ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.435.62:631.4:581.5(470.6)
DOI: 10.46698/VNC.2026.54.33.001

Оригинальная статья

Влияние селевых процессов на трансформацию почвенно-растительного покрова Центрального Кавказа

С.О. Курашкин[1,2], В.В. Торопцев[2], О.С. Пучкова[2], Н.А. Ягудаева[2], Ю.С. Кузнецова[3]

[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: kurashkin@emtc.ru;

[2] Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, e-mail: toroptsev@rgau-msha.ru, puchkova@rgau-msha.ru, n.yagudaeva@rgau-msha.ru;

[3] Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353918, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: julx@bk.ru

Статья поступила: 31.07.2026, доработана: 10.09.2026, принята к публикации: 18.09.2026

Резюме: Актуальность работы. Селевые процессы Центрального Кавказа быстро трансформируют горные ландшафты, нарушая почвенный профиль, растительный покров, микрорельеф и условия поверхностного стока. При этом растительность может восстанавливаться быстрее почвы, что осложняет оценку состояния нарушенных территорий. **Цель исследования.** Оценить изменения почвенно-растительного покрова под влиянием селей с разделением территории на зоны сноса, транзита и аккумуляции. **Методы исследования.** Использованы полевые описания селевых участков, почвенные разрезы, послойный отбор проб, геоботанические наблюдения, материалы БПЛА и данные дистанционного зондирования. Анализ включал оценку мощности наносов, сохранности гумусового горизонта, гранулометрического состава, каменистости, доли открытого минерального субстрата, проективного покрытия, видового состава растительности, NDVI и положения участка относительно селевого русла. **Результаты.** Установлено, что в зоне сноса преобладают размыв, удаление гумусового горизонта на 15–80 см и резкое снижение проективного покрытия с 70–90% до 5–18%. В транзитной зоне чередуются промоины, наносы и фрагменты дернины, а в зоне аккумуляции прежняя поверхность перекрывается отложениями мощностью до 1,2–1,5 м. Растительность частично восстанавливается за 1–8 лет, тогда как почвенный профиль сохраняет признаки нарушения 20–50 лет и более. Результаты применимы для геоэкологического мониторинга и картирования селевой опасности.

Ключевые слова: селевые процессы, Центральный Кавказ, почвенно-растительный покров, геоэкологический мониторинг, селевые отложения, гумусовый горизонт, растительные сукцессии, горные ландшафты.

Для цитирования: Курашкин С.О., Торопцев В.В., Пучкова О.С., Ягудаева Н.А., Кузнецова Ю.С. Влияние селевых процессов на трансформацию почвенно-растительного покрова Центрального Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): 198–211. DOI: 10.46698/VNC.2026.54.33.001

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2026.54.33.001

Original paper

The influence of debris-flow processes on the transformation of soil and vegetation cover of the Central Caucasus

S.O. Kurashkin[1,2], V.V. Toroptsev[2], O.S. Puchkova[2], N.A. Yagudaeva[2], Yu.S. Kuznetsova[3]

[1] Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russian Federation, e-mail: kurashkin@emtc.ru;

[2] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation, e-mail: toroptsev@rgau-msha.ru, puchkova@rgau-msha.ru, n.yagudaeva@rgau-msha.ru;

[3] Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: julx@bk.ru

Received: 31.07.2026, revised: 10.09.2026, accepted: 18.09.2026

Abstract: Relevance. Debris-flow processes in the Central Caucasus rapidly transform mountain landscapes by disturbing the soil profile, vegetation cover, microrelief, and surface runoff conditions. Vegetation may recover faster than soil, which complicates the assessment of disturbed areas. **Aim.** The study aims to assess changes in soil and vegetation cover under the influence of debris flows, with division of the territory into erosion, transit, and accumulation zones. **Methods.** Field descriptions of debris-flow sites, soil profiles, layer-by-layer sampling, geobotanical observations, UAV materials, and remote sensing data were used. The analysis included deposit thickness, preservation of the humus horizon, granulometric composition, stoniness, share of exposed mineral substrate, vegetation cover, species composition, NDVI values, and site position relative to the debris-flow channel. **Results.** It was established that erosion zones are dominated by washout, removal of the humus horizon by 15–80 cm, and a sharp decrease in vegetation cover from 70–90% to 5–18%. In transit zones, gullies, deposits, and turf fragments alternate, whereas in accumulation zones the former surface is buried under deposits up to 1.2–1.5 m thick. Vegetation partially recovers within 1–8 years, while the soil profile retains disturbance features for 20–50 years or longer. The results are applicable to geoecological monitoring and debris-flow hazard mapping.

Keywords: debris flow processes, Central Caucasus, soil and vegetation cover, geoecological monitoring, debris flow deposits, humus horizon, vegetation succession, mountain landscapes.

For citation: Kurashkin S.O., Toroptsev V.V., Puchkova O.S., Yagudaeva N.A., Kuznetsova Yu.S. The influence of debris-flow processes on the transformation of soil and vegetation cover of the Central Caucasus. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): 198–211. DOI: 10.46698/VNC.2026.54.33.001

Введение

Селевые процессы относятся к наиболее сложным природным явлениям Центрального Кавказа. Их развитие связано с крутыми склонами, высокой расчлененностью рельефа, геологическим строением, климатическими колебаниями, снеготаянием, ливневыми осадками и изменением состояния ледниково-склоновых систем. В последние десятилетия селевые потоки все чаще рассматривают не только как угрозу инженерным сооружениям и населению, но и как механизм быстрой перестройки горных ландшафтов [Гакаев, Пуреховский, 2025]. Особенно заметно это в районах с выраженной высотной поясностью (рис. 1), где почвенно-растительный покров находится в неустойчивом равновесии с рельефом, водным режимом и литогенной основой [Fomina et al., 2016].

