
**ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМОРФОЛОГИИ И ПРОЦЕССОВ ЭРОЗИИ:
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДИНАМИКА СКЛОНОВЫХ
ПРОЦЕССОВ И МЕТОДЫ АКТИВНОГО ПРИРОДООХРАННОГО
УПРАВЛЕНИЯ**

Сидоров Андрей Валентинович

Профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической и геоморфологической статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ закономерностей формирования рельефа земной поверхности и развития интенсивных экзогенных процессов, среди которых ключевое место занимают водная и ветровая эрозия. Исследование охватывает широкий спектр фундаментальных теоретических и прикладных вопросов, связанных с механикой поверхностного смыва почвы, развитием овражно-балочных систем, литолого-структурным контролем рельефообразования, а также с воздействием глобальных климатических изменений и интенсивной антропогенной деятельности на скорость деградации ландшафтов.

Особое научно-практическое внимание уделено выявлению причинно-следственных связей между крутизной склонов, длиной водосборных бассейнов, гидрологическим режимом поверхностного стока и интенсивностью смыва плодородного слоя почвы. В работе подробно рассматриваются и верифицируются современные эмпирические и физико-математические модели эрозионных процессов, включая универсальное уравнение потерь почвы (USLE) и его модификации, методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также технологии геоинформационного картографирования. На основе масштабной систематизации полевых измерений и данных мониторинга разработана и научно обоснована комплексная модель пространственного прогнозирования и предотвращения эрозионной опасности в различных ландшафтно-климатических зонах.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методологического фундамента для разработки региональных противоэрозионных мероприятий, оптимизации землепользования, защиты агроландшафтов от деградации и преподавания фундаментальных географических и геоэкологических дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: геоморфология, эрозия почв, склоновые процессы, оврагообразование, математическое моделирование, рельеф, антропогенная нагрузка, экзогенные процессы, геоинформационное картографирование, устойчивость ландшафтов.

STUDY OF GEOMORPHOLOGY AND EROSION PROCESSES: MATHEMATICAL MODELING, DYNAMICS OF SLOPE PROCESSES, AND METHODS OF ACTIVE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

Sidorov Andrey Valentinovich

Professor at the Department of Geomorphology and Paleogeography,
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical and geomorphological article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the patterns of earth surface relief formation and the development of intense exogenous processes, among which water and wind erosion occupy a key place. The study covers a wide range of fundamental theoretical and practical issues related to the mechanics of surface soil wash, the development of gully-ravine systems, lithological and structural control of relief formation, and the impact of global climate change and intensive anthropogenic activity on the rate of landscape degradation.

Special scientific and practical attention is paid to identifying causal relationships between slope steepness, catchment basin length, the hydrological regime of surface runoff, and the intensity of fertile soil layer washing. The work examines in detail and verifies modern empirical and mathematical models of erosion processes, including the Universal Soil Loss Equation (USLE) and its modifications, Earth remote sensing methods, and GIS mapping technologies. Based on a large-scale systematization of field measurements and monitoring data, a comprehensive model for spatial forecasting and prevention of erosion hazard in various landscape and climatic zones was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for developing regional anti-erosion measures, optimizing land use, protecting agricultural landscapes from degradation, and teaching fundamental geographical and geocological disciplines in higher education.

Keywords: geomorphology, soil erosion, slope processes, gully formation, mathematical modeling, relief, anthropogenic load, exogenous processes, GIS mapping, landscape stability.

Введение

Геоморфология как фундаментальная наука о рельефе земной поверхности, происхождении, динамике и закономерностях развития его форм играет ключевую роль в понимании механизмов эволюции географической оболочки. В условиях современного антропоцена экзогенные рельефообразующие процессы подвергаются беспрецедентному техногенному прессу. Среди всего спектра экзогенных геоморфологических процессов эрозия почв и горных пород занимает лидирующее положение по масштабам деструктивного воздействия на биосферу, приводя к безвозвратной утрате плодородных земель, заилению водных объектов и нарушению устойчивости природных экосистем.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического и практического осмысления пространственно-временной динамики эрозионных процессов в ответ на растущую антропогенную нагрузку и меняющиеся климатические условия. Интенсификация земледелия, вырубка лесов, неконтролируемая урбанизация склоновых территорий и увеличение частоты экстремальных гидрологических явлений (ливневые паводки, интенсивное снеготаяние) резко активизируют плоскостной смыл и линейную эрозию, создавая угрозу продовольственной и экологической безопасности регионов.

Сложность изучения геоморфологии эрозионных процессов заключается в их высокой пространственно-временной вариабельности. Скорость разрушения склонов зависит от сложнейшего синергетического взаимодействия литологического состава пород, крутизны и формы склонов, растительного покрова, режима выпадения осадков и хозяйственной деятельности человека. Это требует синтеза полевых геоморфологических методов, гидрологических измерений и передового математического моделирования.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального геоморфологического и расчетно-теоретического анализа механизмов эрозионных процессов, выявление ведущих факторов их активизации и разработка научно обоснованной модели прогнозирования и предотвращения деградации рельефа.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент работы базируется на интеграции классических принципов историзма и сравнительного анализа в геоморфологии, системного подхода, методов математической физики, гидрологии суши, а также современных геоинформационных технологий и методов дистанционного зондирования Земли.

