

Моделирование водной эрозии на высокогорной территории с использованием уравнения RUSLE

Ф. В. Виноградов, Д. К. Алексеев, Л. Е. Дмитричева

Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург, 192007, Россия

E-mail: d.alekseev@rshu.ru

Цель текущего исследования состоит в оценке ежегодных потерь почвы в пределах Национального парка «Приэльбрусье». Для изучения основных факторов, способствующих эрозионным явлениям, использовалось пересмотренное универсальное уравнение потерь почвы RUSLE (*англ.* Revised Universal Soil Loss Equation), адаптированное с учётом физико-географических особенностей региона и данных дистанционного зондирования. Впервые на основе геоинформационного моделирования получено пространственное распределение эродируемости на изучаемой территории. Результаты исследования могут быть использованы для научного обоснования распределения земель сельскохозяйственного назначения с учётом рациональной нагрузки на территорию. При анализе учитывались исключительно факторы естественной эрозии. Среднегодовые потери почвы от водной эрозии определялись с учётом количества осадков и таяния снега. Средняя скорость эрозии составляет $6,81 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, при этом районы с незначительной степенью эрозии ($< 5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) охватывают 37 %, с умеренной (от 5 до $15 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) — 26 %, с очень сильной ($> 50 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) — около 20 % площади территории. Необходимы дальнейшие эмпирические исследования для стандартизации факторов, подходящих для местных условий. Степень эрозии на высотах, превышающих 3000 м, достигает самых больших значений, вероятно за счёт особых характеристик высокогорных почв и экстремальных условий окружающей среды. При расчёте потенциальной эрозии на таких высотах следует использовать специализированные методы, адаптированные для высокогорных регионов.

Ключевые слова: эрозия почв, изменение климата, эмпирическая модель, горные регионы, устойчивость, Кавказ

Одобрена к печати: 21.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-215-226

Введение

Эрозия почв представляет собой многогранный природно-антропогенный процесс, в котором переплетаются технологические, экономические, социальные и природные элементы. Её последствия включают деградацию почвы, загрязнение водных объектов, уменьшение биоразнообразия, нарушение структуры и снижение устойчивости ландшафтов к неблагоприятным воздействиям. Наиболее активно эти процессы проявляются в экономически развитых регионах, в районах со сложным рельефом и высокой интенсивностью осадков (Петрушина, 1987; Harden, 2001; Huber et al., 2013).

Борьба с эрозией почв осуществляется во всех развитых странах мира и требует надёжных научно обоснованных оценок по трём основным направлениям: географическому (пространственному), количественному (интенсивность эрозии и массы твёрдого стока) и временному. Оценка годовой скорости потерь почвы предоставляет информацию о зонах риска эрозии с указанием областей с высоким, средним и низким риском (Pandey et al., 2021). Моделирование и прогнозирование эрозионных процессов имеет долгую историю, насчитывающую более семи десятилетий (Alewell et al., 2019; Nearing et al., 2017). В настоящее время существует ряд моделей расчёта эрозионных потерь почвы: сельскохозяйственная модель загрязнения без точечных источников AGNPS (*англ.* Agricultural Non-Point-Source Pollution Model) (Young et al., 1987), проект прогнозирования водной эрозии WEPP (*англ.* Water Erosion Prediction Project) (Lafren et al., 1997), универсальное уравнение потерь почвы USLE (*англ.* Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier, Smith, 1978), пересмотренное универсаль-

ное уравнение потерь почвы RUSLE (*англ.* Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al., 1997) и модифицированное универсальное уравнение потерь почвы MUSLE (*англ.* Modified Universal Soil Loss Equation) (Williams, 1975). Данные модели частично реализуются в различных программных системах (Merchán et al., 2023; Stanchi et al., 2015). Они основаны на разделении водораздела на отдельные ячейки в рамках стандартизированной сетки и присвоении каждой ячейке определённого набора характеристик, таких как крутизна и длина склона, интенсивность эрозионно-опасных дождей и др. Полученный в результате моделирования картографический материал (карты) служат основой пространственного анализа территории, облегчают взаимодействие между разными административными, хозяйственными и другими структурами, связанными с охраной и рациональным природопользованием (эксплуатацией, использованием) этих земель (Pătru-Stupariu et al., 2020). Повышение осведомлённости заинтересованных сторон может способствовать разработке соответствующих стратегий управления, а обратная связь с заинтересованными сторонами, в свою очередь, может усовершенствовать существующие методологии оценки и поддержать создание специализированных инструментов для решения конкретных задач.

Цель исследования — количественно оценить степень деградации в результате потенциальной водной эрозии в Национальном парке «Приэльбрусье» по пересмотренному универсальному уравнению потерь почвы. Впервые на основе геоинформационного моделирования получено пространственное распределение эродированности почв на исследуемой территории. Результаты исследования могут быть использованы для научного обоснования распределения земель сельскохозяйственного назначения с учётом рациональной нагрузки на территорию; для реализации мероприятий по борьбе с деградацией почв и ландшафтов; для обоснования проектов рекреационного, гидротехнического, водохозяйственного строительства.