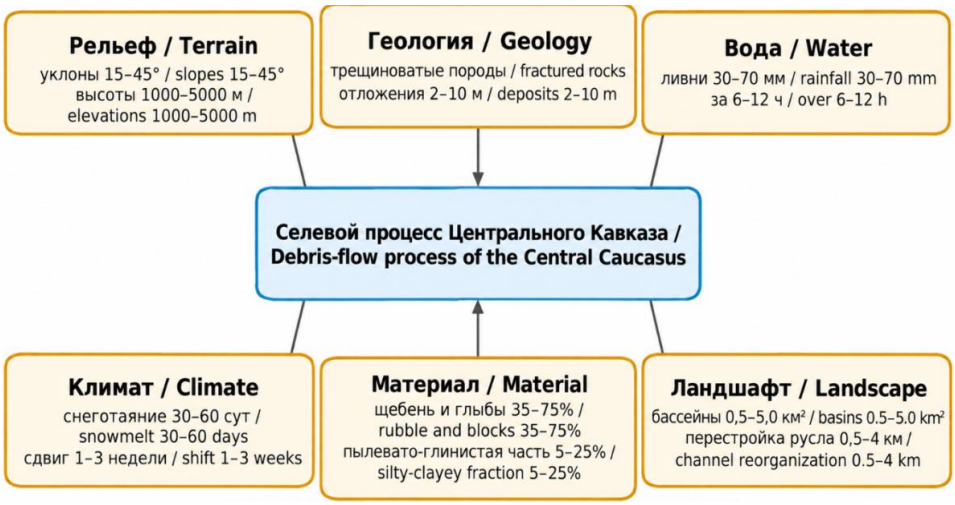

Рис. 1. Основные факторы формирования селевых процессов на Центральном Кавказе: рельеф, геологическое строение, водное питание, климатические изменения, состав рыхлого материала и особенности горного ландшафта /

Fig. 1. Main factors controlling debris-flow formation in the Central Caucasus: relief, geological structure, water input, climatic changes, composition of loose deposits, and mountain landscape characteristics

Исследование последствий селей для почвы и растительности важно потому, что именно верхние 10–30 см грунта, травяной ярус высотой 15–70 см и корневые системы первыми воспринимают удар движущейся массы. Один эпизод длительностью от 20–40 минут до 2–6 часов способен нарушить участок протяженностью 1–5 км. При этом изменения включают смыв гумусового слоя мощностью 5–25 см, срезание горизонтов на глубину 0,3–1,2 м, погребение прежней поверхности наносами 20–300 см и перемешивание материала от частиц менее 0,01 мм до глыб диаметром 1–3 м [Pospehov, Savon-Vaciano, 2024].

На наиболее нарушенных участках проективное покрытие растительности уменьшается с 70–95% до 0–10%, а число обычных видов сокращается в 3–7 раз. Внешнее зарастание может начаться уже через 2–4 года, но это не означает полного восстановления природного комплекса. Травянистая растительность местами возвращается за 1–3 сезона (рис. 2), кустарниковый ярус формируется примерно за 8–15 лет, а восстановление гумусового горизонта мощностью 3–7 см может занимать 20–50 лет и более [Татаринцев и др., 2026].

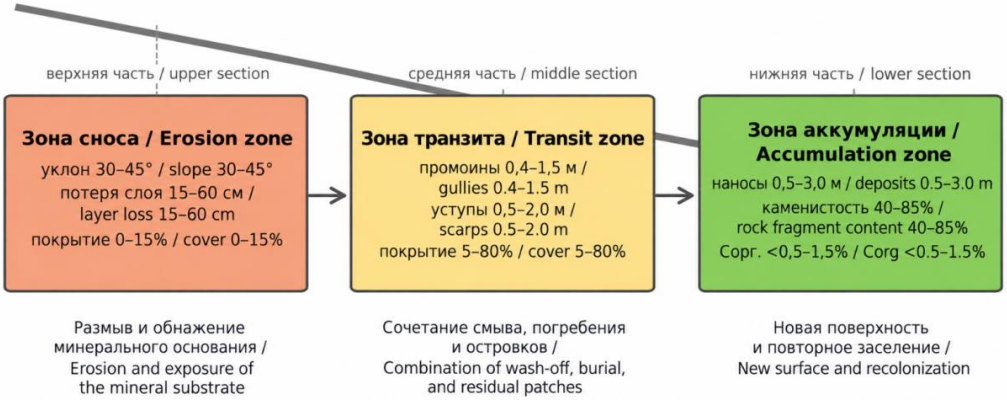

Рис. 2. Различие последствий селевого потока в зонах сноса, транзита и аккумуляции: в верхней части бассейна преобладают размыв и потеря почвенного слоя, в средней части сочетаются смыв, погребение и сохранение отдельных растительных островков, а в нижней части формируются новые аккумулятивные поверхности /

Fig. 2. Differences in debris-flow impacts within the erosion, transit, and accumulation zones: erosion and soil-layer loss dominate in the upper basin, washout, burial, and preserved vegetation patches occur in the middle part, while new depositional surfaces form in the lower accumulation zone

Для Центрального Кавказа эта проблема особенно выражена: на расстоянии 10–30 км могут сочетаться высоты 1000–5000 м, уклоны 15–45° и сильно расчлененный рельеф [Керимов и др., 2023]. Моренные, делювиальные, коллювиальные и пролювиальные отложения мощностью 2–10 м часто содержат 35–75% щебня и глыб, 15–40% песчаного материала и 5–25% пылевато-глинистой части [Yelemessov et al., 2026]. При 30–70 мм осадков за 6–12 часов и увлажнении слоя 0,4–1,0 м вероятность потери устойчивости возрастает. Климатические изменения, включая сокращение ледников, смещение снеготаяния и учащение ливней, дополнительно меняют водное питание бассейнов [Malozyomov et al., 2024]. В результате сели перестраивают русла на 0,5–4 км и переносят тысячи кубометров наносов [Yadav, Verma, 2025]. Большинство исследований посвящено происхождению селей, скорости потока, защитным сооружениям, картированию опасных зон и рискам для инфраструктуры. Однако состояние природных комплексов через 1, 10 или 30 лет после события изучено слабее [Поспехов и др., 2025]. Между тем почва и растительность могут указывать на силу и возраст селя: погребенный гумусовый горизонт на глубине 20–80 см, смена суглинков галечно-валунным материалом, скелетность 60–90% и чередование заросших и открытых площадок 5–100 м² [Ospanova et al., 2025]. Сопоставление почвенных разрезов, геоботанических площадок и поперечных профилей помогает выявлять старые наносы даже там (рис. 3), где они почти не различимы визуально [Zaalishvili et al., 2024].

