассчитывались для каждого участка посредством аппроксимации плоскостью ЦММ,

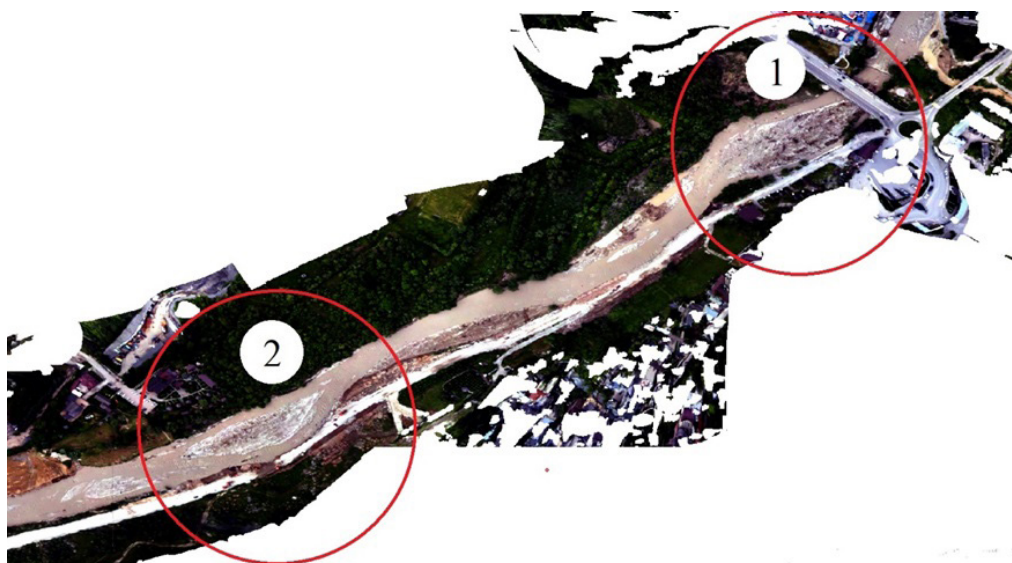


Рис. 1. Ортофотоплан исследуемого сектора русла р. Нальчик после прохождения селевого потока:

1 – сегмент русла с селевыми отложениями; 2 – сегмент русла с участком разрушенной потоком автодороги

построенной на основе высотных значений ячеек, расположенных в зоне, не подвергшейся селевому воздействию. Автоматическое выделение зоны аппроксимации базировалось на максимальных разницах высот между соседними ячейками в пределах контура, ограниченного линией инструмента.

Использование БПЛА любительского класса, в частности DJI Mavic Air 2, сопряжено с рядом методических ограничений: аппаратные и программные особенности платформы приводят к дисторсионным искажениям, снижающим точность съёмки и затрудняющим формирование стереопар. Наличие шумов, обусловленных растительным покровом и тенями, усложняло фотограмметрическую обработку, что приводило к ошибкам в моделировании рельефа и искажениям в расчетных параметрах [4, 8, 10]. Для коррекции искажений фотоматериалы подвергались обработке в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional, где цифровая фотограмметрическая коррекция устраняла искажения, вызванные особенностями рельефа и углами съёмки, посредством регулировок наклона, масштабирования и компенсации рельефа [2].

Применяемая фильтрация, основанная на замене яркостных значений пикселей линейными сглаживающими фильтрами, снижала шумы и помехи, вызванные растительностью и тенями, уменьшая резкие перепады яркости. В результате комплекса применённых корректирующих процедур удалось добиться относительной погрешности в пределах 1,5–4 %, что является приемлемым для задач мониторинга данного масштаба.

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 представлены результаты аэрофотосъёмки, выполненной после схода наносоводного селя, в виде сводного ортофотоплана русловой части реки Нальчик; план охватывает оба полигона, по которым производились расчёты объёмов.

Сопоставление ЦММ, в зоне разрушения автодороги (полигон 2, рис. 1), до и после события показало следующее: объём пространства под аппроксимирующей плоскостью вырос с 17,8 до 22,1 тыс. м³, то есть увеличился на 4,3 тыс. м³. Это свидетельствует о размыве и выносе грунта, что послужило причиной повреждения грунтовой автодороги (см. рис. 2). Зафиксированный вынос материала



Рис. 2. Участок обрушения обьездной автодороги селевым потоком:

1 – по материалам аэрофотосъёмки до прохождения селя; 2 – по материалам аэрофотосъёмки после прохождения селя



Рис. 3. Территория русла в зоне, прилегающей к автодорожному мосту:

1 – по материалам аэрофотосъёмки до прохождения селя; 2 – по материалам аэрофотосъёмки после прохождения селя

непосредственно определил характер и степень разрушения дорожного полотна.