Объект исследования

Национальный парк «Приэльбрусье» был основан в 1986 г. на северном склоне Большого Кавказа на высоте от 2000 до 5000 м в границах Кабардино-Балкарской Республики. Парк включает старейший и популярный центр альпинизма и туризма — Южное Приэльбрусье (расположен в верхнем бассейне реки Баксан), а также малоосвоенную часть территории — верховья реки Малки, Верхне-Малкинское лесничество — Западное Приэльбрусье. В административном отношении это территории Зольского и Эльбрусского районов Кабардино-Балкарской Республики. Территория парка состоит из пяти функциональных зон (Кюль, 2018): заповедная зона (33,7 тыс. га), в которой запрещены все виды хозяйственной и рекреационной деятельности, кроме горного пешеходного туризма и альпинизма по строго ограниченным маршрутам; зона заказника (39,7 тыс. га), в которой допускается строго регулируемое посещение в научных целях; зона познавательного туризма (5,5 тыс. га); зона рекреации (1,0 тыс. га) в долине реки Баксан и на горнолыжном курорте мирового уровня «Приэльбрусье»; зона хозяйственного назначения (21,3 тыс. га).

К числу природных или естественных эрозионно-опасных факторов относятся: а) снеговая эрозия, б) дождевая эрозия, в) эрозионный потенциал рельефа и противоэрозионная стойкость почв. Например, климатические изменения в европейской части России характеризуются повышением температуры воздуха и увеличением количества осадков, которые способствуют изменению эрозионного потенциала дождевых осадков и талого стока со склонов (Litvin et al., 2017). Приэльбрусье расположено на границе умеренного и субтропического климатических поясов и находится под влиянием двух воздушных масс: влажной и субтропической — со стороны Чёрного моря и сухой континентальной — со стороны Центральной Азии. Кавказский хребет действует как климатораздел, резко очерчивая границу и вызывая заметные изменения в циркуляции атмосферы. Когда воздушные массы сталкиваются с этим горным барьером, они конденсируют большое количество накопленной влаги, что приводит к выпадению осадков. Высотная зональность региона представлена высокогорными ледниково-нивальными, луговыми (субнивальными, альпийскими и субальпийскими) и лесными

(берёзовыми и сосновыми) ландшафтами, а также контрастными склонами (Петрушина, 1987). Почвенный покров территории сформирован в основном горно-луговыми дерново-торфянистыми (Leptosols Humic (LPhu)), горно-луговыми дерновыми (Leptosols (LPu)), горно-луговыми чернозёмовидными и степными (Leptosols Mollic (LPmo)), горными примитивными (Leptosols Lithic (LPli)) почвами.

Горные системы отличаются от всех остальных не только природными условиями, но и характером хозяйственного освоения. В настоящее время существует два основных направления антропогенного воздействия на территории Приэльбрусья: сельскохозяйственное, в частности пастбищное животноводство (северо-западная часть территории парка по Баксанскому ущелью и в верховьях реки Малки, по рекам Кыртык и Су-Баши), и рекреационное (долина реки Баксан и гора Эльбрус). В сельском хозяйстве горных районов преобладает экстенсивное ведение хозяйства, что приводит к вовлечению в производство большого количества земельных ресурсов. А это в условиях их ограниченности обуславливает высокий уровень антропогенных нагрузок. Участки, находящиеся в режиме заповедывания, с момента образования парка не успели полностью восстановить своё первоначальное состояние (Бачиев, Бураев, 2010).

Современная антропогенная деятельность оказала неблагоприятное воздействие на природную среду Национального парка «Приэльбрусье» на южном склоне горы Эльбрус. Увеличение туристического потока привело к деградации почвенного и растительного покрова не только в районах с высокой концентрацией туристов, но и в непосредственной близости от развитых туристических маршрутов (Cherkasova et al., 2022).

Материалы и методы

Пересмотренное универсальное уравнение потерь почвы (RUSLE) представляет собой практическую модель, используемую для прогнозирования эрозионной опасности сельскохозяйственных земель. Данная модель была предложена У. Х. Уишмейером и Д. Д. Смитом в 1978 г. (Wischmeier, Smith, 1978), а позже скорректирована К. Г. Ренардом с коллегами (Renard et al., 1997). Она основана на простой математической формуле, включающей пять основных факторов для оценки опасности процессов водной эрозии:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P,$$

где A — годовые почвенные потери (в $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$); R — фактор эродирующей способности (в $\text{МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$); K — фактор податливости почв эрозии (в $\text{т} \cdot \text{ч} \cdot \text{МДж}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$); LS (*англ.* length, steepness) — эрозионный потенциал рельефа (безразмерный) (фактор длины склона и фактор крутизны склона); C — фактор растительности и севооборота (безразмерный); P — эффективность противоэрозионных мероприятий (безразмерный). Работа проводилась с использованием методов ГИС-технологий (геоинформационной системы GIS (*англ.* Geographic Information Systems)) по алгоритму, представленному на *рис. 1*.

Среднегодовые потери почвы от водной эрозии определялись с учётом количества осадков (коэффициент R_p) и таяния снега (коэффициент R_s):

$$R_p = 0,548257 P_a + 59,9, \quad R_s = Hm,$$

где P_a — среднегодовое количество осадков (в $\text{мм} \cdot \text{год}^{-1}$); H — запас воды в снеге в начале снеготаяния, $H = 10h\rho$ (в мм); h — высота снежного покрова (в см); ρ — средняя плотность снежного покрова (в $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$); m — интенсивность снеготаяния (в $\text{мм} \cdot \text{ч}^{-1}$).