При полевом обследовании необходимо разделять зоны сноса, транзита и аккумуляции, поскольку один и тот же селевой поток формирует в них разные последствия. В зоне сноса при уклонах 30–45° преобладают размыв, срезание горизонтов и обнажение минерального основания; мощность утраченного слоя может достигать 15–60 см, содержание органического вещества уменьшается в 2–5 раз, а растительное покрытие падает до 0–15% [Толеубекова и др., 2025]. В транзитной полосе на отрезке 100–300 м могут сочетаться промоины глубиной 0,4–1,5 м, погребенные дернины, уступы 0,5–2,0 м и линзы наносов мощностью 10–40 см. В зоне аккумуляции формируются новые поверхности с наносами 0,5–3,0 м, каменистостью 40–85% и содержанием органического углерода менее 0,5–1,5% в первые годы [Азаров и др., 2024].

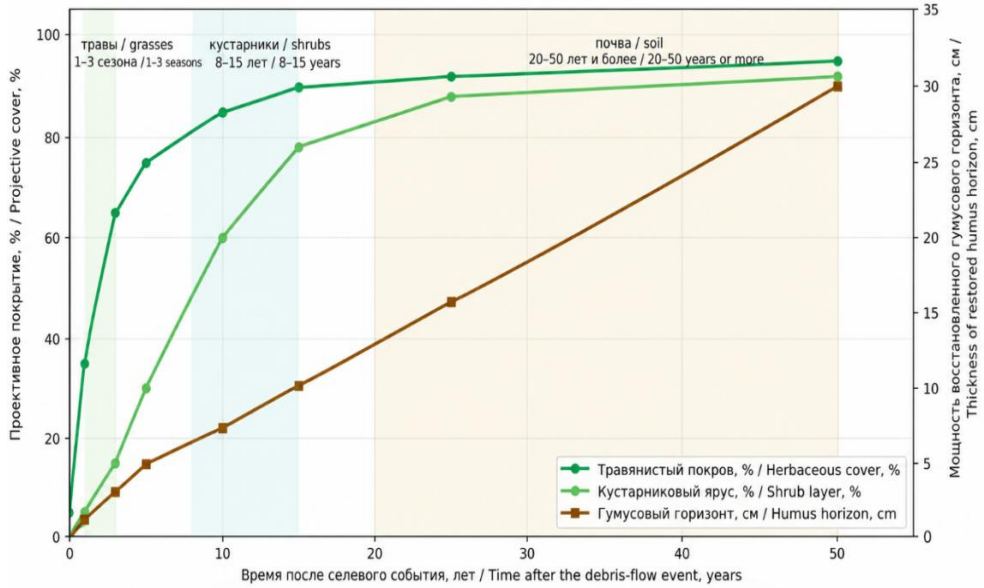

Рис. 3. Динамика восстановления растительности и почвенного профиля после селевого события: травянистый покров частично восстанавливается уже в течение 1–3 сезонов, кустарниковый ярус формируется примерно за 8–15 лет, тогда как накопление гумусового горизонта продолжается 20–50 лет и более /

Fig. 3. Recovery dynamics of vegetation cover and soil profile after a debris-flow event: herbaceous vegetation partially recovers within 1–3 seasons, the shrub layer develops over approximately 8–15 years, whereas humus horizon accumulation continues for 20–50 years or more

Цель работы состоит в оценке изменений почвенно-растительного покрова Центрального Кавказа под влиянием селевых процессов с разделением территории минимум на три функциональные зоны, учетом 4–6 характеристик отложений и определением степени восстановления по почвенным и геоботаническим признакам. Научная значимость исследования связана с возможностью проследить изменения за 1–5, 10–20 и более чем 30 лет, а практическое значение – с применением результатов при геоэкологическом мониторинге, составлении карт масштаба 1:10 000–1:50 000 и выборе восстановительных мероприятий для участков площадью от 0,1 га до нескольких десятков гектаров.

Методы и материалы

В качестве объектов наблюдения были выбраны участки Центрального Кавказа, где за последние 5–15 лет происходили селевые события разной силы и повторяемости. Обследование охватывало долины водотоков и склоновые поверхности на высотах примерно 1200–2800 м, где хорошо прослеживаются размыв почвы, погребение прежних горизонтов и повреждение растительности.

Основное внимание уделялось зонам зарождения и сноса, транзитным руслам и участкам аккумуляции обломочного материала. Для сравнения на расстоянии 100–500 м от границ селевых тел подбирались фоновые площадки, сходные по высоте, крутизне, экспозиции, геологическому строению, увлажнению и исходной растительности. Полевые маршруты прокладывались вдоль и поперек селевых долин, что позволяло фиксировать не только общий масштаб нарушения, но и различия между сносом, переносом и накоплением материала (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Параметры полевого обследования селевых участков Центрального Кавказа / Parameters of the field survey of mudflow areas in the Central Caucasus