На участке выше автодорожного моста (полигон 1, *рис. 1*) зафиксирована интенсивная аккумуляция принесённого потоком материала. Объем отложенный под базовой плоскостью до события составлял 11,6 тыс. кубометров, но после воздействия селевого потока уменьшился до 7 тыс. кубометров. Разница в объеме, равная 4,6 тыс. кубометров, отражает количество осевшего материала над уровнем воды, принесенного селевым потоком (см. *рис. 3*). Аккумуляция подобного объема наносов у опорных конструкций моста фиксируется как потенциально опасный фактор при последующих паводковых событиях [1, 5].

Наносы, накопленные у моста, достигают критического объема. При повторном прохождении селевого потока они станут источником дополнительного обломочного материала и существенно усилят гидродинамическую нагрузку на опорные конструкции. На рассматриваемом участке отложение наносов достигает критического уровня, что при будущих селевых потоках приведет к образованию селеобразующего вещества и значительно усилит разрушительное воздействие на опорные конструкции автодорожного моста [6, 10]. Этот факт требует учёта при планировании мероприятий по защите инфраструктурного объекта [5, 7].

Необходимость продолжения мониторинговых наблюдений на данном участке подтверждается выявленной динамикой изменений. Для отслеживания дальнейших изменений русла реки Нальчик после наносоводного селя применяется серия съёмок, выполненных в различные периоды, с последующим анализом геоморфометрических данных, собранных в ходе этих наблюдений [9]. Накопление разновременных данных формирует основу для разработки прогностических моделей развития ситуации [10].

ВЫВОДЫ

Технологии ближнего дистанционного зондирования на основе данных БПЛА в сочетании со специализированными программными комплексами, как демонстрирует проведённое исследование, позволяют с высокой точностью документировать и количественно оценивать последствия опасных русловых процессов [1, 3]. В рамках работы применены алгоритмы и методы, обеспечивающие получение, обработку и комплексное использование данных аэрофотосъёмки [2]. Впервые для данного участка построены ортофотопланы и цифровые модели, отражающие состояние русла как до, так и после прохождения селевого потока [11]. Объем денудации прилегающей территории, включая разрушенный участок автодороги длиной свыше 70 м, оценён в 4,3 тыс. м³; накопление отложений выше автодорожного моста составило около 4,6 тыс. м³. Все полученные данные переданы в профильные организации и включены в базу расчётов для проектирования инженерно-защитных мероприятий [5].

Основным практическим результатом работы является подтверждение применимости метода для оперативного получения количественных морфометрических характеристик, необходимых при проектировании защитных сооружений [7]. Создание надежных предпосылок для прогнозирования масштабов негативного воздействия потенциально опасных природных явлений, а также для разработки адекватных мер реагирования и проектирования защитных конструкций базируется на количественных значениях морфометрических показателей [6, 10]. Сочетание оперативности, высокой точности и минимальных ресурсных затрат делает БПЛА-мониторинг незаменимым инструментом для регулярного контроля горных территорий, подверженных опасным русловым и склоновым процессам [3, 4, 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шерхов А.Х., Гергокова З.Ж., Акаев А.Р. Определение количественных значений параметров селепроявлений с использованием БПЛА // *Природообустройство*. 2024. № 2. С. 83–89.
2. Харченко С.В. Способ корегистрации цифровых моделей высот для получения гидрологически корректного представления земной поверхности // *Геоморфология и палеогеография*. 2023. Т. 54. № 3. С. 150–164.
3. Рыбченко А.А., Кадетова А.В., Козырева Е.А., Юрьев А.А. Опыт применения неспециализированных беспилотных летательных аппаратов для аэрофотосъёмки при исследованиях экзогенных геологических процессов // *Геодинамика и тектонофизика*. 2019. Т. 10. № 4. С. 1045–1058.
4. Мазеева О.А., Юрьев А.А., Бабичева В.А. БПЛА аэрофотосъёмка при мониторинговых исследованиях береговых геосистем Юга Иркутского амфитеатра. *Геодинамика и тектонофизика*. 2023. 14(6). С. 1–14. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-6-0734>
5. Wang T., Lu F., Shen P. Lidar-aided Channelized Debris Flow Numerical Modelling // *EGU General Assembly 2025*. Vienna, 2025. EGU25-7892.
6. Mitchell A., Zubrycky S., McSorley E., McDougall S., D'Arcy M. A multi-year record of topographic changes on debris-flow fans in south-western British Columbia, Canada // *E3S Web of Conferences*. 2023. pp. 03019.
7. Nenashev V.A., Afanasyeva V.I., Zalizhchuk A.A., Grigorov M.Y., Morozov A.V. Formation of three-dimensional terrain models based on lidar survey to identify structural changes in the earth's surface // *Труды МАИ*. 2023. № 131. С. 15.
8. Пархоменко Н.А., Нутманов А.А. Использование 3D модели для гидрологического анализа сельскохозяйственной территории по данным беспилотных летательных аппаратов // *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*. 2022. № 2 (29). С. 51–59.
9. Дьякова Г.С., Останин О.В., Горевачева А.А., Оленченко В.В. Исследование строения гляциально-мерзлотного каменного образования в долине р. Джело (Центральный Алтай) // *География и природопользование Сибири*. 2019. Вып. 26. С. 64–70.
10. Епифанцев И.С., Павлов С.В. Применение БПЛА для мониторинга опасных геологических процессов в горных районах // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2023. Т. 2. № 2. С. 211–218.
11. Гергокова З.Ж. Цифровые методы анализа развития русловых деформаций повышенной опасности // 8-я Международная конференция «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», 6–10 октября 2025 г., Тбилиси, Грузия. С. 152–157.