Эрозия, вызываемая талыми водами, отличается большей продолжительностью, но меньшей выраженностью, чем ливневая. Потери почвы при снеготаянии составляют чаще всего несколько тонн с гектара. Количественная оценка эрозии представляется более трудоёмким процессом, поскольку зависит от большего числа факторов, изменяющихся во времени. В большинстве работ по USLE талые воды не учитываются. На исследуемой территории климатические и геоморфологические факторы создают предпосылки для формирования зна-

чительного стока талых вод, поэтому они были включены в расчёты годовой потери почвы. Интенсивность эрозии при снеготаянии определяется его продолжительностью и запасами воды в снеге. Особенно ярко выражено активное снеготаяние на склонах южной экспозиции.



Рис. 1. Структурная схема модели RUSLE

Формула расчёта для определения интенсивности снеготаяния в течение временного интервала между двумя обследованиями снега на исследуемой территории выглядит следующим образом:

$$m = \frac{H_i - H_f + X - F}{t},$$

где H_i и H_f — начальные и конечные запасы воды в снежном покрове и в ледяной корке на поверхности земли (в мм); X — количество твёрдых осадков за расчётный период (в мм); F — потери снега за счёт испарения за расчётный период (в мм); t — продолжительность расчётного периода (в ч).

Для количественной оценки K -фактора необходимо рассмотреть следующие параметры почвы: текстура, органическое вещество, гранулометрический состав, структура и водопроницаемость. В оригинальном варианте RUSLE используется уравнение:

$$K = \left[\frac{2,1 \cdot 10^{-4} M^{1,14} (12 - C_{org}) + 3,25(s - 2) + 2,5(p - 3)}{100} \right] 0,1317,$$

где M — текстурный фактор, $M = (m_{silt} + m_{vfs}) \cdot (100 - m_c)$; m_{silt} [%] — глинистая фракция (0,002–0,05 мм); m_{vfs} [%] — фракция мелкого песка (0,05–0,1 мм); m_c [%] — илистая фракция (<0,002 мм); C_{org} [%] — содержание органического вещества; s — структура почвы (1 — очень мелкозернистая, 2 — мелкозернистая, 3 — средне- или крупнозернистая, 4 — глыбистая, плитчатая); p — водопроницаемость (от 1 — высокой до 6 — очень слабой).

Эрозионный потенциал рельефа LS был рассчитан с использованием встроенного модуля ГИС — системы для автоматизированного геофизического анализа SAGA (*англ.* System for Automated Geoscientific Analyses) GIS.

Для оценки растительного покрова (коэффициент C) было использовано следующее преобразование значений нормализованного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), согласно формуле из работы (van der Knijff et al., 2000):

$$C = \exp\left[-2 \frac{\text{NDVI}}{1 - \text{NDVI}}\right].$$

P-фактор показывает, как методы землепользования влияют на среднегодовую скорость эрозии. Поскольку этот фактор связан с сельским хозяйством, он не рассматривался и принимался равным единице.

Для построения модели использовались следующие исходные данные: глобальная цифровая модель рельефа по результатам радарной топографической миссии шаттла SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission); топографическая карта Кабардино-Балкарской АССР в масштабе 1:100 000; почвенная карта Кабардино-Балкарской Республики из Национального почвенного атласа Российской Федерации в масштабе 1:2 500 000; данные об осадках Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за 1990–2020 гг.; табличная и справочная информация из Климатического справочника СССР; картографические данные о толщине снежного покрова из Агроэкологического атласа России и соседних стран; спутниковые снимки Landsat-8 от 2 августа 2017 г.; данные о характеристиках почв из Единого государственного реестра почвенных ресурсов России; карта-схема функционального зонирования территории Национального парка, размещённая на официальном сайте.

Результаты и обсуждение

Для оценки дождевой эрозии использованы данные о среднемесячных осадках с тридцати метеорологических станций, расположенных на охраняемой и соседних территориях. Информация с пяти станций — Зеленчукской, Кисловодской, Шаджатмазской, Клухорского перевала и Владикавказа — получена из базы данных Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, в то время как данные по остальным станциям взяты из справочников по климату СССР. Эти метеорологические станции были нанесены на карту, и соответствующие значения осадков были интерполированы с использованием метода обратного взвешивания расстояний для создания растрового представления эрозии, связанной с осадками в жидкой фазе. Фактор эродирующей способности (R_r) достигает самых высоких значений ($600 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) в районе посёлка Терскол на южном склоне Эльбруса. По мере продвижения к северу и востоку от Эльбруса влияние осадков значительно уменьшается (*рис. 2а*).

Для оценки интенсивности таяния снега использовались две карты снежного покрова из агроэкологического атласа России: одна отражает начало таяния снега (на пике высоты снежного покрова), а другая — апрель, когда происходит активное таяние снега. В контексте климатических условий Приэльбрусья ожидается, что эрозионная способность талого стока (R_s) в этот период будет максимальной. Испарение воды со снежного покрова оценивалось в среднем в 0,3 мм в день. Результаты оценки показывают (*см. рис. 2б*), что осадки обладают эрозионной способностью на порядок выше талых вод.

Значения *K*-фактора были рассчитаны для всех типов почв. Низкий *K*-фактор указывает на высокую устойчивость к эрозии, в первую очередь обусловленную значительным содержанием органического вещества. Наименьшее значение *K*-фактора наблюдается у горно-луговых дерново-торфянистых почв (Leptosols Humic (LPhu)), которые характеризуются высоким содержанием грубого гумуса и плохо разложившихся растительных остатков в верхнем горизонте (*табл. 1*).