Направление работ / Area of work	Принятый подход / Adopted approach	Основные параметры / Main parameters	Назначение / Purpose
Район наблюдений / Observation area	Участки Центрального Кавказа с современными селевыми проявлениями / Areas of the Central Caucasus with recent debris-flow manifestations	События за последние 5–15 лет / Events over the last 5–15 years	Анализ последствий селей разной давности / Analysis of the consequences of debris flows of different ages
Высотный диапазон / Elevation range	Долины водотоков и склоновые поверхности / Stream valleys and slope surfaces	1200–2800 м / 1200–2800 m	Охват зон с выраженными нарушениями почвы и растительности / Coverage of zones with pronounced soil and vegetation disturbance
Функциональные зоны / Functional zones	Выделяли зоны сноса, транзита и аккумуляции / Erosion, transit, and accumulation zones were identified	Минимум 3 зоны на профиль / At least 3 zones per profile	Раздельная оценка типов воздействия / Separate assessment of impact types
Фоновые площадки / Background plots	Подбирали вне границ селевых тел / Selected outside the boundaries of debris-flow bodies	100–500 м от нарушенных участков / 100–500 m from disturbed areas	Сравнение с ненарушенными природными комплексами / Comparison with undisturbed natural complexes
Критерии подбора фона / Criteria for background selection	Учитывали сходные природные условия / Similar natural conditions were considered	4–6 параметров: высота, уклон, экспозиция, геология, увлажнение, растительность / 4–6 parameters: elevation, slope, aspect, geology, moisture, vegetation	Снижение ошибки при сравнении / Reduction of comparison error
Полевые профили / Field profiles	Маршруты вдоль и поперек долин / Routes along and across valleys	Длина 0,8–4,5 км; перепад 150–650 м / Length 0.8–4.5 km; elevation difference 150–650 m	Выявление пространственной структуры нарушений / Identification of the spatial structure of disturbances
Точки описания / Description points	Фиксировали координаты, высоту, уклон, экспозицию, мощность наносов / Coordinates, elevation, slope, aspect, and deposit thickness were recorded	Не менее 5–12 точек в каждой зоне / At least 5–12 points in each zone	Детализация различий внутри селевого бассейна / Detailed characterization of differences within the debris-flow basin
Русловые формы / Channel forms	Измеряли ширину русла и глубину врезов / Channel width and incision depth were measured	Ширина 3–70 м; врезы 0,4–2,8 м / Width 3–70 m; incisions 0.4–2.8 m	Оценка эрозионного воздействия / Assessment of erosional impact
Открытый минеральный грунт / Exposed mineral soil	Определяли долю обнаженной поверхности / The proportion of exposed surface was determined	5–95%	Характеристика степени нарушения покрова / Characterization of the degree of cover disturbance

Направление работ / Area of work	Принятый подход / Adopted approach	Основные параметры / Main parameters	Назначение / Purpose
Сохранность профиля / Profile preservation	Выделяли полный, срезанный, перемешанный или погребенный профиль / Complete, truncated, mixed, or buried profiles were identified	Наносы 10, 25, 50 и >100 см / Deposits of 10, 25, 50, and >100 cm	Разделение типов почвенной трансформации / Differentiation of soil transformation types
Координатная привязка / Coordinate referencing	Использовали Garmin GPSMAP 64s и EFT M3 GNSS / Garmin GPSMAP 64s and EFT M3 GNSS were used	Точность 3–5 м; повтор 2–3 раза в ущельях / Accuracy 3–5 m; repeated 2–3 times in gorges	Пространственная фиксация точек и профилей / Spatial recording of points and profiles
БПЛА-съемка / UAV survey	Применяли DJI Mavic 3 Enterprise / DJI Mavic 3 Enterprise was used	Высота 80–120 м; скорость 5–9 м/с / Altitude 80–120 m; speed 5–9 m/s	Получение ортофотопланов и моделей поверхности / Acquisition of orthophotomaps and surface models
Параметры съемки / Survey parameters	Поддерживали перекрытие кадров / Image overlap was maintained	Продольное 75–80%; поперечное 65–70% / Longitudinal 75–80%; lateral 65–70%	Повышение качества 3D-модели / Improvement of 3D model quality

Почвенные пробы отбирались послойно. На каждой площадке исследовались интервалы 0–10 и 10–20 см, а при сохраненном профиле закладывался разрез глубиной 40–50 см. В зонах аккумуляции отдельно изучали верхний селевой слой и погребенный гумусовый горизонт, если он прослеживался как непрерывная темная полоса. Растительность оценивали на площадках 10×10 м, а при наличии древесного яруса размер учетной территории увеличивали до 20×20 м.

Дистанционная часть исследования включала материалы Sentinel-2 MSI и Landsat 8/9 OLI. Для каждого бассейна подбирались снимки до и после селевого события, желательно в близкие календарные сроки и при облачности не более 5–15% (табл. 2). По снимкам рассчитывали NDVI, выделяли нарушенные поверхности и сопоставляли результаты с ортофотопланами, полевыми маршрутами и цифровой моделью рельефа.

Таблица 2 / Table 2

Лабораторная, геоботаническая, дистанционная и статистическая обработка материалов / Laboratory, geobotanical, remote and statistical processing of materials

Направление анализа / Area of analysis	Методика / оборудование / Methodology / equipment	Численные параметры / Numerical parameters	Что оценивалось / What was assessed
Почвенные интервалы / Soil intervals	Послойный отбор материала / Layer-by-layer material sampling	0–10, 10–20 см; разрез 40–50 см / 0–10, 10–20 cm; section 40–50 cm	Изменение верхней части профиля / Changes in the upper part of the profile
Горизонты в разрезе / Horizons in the section	Выделение слоев по цвету, плотности, влажности и каменистости / Identification of layers by color, density, moisture, and stoniness	2–4 горизонта / 2–4 horizons	Сохранность или перемешивание профиля / Preservation or mixing of the profile
Зона аккумуляции / Accumulation zone	Раздельный отбор наносов и погребенной почвы / Separate sampling of deposits and buried soil	Наносы 15–80 см; погребенный горизонт 2–6 см / Deposits 15–80 cm; buried horizon 2–6 cm	Различение нового селевого материала и старой почвы / Differentiation of new debris-flow material and old soil