REFERENCES

1. Sherkhov A.Kh., Gergokova Z.Zh., Akaev A.R. Determination of quantitative values of mudflow parameters using UAVs // *Environmental management*. 2024. No. 2. pp. 83-89.
2. Kharchenko S.V. Method of co-registration of digital elevation models to obtain a hydrologically correct representation of the Earth's surface // *Geomorphology and paleogeography*. 2023. Vol. 54. No. 3. pp. 150-164.
3. Rybchenko A.A., Kadetova A.V., Kozyreva E.A., Yuryev A.A. The experience of using non-specialized unmanned aerial vehicles for aerial photography in the study of exogenous geological processes // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2019. Vol. 10. No. 4. pp. 1045-1058.
4. Mazaeva O.A., Yuriev A.A., Babicheva V.A. Aerial photography UAVs during monitoring studies of coastal geosystems in the South of the Irkutsk Amphitheater. *Geodynamics and tectonophysics*. 2023. 14(6). pp. 1-14. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-6-0734>
5. Wang T., Lu F., Shen P. Lidar-aided Channelized Debris Flow Numerical Modelling // *EGU General Assembly 2025*. – Vienna, 2025. – EGU25-7892.
6. Mitchell A., Zubrycky S., McSorley E., McDougall S., D'Arcy M. A multi-year record of topographic changes on debris-flow fans in south-western British Columbia, Canada // *E3S Web of Conferences*. 2023. pp. 03019.
7. Nenashev V.A., Afanasyeva V.I., Zalishchuk A.A., Grigorov M.Y., Morozov A.V. Formation of three-dimensional terrain models based on lidar survey to identify structural changes in the earth's surface // *Proceedings of MAY 2023*, No. 131, p. 15.
8. Parkhomenko N.A., Nutmanov A.A. The use of a 3D model for hydrological analysis of an agricultural territory based on data from unmanned aerial vehicles // *Electronic Scientific and Methodological Journal of Omsk State Agrarian University*. 2022. № 2 (29). pp. 51-59
9. Dyakova G.S., Ostanin O.V., Goreyavcheva A.A., Olenchenko V.V. Investigation of the structure of glacial-permafrost rock formations in the valley of the Dzhelo River (Central Altai) // *Geography and Environmental Management of Siberia*. 2019. Issue. 26. pp. 64-70.
10. Epifantsev I.S., Pavlov S.V. The use of UAVs for monitoring dangerous geological processes in mountainous areas // *Interexpo Geo-Siberia*. – 2023. Vol. 2. No. 2. pp. 211-218.
11. Gergokova Z.J. Digital methods for analyzing the development of channel deformations of increased danger // 8th International Conference "Mudflows: disasters, risk, forecast, protection", October 6-10, 2025, Tbilisi, Georgia. pp. 152-157.