Горно-луговые дерново-торфянистые (LPhu) почвы считаются преобладающим типом почв на Центральном Кавказе и в Приэльбрусье. Они обычно встречаются на высотах от 2300 до 2700 м над уровнем моря, часто под альпийскими лугами, представленными разнотравьем, осоками и злаками. Для этих почв характерен обильно пронизанный корнями травяной растительности оторфованный дерновый горизонт, мощностью 10–15 см, тёмно-коричневого цвета, с непрочной зернистой структурой. Медленное разложение растительного опада — пря-

мой результат высокогорных климатических условий, которые включают короткий вегетационный период, низкую ночную температуру и высокую влажность.

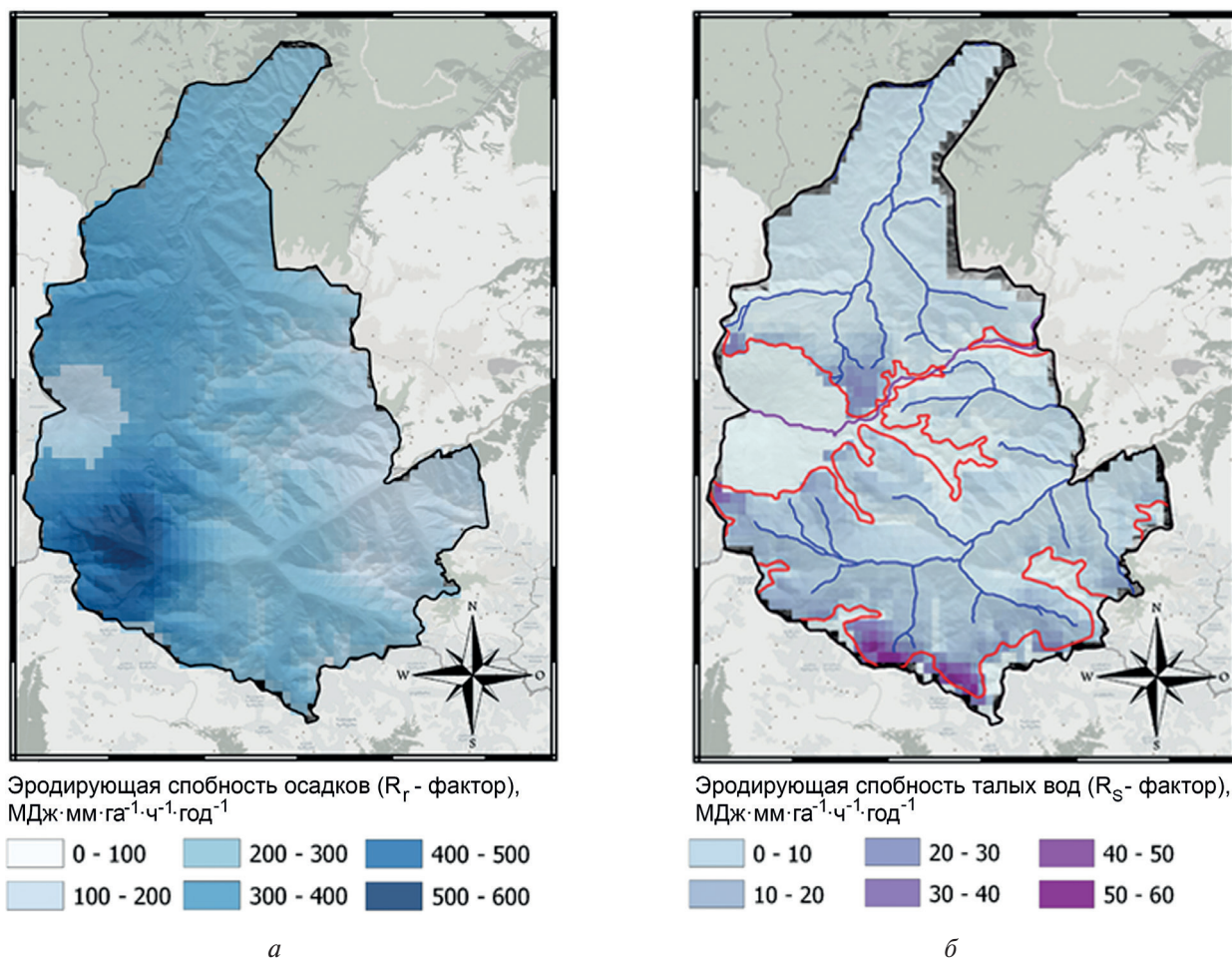


Рис. 2. Пространственное распределение фактора R_r (а) и фактора R_s (б)

Таблица 1. Коэффициент эродруемости почвы K (в т·ч·МДж⁻¹·мм⁻¹)

Тип почвы	M	C_{org}	S	p	K
Горно-луговые дерново-торфянистые (Leptosols Humic (LP _{hu}))	4445	12,2	3	3	0,0035
Горно-луговые дерновые (Leptosols Umbric (LP _u))	5809	9,9	2	3	0,0114
Горно-луговые чернозёмовидные (Leptosols Mollic (LP _{mo}))	3829	10,2	2	4	0,0115
Горные примитивные (Leptosols Lithic (LP _{li}))	4346	7,1	3	1	0,0167

Горно-луговые чернозёмовидные и степные почвы (LP_{mo}) представляют собой второй по распространённости тип почв в национальном парке, обычно образующийся под альпийскими и субальпийскими степными лугами, а также луговыми степями Центрального Кавказа. Эти почвы преимущественно встречаются на высотах от 1100 до 2000 м над уровнем моря на элюво-делювии известняков, известковых песчаников и других карбонатных породах. Климат в этом регионе характеризуется как умеренно прохладный, с годовым количеством осадков от 600 до 750 мм и среднегодовой температурой примерно от 1 до 2 °С. Содержание гумуса в почвенном горизонте составляет около 10 %.