Направление анализа / Area of analysis	Методика / оборудование / Methodology / equipment	Численные параметры / Numerical parameters	Что оценивалось / What was assessed
Объединенная проба / Composite sample	Смешивание частных навесок / Mixing of individual subsamples	0,8–1,2 кг; 4–6 навесок; расстояние 2–8 м / 0.8–1.2 kg; 4–6 subsamples; distance 2–8 m	Снижение влияния случайных обломков / Reduction of the influence of random fragments
Подготовка проб / Sample preparation	Сушка, удаление корней и крупных включений, просев / Drying, removal of roots and large inclusions, sieving	40–45 °C; 24–72 ч; фракции >10–20 мм; сито 1 мм / 40–45 °C; 24–72 h; fractions >10–20 mm; 1 mm sieve	Получение однородного материала для анализа / Obtaining homogeneous material for analysis
Гранулометрия / Particle-size analysis	Ситовой и ареометрический методы / Sieve and hydrometer methods	5–7 размерных классов; повтор 2–3 раза / 5–7 size classes; repeated 2–3 times	Содержание песчаных, пылеватых, глинистых и каменистых фракций / Content of sandy, silty, clayey, and stony fractions
Контроль измерений / Measurement control	Повтор анализа при расхождениях / Repeated analysis in case of discrepancies	Более 5–7% / More than 5–7%	Проверка устойчивости лабораторных данных / Verification of laboratory data stability
Органическое вещество / Organic matter	Потеря массы после прокаливания, SNOL 8.2/1100 / Loss on ignition, SNOL 8.2/1100	Навеска 3–7 г; 550 °C; 4 ч; охлаждение 30–45 мин / Sample weight 3–7 g; 550 °C; 4 h; cooling 30–45 min	Оценка содержания органического вещества / Assessment of organic matter content
pH / pH	Mettler Toledo FiveEasy / Mettler Toledo FiveEasy	Вытяжка 1:2,5; перемешивание 3–5 мин; выдержка 20–30 мин / Extract 1:2.5; mixing 3–5 min; settling 20–30 min	Реакция почвенной среды / Soil reaction
Влажность / Moisture content	Весовой метод, Binder ED 56 / Gravimetric method, Binder ED 56	105 °C; контроль через 4, 6 и 8 ч; точность 0,01–0,02 г / 105 °C; control after 4, 6, and 8 h; accuracy 0.01–0.02 g	Влагоемкость и состояние образца / Moisture capacity and sample condition
Весы / Scales	Ohaus Pioneer / Ohaus Pioneer	Точность 0,001 г / Accuracy 0.001 g	Контроль массы проб и навесок / Control of sample and subsample mass
Повторный контроль / Repeated control	Повторяли часть лабораторных анализов / Part of the laboratory analyses was repeated	10–15% проб; допуск 3–5% по влажности и 5–8% по органике / 10–15% of samples; tolerance 3–5% for moisture and 5–8% for organic matter	Оценка воспроизводимости / Assessment of reproducibility
Геоботанические площадки / Geobotanical plots	Учет травяного и кустарникового ярусов / Recording of herbaceous and shrub layers	10×10 м; при деревьях 20×20 м / 10×10 m; 20×20 m where trees are present	Проективное покрытие, число видов, высота травостоя / Projective cover, number of species, grass stand height
Повреждения растений / Plant damage	Полевое описание механических нарушений / Field description of mechanical damage	Обдир коры 0,2–1,5 м; корни 10–50 см / Bark stripping 0.2–1.5 m; roots 10–50 cm	Следы прохождения селевого потока / Traces of debris-flow passage

Направление анализа / Area of analysis	Методика / оборудование / Methodology / equipment	Численные параметры / Numerical parameters	Что оценивалось / What was assessed
Молодые наносы / Young deposits	Учет растений-закрепителей / Recording of stabilizing plants	Пятна мелкозема 0,1–1,0 м² через 2–4 сезона / Fine-earth patches of 0.1–1.0 m² after 2–4 seasons	Начальные стадии восстановления / Initial stages of recovery
Спутниковые данные / Satellite data	Sentinel-2 MSI и Landsat 8/9 OLI / Sentinel-2 MSI and Landsat 8/9 OLI	10 м и 30 м/пиксель / 10 m and 30 m/pixel	Изменение растительного покрова до и после события / Changes in vegetation cover before and after the event
NDVI / NDVI	Сравнение двух дат / Comparison of two dates	Снижение, например, 0,62–0,74 до 0,10–0,28 / Decrease, for example, from 0.62–0.74 to 0.10–0.28	Индикатор потери сомкнутой растительности / Indicator of closed vegetation loss
ГИС-обработка / GIS processing	QGIS 3.34 и ArcGIS Pro / QGIS 3.34 and ArcGIS Pro	WGS 84 / UTM zone 38N; 5–8 слоев / WGS 84 / UTM zone 38N; 5–8 layers	Карты русел, уклонов, высот, наносов, проб и NDVI / Maps of channels, slopes, elevations, deposits, samples, and NDVI
Ограничения спутников / Satellite limitations	Уточнение по БПЛА и полю / Refinement using UAV and field data	Landsat плохо различает <100–300 м²; Sentinel-2 ограничен при ширине 2–8 м / Landsat poorly distinguishes areas <100–300 m²; Sentinel-2 is limited at widths of 2–8 m	Проверка мелких нарушенных участков / Verification of small disturbed areas

Итоговая оценка строилась на объединении полевых описаний, анализа 2–4 почвенных горизонтов, геоботанических площадок, спутниковых индексов, фотографий, ортофотопланов и цифровых моделей поверхности. Такой порядок позволял оценить не только площадь нарушений, но и характер трансформации: размыв, перенос, погребение старой почвы или формирование новых аккумулятивных поверхностей. Это особенно важно для Центрального Кавказа, где внешне похожие участки могут отличаться по мощности наносов, сохранности гумусового горизонта и скорости восстановления растительности.

Результаты и обсуждение

Проведенные наблюдения показали, что селевые процессы в пределах исследованных территорий Центрального Кавказа изменяют почвенно-растительный покров неравномерно. На одних площадках нарушение ограничивалось слоем 8–15 см, на других поток срезал 60–80 см грунта, углублялся более чем на 1 м и полностью перестраивал поверхность. Характер изменений зависел от положения участка в зоне сноса, транзита или аккумуляции, крутизны склона, мощности наносов, гранулометрического состава и времени, прошедшего после последнего события. Наиболее сильные нарушения зафиксированы в зоне сноса, где поток удалял гумусовый горизонт и оставлял открытую щебнисто-глыбовую поверхность. Здесь проективное покрытие обычно не превышало 5–12%, а на отдельных площадках снижалось до 0–3%. Даже через несколько лет первые растения занимали не более 10–18% площади, поскольку восстановление ограничивали подвижность основания, дефицит гумуса, слабое удержание влаги и перегрев открытого субстрата.

Транзитные участки отличались максимальной мозаичностью. В пределах 100–400 м² одновременно встречались промоины, гряды грубых обломков, сохранившиеся дернины и линзы песчано-суглинистого материала. Поэтому даже при увеличении общего проективного покрытия до 40–55% структура покрова оставалась неоднородной: старые дернины, молодые заросли и полосы размыва восстанавливались с разной скоростью. В аккумулятивной зоне формировались наиболее мощные селевые толщи – от 25–40 см до 1,2–1,5 м. На молодых поверхностях прежний профиль обычно не прослеживался, а на более старых формах появлялся только тонкий гумусированный слой 2–8 см. Поэтому внешнее зарастание на 45–60% не означало полного восстановления: почвенный слой сохранял признаки раннего развития, высокую каменистость и резкую неоднородность по мощности мелкозема. Полученные данные показывают, что органическое вещество является одним из наиболее чувствительных показателей трансформации почвенного покрова (рис. 4). При этом снижение его содержания связано не только с механическим удалением гумусового горизонта, но и с разбавлением почвенной массы минеральным материалом селевого происхождения.

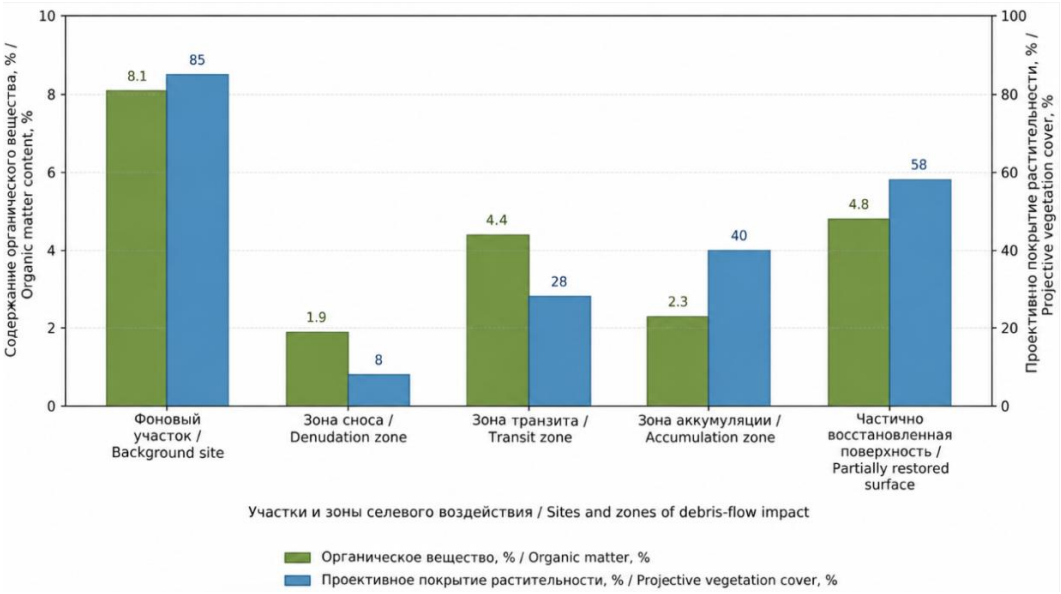

Рис. 4. Изменение содержания органического вещества в почве и проективного покрытия растительности в разных зонах селевого воздействия Центрального Кавказа /

Fig. 4. Changes in the content of organic matter in the soil and the projective cover of vegetation in different zones of mudflow impact in the Central Caucasus

Результаты лабораторного анализа подтвердили полевые наблюдения: селевые процессы резко меняют как почвенные свойства, так и структуру растительного покрова. На фоновых площадках содержание органического вещества в верхнем горизонте составляло в среднем 6,8–9,4%, а в отдельных луговых почвах достигало 10–12%. В зоне сноса этот показатель снижался до 1,1–2,6%, то есть примерно в 3–7 раз. На свежем аккумулятивном материале он обычно находился в пределах 1,5–3,0%, а в транзитной части занимал промежуточное положение – 3,2–5,7% (рис. 5).

Гранулометрический состав после прохождения селевого потока заметно изменялся. В зоне сноса доля скелетного материала крупнее 2 мм составляла 45–70%, а на наиболее промытых участках достигала 75–80%. Такие поверхности хуже удерживали влагу и затрудняли закрепление корней, поэтому даже близко расположенные участки одного возраста могли иметь разное проективное покрытие – от 10–15% до 45–60%.

Растительность восстанавливалась стадийно. Свежие нарушения фиксировались по снижению NDVI с фоновых 0,62–0,78 до 0,12–0,28; при частичном восстановлении значения повышались до 0,34–0,52. Однако для малых форм требовалась проверка по данным БПЛА и полевых наблюдений.