Горно-луговые дерновые почвы (LP_u) характеризуются плотным дерновым горизонтом, мощностью более 10 см, под субальпийской растительностью на некарбонатных поро-

дах. Гумусоаккумулятивный горизонт этих почв среднего или тяжёлого гранулометрического состава обладает водопрочной зернистой структурой, содержит значительное количество слабо разложившегося органического материала.

Горно-луговые примитивные почвы (LPlI) имеют наибольшее распространение в субнивальном поясе (выше 3200 м). Отдельными участками встречаются почти повсюду в горах, на весьма крутых склонах. Обычно развиваются в условиях высокогорного климата, характеризующегося коротким вегетационным периодом, низкой температурой и большой влажностью воздуха. На непокрытых снегом склонах и скалах растут различные лишайники и мхи, на границе тающих ледников и снега произрастают одиночные растения, типичные для альпийских лугов, встречаются и кустарнички. В результате поселения растений происходит задернение скал, осыпей и россыпей, морен, а также других поверхностей.

Свойства примитивных почв в значительной степени определяются параметрами материнской породы. Для них характерна низкая влагоёмкость, высокая каменистость. Содержание гумуса в мелкозёме может достигать 8–10 %.

Самый высокий *K*-фактор у горных примитивных почв (Leptosols Lithic (LPlI)), поскольку они отличаются высокой скелетностью и низким содержанием органического вещества. Важно отметить, что для примитивных почв этот показатель может быть неоднозначным из-за специфических свойств, связанных с мозаичностью почвенного покрова. Распределение *K*-фактора (подверженность эрозии почвы) увеличивается с высотой над уровнем моря (рис. 3).

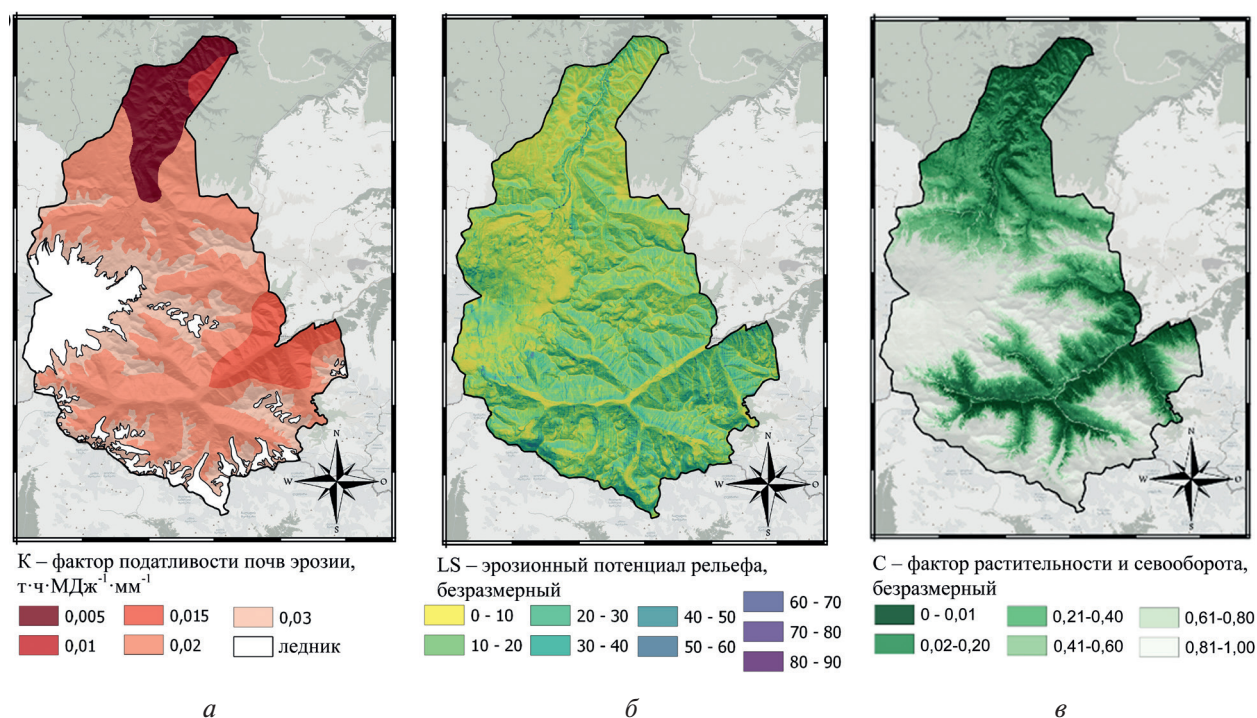


Рис. 3. Пространственное распределение *K*-фактора (а), *LS*-фактора (б), *C*-фактора (в)

Самый густой растительный покров (коэффициент *C*) наблюдается в основном в долинах рек, при этом распределение соответствует высотным поясам, границы которых чётко выделяются. Карта потенциальной эрозии получается на основе произведения пяти факторов (*R*, *K*, *LS*, *C* и *P*). По степени эрозии почвы подразделяются на пять классов (рис. 4), согласно классификации Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединённых Наций FAO (англ. Food and Agriculture Organization of the United Nations). На основе рассмотренных данных был проведён пространственный анализ распределения эрозионно-опасных территорий по функциональным зонам охраняемых территорий. В табл. 2 представлено рас-

пределение относительной площади территорий, подверженных различной степени водной эрозии, по функциональным зонам парка.