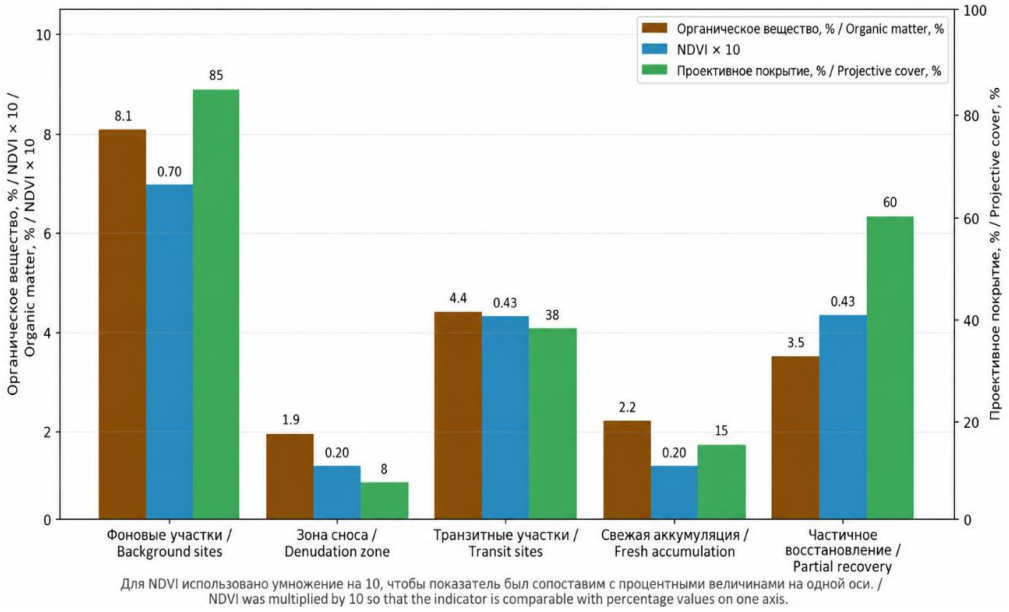

Рис. 5. Изменение органического вещества, NDVI и растительного покрытия на фоновых и селевых поверхностях Центрального Кавказа /

Fig. 5. Changes in organic matter, NDVI and vegetation cover on background and mudflow surfaces of the Central Caucasus

В аккумулятивной зоне выявлены погребенные гумусированные горизонты на глубине 30–70 см, перекрытые плохо сортированным селевым материалом. Это указывает на многоэтапное формирование конусов выноса. Даже при травяном покрытии 55–75% почвенный профиль может сохранять следы нарушений 20–50 лет и более.

Поэтому при геоэкологической оценке недостаточно учитывать только NDVI или визуальную долю зелени. Необходимо сопоставлять строение профиля, мощность наносов, гранулометрический состав, органическое вещество, микрорельеф, покрытие и видовую структуру растительности.

Представленная схема показывает (рис. 6), что трансформация почвенно-растительного покрова имеет выраженную продольную дифференциацию. В верхней части селевой системы преобладает разрушение почвенного профиля, в средней формируется мозаичное нарушение, а в нижней происходит погребение прежних почв и начало нового этапа почвообразования на селевых отложениях. Результаты исследования подтверждают значительную роль селей в современном преобразовании ландшафтов Центрального Кавказа. В пределах одной долины они формируют сочетание полностью разрушенных, частично сохранившихся и относительно стабильных участков, расстояние между которыми иногда составляет всего 10–100 м.

Наиболее сильные изменения связаны с зонами сноса и свежей аккумуляции. В зоне сноса поток удаляет почвенный слой мощностью 20–80 см и снижает проективное покрытие до 0–12%; в зоне аккумуляции прежняя поверхность перекрывается наносами толщиной 25–150 см. Транзитная зона отличается наиболее сложным строением: здесь чередуются промоины, гряды, молодые наносы и фрагменты дернины.

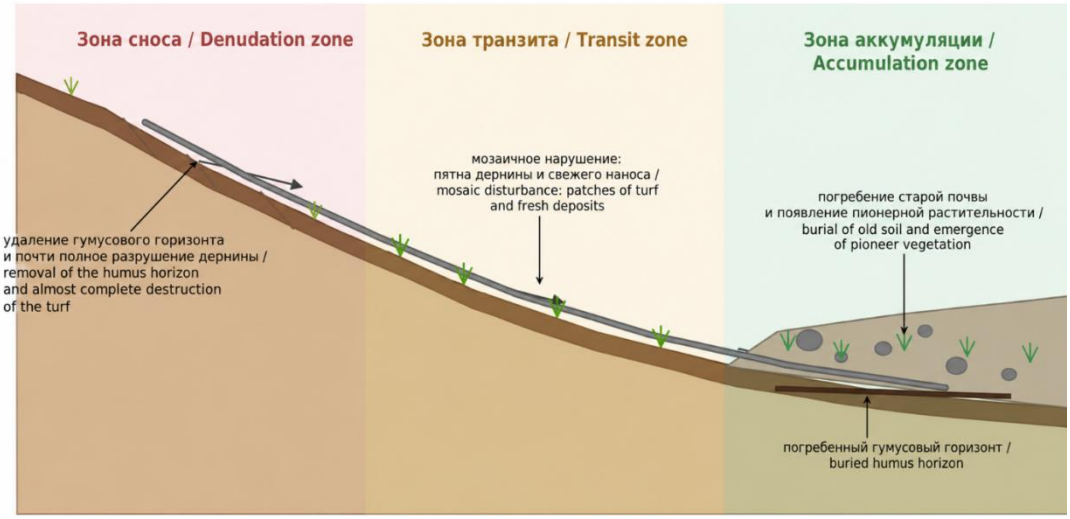

Рис. 6. Схема трансформации почвенно-растительного покрова в пределах селевой системы Центрального Кавказа /

Fig. 6. Scheme of transformation of soil and vegetation cover within the mudflow system of the Central Caucasus

Восстановление нарушенных участков имеет стадийный характер: сначала закрепляются единичные растения, затем формируются куртины площадью 1–10 м², после чего покрытие возрастает до 30–60%. Скорость восстановления определяется почвенными, литологическими, гидрологическими и геоморфологическими условиями. Поэтому состояние почвы и растительности можно использовать как показатель последствий селевого события, устойчивости ландшафта и вероятности повторного нарушения.

Выводы

На основании исследования установлено, что селевые процессы на Центральном Кавказе являются фактором длительной трансформации почвенно-растительного покрова. В зоне сноса преобладают разрушение почвенного профиля, удаление гумусового горизонта и снижение растительности; в зоне транзита сочетаются размыв, частичное погребение и сохранение дернины; в зоне аккумуляции формируются новые поверхности, перекрытые селевыми наносами.

После прохождения потока проективное покрытие снижается с 70–90% до 5–18%, а доля открытого минерального материала возрастает до 65–95%. В зоне сноса почва удаляется на 15–80 см, а на конусах выноса прежняя поверхность перекрывается наносами мощностью до 1,2–1,5 м. Важным признаком нарушения является снижение содержания органического вещества.

Растительность восстанавливается быстрее почвы: пионерные виды появляются через 1–3 года, травянистые пятна – через 4–8 лет, затем развивается кустарниковый ярус. Однако даже при зарастании 55–70% сообщества остаются мозаичными, а почвенный профиль сохраняет признаки нарушений значительно дольше. Для оценки последствий селей необходимо учитывать строение профиля, мощность наносов, гранулометрический состав, открытость поверхности, проективное покрытие, микрорельеф, NDVI и положение площадки относительно русла. Результаты важны для геоэкологического мониторинга, картирования селевой опасности и выбора площадок повторных наблюдений. Полное восстановление почвенного профиля может занимать 20–50 лет и более.

Литература

1. Азаров А.В., Сердюков А.С., Сказка В.В. Теоретические исследования возможности использования туннельных волн для мониторинга состояния массива горных пород вблизи подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155.

2. Гакаев Р.А., Пуреховский А.Ж. Пространственная структура горно-лесных ландшафтов Восточного Кавказа: соотношение природных и социальных факторов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 3. – С. 1482–1494. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1482-1494.

3. Керимов И.А., Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. Анализ сезонной и разногодичной динамики горных ландшафтов Северного Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 4. – С. 1090–1097. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1090-1097.

4. Поспехов Г.Б., Кутепов Ю.Ю., Кондакова В.Н. Мониторинг гидрогеомеханических процессов при складировании в отвал отходов углеобогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2. – С. 99–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_99.

5. Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М., Лебедева Л.В. Оценка экологической реакции пшеницы мягкой яровой (Triticum aestivum L.) на воздействие разных факторов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94.

6. Толеубекова Ж.З., Тиреуов К.М., Курмангалиева З.Н., Татаринцев В.Л. Экологическая реакция сельскохозяйственных культур на условия выращивания как основа управления устойчивостью агроландшафтов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 2. – С. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712.

7. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 86. – Art. No. 04065. DOI: 10.1051/matecconf/20168604065.

8. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks // Mathematics. – 2024. – Vol. 12. No. 3. – Art. No. 480. DOI: 10.3390/math12030480.

9. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2025. – Vol. 17. No. 4. – pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.

10. Pospehov G.B., Savon-Vaciano Yusmira. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba // MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2024. – No. 12-1. – pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_178.

11. Yadav M., Verma M.K. Examining the role of geospatial data and AI in conducting comprehensive forestry inventories and mapping to support sustainable forest management // Advances in Geographic Information Science. – 2025. – Part F5035. – pp. 215–235. DOI: 10.1007/978-3-032-03714-5_10.

12. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2026. – Vol. 2026. No. 3. – pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

13. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Y., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media // Geosciences. – 2024. – Vol. 14. No. 4. – Art. No. 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.

References

1. Azarov A.V., Serdyukov A.S., Skazka V.V. Theoretical investigation of usability of tunnel waves in rock mass monitoring near underground structures. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2024. No. 4. pp. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155. (In Russ.)

2. Gakaev R.A., Purekhovskii A.G. Spatial structure of mountain-forest landscapes of the Eastern Caucasus: relationship between natural and social factors. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025. Vol. 17. No. 3. pp. 1482–1494. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1482-1494. (In Russ.)

3. Kerimov I.A., Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. Analysis of seasonal and early dynamics of mountain landscapes of the North Caucasus. Sustainable Development of Mountain Territories. 2023. Vol. 15. No. 4. pp. 1090–1097. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1090-1097. (In Russ.)

4. Pospehov G.B., Kutepov Yu.Yu., Kondakova V.N. Monitoring of hydro-geomechanical processes in piling coal preparation refuse. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2025. No. 2. pp. 99–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_99. (In Russ.)

5. Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Lebedeva L.V. Assessment of the ecological reaction of soft spring wheat (Triticum aestivum L.) to the effects of various factors. Sustainable Development of Mountain Territories. 2026. Vol. 18. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94. (In Russ.)

6. Toleubekova Z.Z., Tireuov K.M., Kurmangalieva Z.N., Tatarintsev V.L. Ecological response of agricultural crops to growing conditions as a basis for managing the sustainability of agricultural landscapes. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025. Vol. 17. No. 2. pp. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712. (In Russ.)

7. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders. MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. Art. No. 04065. DOI: 10.1051/matecconf/20168604065.

8. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks. Mathematics. 2024. Vol. 12. No. 3. Art. No. 480. DOI: 10.3390/math12030480.

9. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025. Vol. 17. No. 4. pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.

10. Pospehov G.B., Savon-Vaciano Yusmira. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2024. No. 12-1. pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_178.

11. Yadav M., Verma M.K. Examining the role of geospatial data and AI in conducting comprehensive forestry inventories and mapping to support sustainable forest management. Advances in Geographic Information Science. 2025. Part F5035. pp. 215–235. DOI: 10.1007/978-3-032-03714-5_10.

12. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal.News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2026. Vol. 2026. No. 3. pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

13. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Martyushev N.V., Klyuev R.V., Kukartsev V.V., Konyukhov V.Y., Kononenko R.V., Gendon A.L., Oparina T.A. Radon emanation and dynamic processes in highly dispersive media. Geosciences. 2024. Vol. 14. No. 4. Art. No. 102. DOI: 10.3390/geosciences14040102.