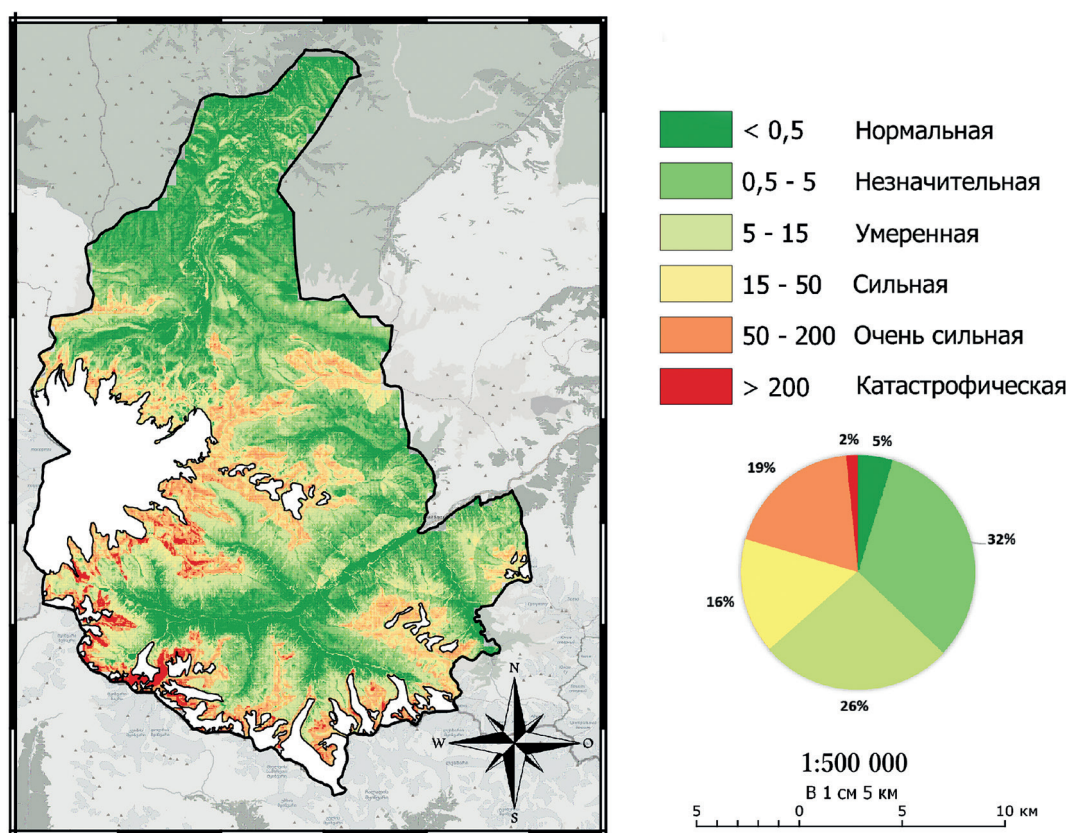


Рис. 4. Среднегодовые потери почвы (в $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) от водной эрозии на территории Национального парка «Приэльбрусье»

Таблица 2. Относительная площадь (в %) территорий, подверженных различной степени эрозии, в Национальном парке «Приэльбрусье»

Степень эрозии	Функциональные зоны			
	Заповедная	Хозяйственная	Особо охраняемая	Рекреационная
Нормальная	7	18	5	12
Незначительная	13	32	20	22
Умеренная	20	33	27	26
Сильная	25	13	35	26
Очень сильная	20	3	10	3
Катастрофическая	15	1	3	11

Анализ показывает, что наиболее высокая степень эрозии характерна для заповедных и особо охраняемых зон. Напротив, в экономической зоне преобладает нормальная и незначительная эрозия. Функциональное зонирование парка выполнено таким образом, что наиболее уязвимые территории имеют более высокий охранный статус, а экономическая деятельность разрешена на более устойчивых ландшафтах.

Осадки в районе села Терскол — основная причина водной эрозии, в первую очередь из-за расположения на наветренных склонах гор. Талые воды проявляют наиболее значительную эрозионную активность на подветренных склонах, в то время как их влияние на равнин-

ных участках минимально. Ключевой показатель почв, определяющий их противоэрозионную стойкость, — содержание гумуса. Эрозионный потенциал ландшафта значительно варьируется, что существенно влияет на потери почвы на определённых участках. Растительный покров служит основной защитой почвенного покрова, его плотность увеличивается с высотой. Сильная эрозия, превышающая $15 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, встречается на 37 % площади исследуемой территории, что обусловлено избыточным увлажнением наветренных склонов и крутыми склонами высокогорий. Северный подветренный склон горы Эльбрус менее эрозионно-опасен. Наиболее защищёнными оказываются пониженные участки речных долин и обширные луговые террасы с густым растительным покровом. На трети территории парка эрозионные потери почвы составляют до $5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, что является хорошим показателем. На долю сильноэродированных земель (смыв более $50 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$) приходится около 20 % площади национального парка.

Выше отметки 3000 м практически все участки подвержены сильной эрозии, что обусловлено климатом высокогорий. На данных высотах происходит возрастание каменистости примитивных почв, увеличение доли скальных поверхностей, покрытых грубообломочным материалом, что делает оценку эрозионных потерь методом RUSLE мало информативной.

Выводы

Впервые на основе открытых данных о климате, почвах и топографии была проведена комплексная оценка эрозии. Модель RUSLE была успешно адаптирована для исследуемой области. На основании полученных результатов и анализа литературных данных можно сделать следующие выводы: по своим физико-географическим характеристикам Национальный парк «Приэльбрусье» находится в эрозионно-опасном регионе из-за сложности рельефа; наибольший вклад в водную эрозию вносят осадки в районе Терскола, что обусловлено расположением наветренных склонов крупных орографических единиц; талая вода обладает наибольшей эрозионной активностью на подветренных склонах крупных горных ландшафтов; содержание гумуса выступает основным показателем почвы, определяющим её устойчивость к эрозии; функциональное зонирование охраняемых территорий эффективно организовано на основе устойчивости к эрозии. Точность модели в настоящее время зависит исключительно от выбора параметров. Необходимы дальнейшие эмпирические исследования для стандартизации факторов, подходящих для местных условий. Интенсивность эрозии на высотах, превышающих 3000 м, достигает самых больших значений, вероятно за счёт особых характеристик высокогорных почв и экстремальных условий окружающей среды. При расчёте потенциальной эрозии на таких высотах следует использовать специализированные методы, адаптированные для высокогорных регионов. Использование результатов аэрофото съёмки может обеспечить более точную цифровую модель рельефа.

Литература

1. Бачиев Р. А., Бураев Р. А. Экологические последствия хозяйственной деятельности на территории государственного природного национального парка «Приэльбрусье» // Изв. высш. учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2010. № 5. С. 89–91.
2. Кюль Е. В. Национальный парк «Приэльбрусье»: краткое описание, проблемы и пути развития // Биота и среда заповедных территорий. 2018. № 2. С. 66–84.
3. Петрушина М. Н. Пространственно-временные изменения ландшафтов бассейна р. Баксан // Вестн. Московского ун-та. Сер. География. 1987. № 5. С. 100–117.
4. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling // Intern. Soil and Water Conservation Research. 2019. V. 7. Iss. 3. P. 203–225. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.05.004.
5. Cherkasova A. A., Iurmanov A. A., Kokane P. et al. Prielbrusye National Park environmental changes due to increasing tourism activity // Geography, Environment, Sustainability. 2022. V. 15. No. 4. P. 115–123. DOI: 10.24057/2071-9388-2022-108.

6. *Harden C. P.* Soil erosion and sustainable mountain development // *Mountain Research and Development*. 2001. V. 21. No. 1. P. 77–83.
7. *Huber R., Rigling A., Bebi P. et al.* Sustainable land use in mountain regions under global change: synthesis across scales and disciplines // *Ecology and Society*. 2013. V. 18. Iss. 3. Article 36. 20 p. DOI: 10.5751/ES-05499-180336.
8. *Laflen J. M., Elliot W. J., Flanagan D. C. et al.* WEPP-Predicting water erosion using a process-based model // *J. Soil and Water Conservation*. 1997. V. 52. No. 2. P. 96–102. DOI: 10.1080/00224561.1997.12457140.
9. *Litvin L. F., Kiryukhina Z. P., Krasnov S. F., Dobrovolskaya N. G.* Dynamics of agricultural soil erosion in European Russia // *Eurasian Soil Science*. 2017. V. 50. Iss. 11. P. 1344–1353. DOI: 10.1134/s1064229317110084.
10. *Nearing M. A., Yin S., Borrelli P., Polyakov V. O.* Rainfall erosivity: An historical review // *Catena*. 2017. V. 157. P. 357–362. DOI: 10.1016/j.catena.2017.06.004.
11. *Merchán L., Martínez-Graña A. M., Alonso Rojo P., Criado M.* Water erosion risk analysis in the Arribes del Duero natural park (Spain) using RUSLE and GIS techniques // *Sustainability*. 2023. V. 15. Iss. 2. Article 1627. 15 p. DOI: 10.3390/su15021627.
12. *Pandey S., Kumar P., Zlatic M. et al.* Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed // *Intern. Soil and Water Conservation Research*. 2021. V. 9. Iss. 3. P. 305–318. DOI: 10.1016/j.iswcr.2021.03.001.
13. *Pătru-Stupariu I., Hossu C. A., Grădinaru S. R. et al.* A review of changes in mountain land use and ecosystem services: from theory to practice // *Land*. 2020. V. 9. Iss. 9. Article 339. 21 p. DOI: 10.3390/land9090336.
14. *Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C.* Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook No. 703*. Washington, D. C.: U. S. Department of Agriculture, 1997. 404 p.
15. *Stanchi S., Falsone G., Bonifacio E.* Soil aggregation, erodibility, and erosion rates in mountain soils (NW Alps, Italy) // *Solid Earth*. 2015. V. 6. P. 403–414. DOI: 10.5194/se-6-403-2015.
16. *van der Knijff J., Jones R. J. A., Montanarella L.* Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau, Joint Research Center of European Commission, 2000. EUR 19022EN. 54 p.
17. *Wischmeier W. H., Smith D. D.* Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *Agricultural Handbook No. 537*. Washington, D. C.: U. S. Department of Agriculture, 1978. 58 p.
18. *Williams J. R.* Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor // *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. ARS-S-40. Washington, DC: Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1975. P. 244–252.
19. *Young R. A., Onstad C. A., Bosch D. D., Anderson W. P.* AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model. A watershed analysis tool. Conservation Research Report 35. Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture, 1987. 81 p.

Simulation of water erosion processes in high mountain terrains based on the RUSLE model

F. V. Vinogradov, D. K. Alexeev, L. E. Dmitricheva

*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia
E-mail: d.alekseev@rshu.ru*

The aim of this study is to assess annual soil loss within the Prielbrusye National Park. To investigate the main factors contributing to erosion phenomena, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), adapted to the physical-geographical features of the region and based on remote sensing data, was used. For the first time, the spatial distribution of erodibility within the study area was obtained using geoinformation modeling. The results of the study can be used for scientific substantiation of agricultural land distribution, taking into account the rational load on the territory. The analysis considered exclusively natural erosion factors. Average annual soil loss from water erosion was determined taking into account precipitation and snowmelt. The average erosion rate is $6.81 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$,

with areas of slight erosion ($<5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$) covering 37 %, moderate erosion ($5\text{--}15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$) covering 26 %, and very severe erosion ($>50 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$) covering about 20 % of the area. Further empirical research is needed to standardize factors suitable for local conditions. Erosion rates at elevations exceeding 3000 m reach their highest values, likely due to the specific characteristics of high mountain soils and extreme environmental conditions. When calculating potential erosion at such altitudes, specialized methods adapted for high mountain regions should be used.

Keywords: soil erosion, climate change, empirical model, mountainous regions, sustainability, Caucasus

Accepted: 21.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-215-226

References

1. Bachiev R. A., Buraev R. A., Ecological consequences of economic activity on the territory of the state natural national park “Prielbrusye”, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii Region. Estestvennye nauki*, 2010, No. 5, pp. 89–91 (in Russian).
2. Kyul E. V., Prielbrusye National Park: Brief description, problems, and development paths, *Biota i okruzhayushchaya sreda zapovednykh territorii*, 2018, No. 2, pp. 66–84 (in Russian).
3. Petrushina M. N., Spatio-temporal changes in the landscapes of the Baksan River basin, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. Geografiya*, 1987, No. 5, pp. 100–117 (in Russian).
4. Alewell C., Borrelli P., Meusburger K., Panagos P., Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling, *Intern. Soil and Water Conservation Research*, 2019, V. 7, Iss. 3, pp. 203–225, DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.05.004.
5. Cherkasova A. A., Iurmanov A. A., Kokane P. et al., Prielbrusye National Park environmental changes due to increasing tourism activity, *Geography, Environment, Sustainability*, 2022, V. 15, No. 4, pp. 115–123, DOI: 10.24057/2071-9388-2022-108.
6. Harden C. P., Soil erosion and sustainable mountain development, *Mountain Research and Development*, 2001, V. 21, No. 1, pp. 77–83.
7. Huber R., Rigling A., Bebi P. et al., Sustainable land use in mountain regions under global change: synthesis across scales and disciplines, *Ecology and Society*, 2013, V. 18, Iss. 3, Article 36, 20 p., DOI: 10.5751/ES-05499-180336.
8. Laflen J. M., Elliot W. J., Flanagan D. C. et al., WEPP-Predicting water erosion using a process-based model, *J. Soil and Water Conservation*, 1997, V. 52, No. 2, pp. 96–102, DOI: 10.1080/00224561.1997.12457140.
9. Litvin L. F., Kiryukhina Z. P., Krasnov S. F., Dobrovol'skaya N. G., Dynamics of agricultural soil erosion in European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2017, V. 50, Iss. 11, pp. 1344–1353, DOI: 10.1134/s1064229317110084.
10. Nearing M. A., Yin S., Borrelli P., Polyakov V. O., Rainfall erosivity: An historical review, *Catena*, 2017, V. 157, pp. 357–362, DOI: 10.1016/j.catena.2017.06.004.
11. Merchán L., Martínez-Graña A. M., Alonso Rojo P., Criado M., Water erosion risk analysis in the Arribes del Duero natural park (Spain) using RUSLE and GIS techniques, *Sustainability*, 2023, V. 15, Iss. 2, Article 1627, 15 p., DOI: 10.3390/su15021627.
12. Pandey S., Kumar P., Zlatic M. et al., Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed, *Intern. Soil and Water Conservation Research*, 2021, V. 9, Iss. 3, pp. 305–318, DOI: 10.1016/j.iswcr.2021.03.001.
13. Pătru-Stupariu I., Hossu C. A., Grădinaru S. R. et al., A review of changes in mountain land use and ecosystem services: from theory to practice, *Land*, 2020, V. 9, Iss. 9, Article 339, 21 p., DOI: 10.3390/land9090336.
14. Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C., *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Agricultural Handbook No. 703, Washington, D. C.: U. S. Department of Agriculture, 1997, 404 p.
15. Stanchi S., Falsone G., Bonifacio E., Soil aggregation, erodibility, and erosion rates in mountain soils (NW Alps, Italy), *Solid Earth*, 2015, V. 6, pp. 403–414, DOI: 10.5194/se-6-403-2015.
16. van der Knijff J., Jones R. J. A., Montanarella L., *Soil erosion risk assessment in Italy*, European Soil Bureau, Joint Research Center of European Commission, 2000, EUR 19022EN, 54 p.
17. Wischmeier W. H., Smith D. D., *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*, Agricultural Handbook No. 537, Washington, D. C.: U. S. Department of Agriculture, 1978, 58 p.

18. Williams J. R., Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor, In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*, ARS-S-40, Washington, DC: Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1975, pp. 244–252.
19. Young R. A., Onstad C. A., Bosch D. D., Anderson W. P., *AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model. A watershed analysis tool*, Conservation Research Report 35, Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture, 1987, 81 p.