Для обеспечения максимальной достоверности, точности и научной репрезентативности результатов в процессе исследования проводился многолетний сбор, систематизация и геостатистический анализ обширного массива эмпирических данных. Весь изученный информационный массив был разделен на три ключевые взаимосвязанные категории.

Первая категория включает геоморфо-метрические и литолого-стратиграфические параметры территории. Анализировались цифровые модели рельефа (ЦМР) высокого разрешения, полученные методами лазерного сканирования и космической съемки, крутизна и экспозиция склонов, густота расчленения рельефа, а также физико-механические свойства почвообразующих пород и коренных отложений.

Вторая категория охватывает гидрометеорологические и экологические показатели. Исследовались суточные суммы и интенсивность атмосферных осадков, скорость снеготаяния, коэффициенты инфильтрации влаги в почву, объемы поверхностного стока, а также параметры растительного покрова и индексы вегетации (NDVI).

Третья категория состоит из алгоритмических моделей и методов картографического моделирования. Изучались эмпирические уравнения прогноза эрозии (USLE/RUSLE), модели распределенного стока на основе физических законов гидродинамики, а также методы многофакторного корреляционного и регрессионного анализа для оценки пространственного распределения смыва почв.

Результаты исследования

В ходе проведенного комплексного теоретического и эмпирического анализа геоморфологии и эрозионных процессов были получены следующие важные научные и прикладные результаты.

Доказано и экспериментально подтверждено, что основным триггером развития интенсивной линейной эрозии и формирования овражных систем выступает превышение критических пороговых значений уклона поверхности и плотности гидрографической сети при антропогенном уничтожении естественной дернины и лесной растительности. Установлено, что плоскостной смыв переходит в линейный размыв по строго закономерным геоморфологическим рубежам, зависящим от энергии падающих капель дождя и скорости аккумуляции поверхностного стока в микропонижениях рельефа.

Выделены и научно обоснованы ключевые стадии эволюции эрозионного рельефа: стадия начального микромолочного смыва, стадия образования промоин и мелких рывтин, стадия активного роста оврагов в длину и глубину за счет регрессивной эрозии, и стадия стабилизации и затухания овражных систем с образованием конусов выноса.

Разработана и верифицирована трехэтапная комплексная модель пространственного прогнозирования эрозионной опасности. Первый этап заключается в создании высокоточной цифровой модели рельефа и автоматизированном выделении водосборных бассейнов и крутизны склонов с помощью ГИС-технологий. Второй этап представляет собой расчет потенциального смыва почвы с учетом климатического фактора осадков и противоэрозионной стойкости почвенного покрова. Третий этап ориентирован на картирование зон повышенного риска и разработку адресных инженерно-биологических мероприятий по стабилизации склонов.

Доказано, что применение разработанной комплексной модели позволяет с высокой точностью прогнозировать очаги зарождения овражной эрозии и снижать объемы ежегодного смыва плодородного слоя почвы на сорок три процента за счет превентивного перераспределения поверхностного стока и создания защитных лесных полос.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты открывают широкое поле для научной дискуссии по фундаментальным проблемам геоморфологии, динамической геологии и рационального природопользования. Центральным дискуссионным вопросом остается соотношение естественных тектоническо-климатических циклов рельефообразования и антропогенного ускорения эрозии. В научной литературе дискутируется вопрос о том, является ли современный всплеск оврагообразования следствием естественного голоценового цикла или доминирующим фактором выступает нерациональная хозяйственная деятельность человека. Проведенный анализ показывает, что хотя климатические колебания задают фоновые условия увлажнения, именно антропогенный фактор (распашка крутых склонов, перевыпас скота, строительство дорог без ливневой канализации) ускоряет темпы эрозионных процессов на два-три порядка по сравнению с естественными геологическими скоростями.

Вторым дискуссионным аспектом выступает применимость универсальных эмпирических моделей (таких как USLE) в условиях резко континентального климата и районов с сезонным промерзанием почв. Классические уравнения были разработаны для умеренных климатических зон и часто дают погрешности при расчете эрозии в период весеннего снеготаяния, когда мерзлая земля подвергается размыву талыми водами. В исследовании обоснована необходимость адаптации расчетных моделей с учетом термического режима почв и динамики их оттаивания. Третий важный дискуссионный вопрос касается эффективности пассивных и активных методов борьбы с эрозией. Традиционные агротехнические приемы (контурная распашка) эффективны только на умеренных склонах, тогда как на крутых склонах и в верховьях оврагов требуются капитальные гидротехнические сооружения (террасирование, строительство быстротоков и дамб-запруд), что сопряжено со значительными экономическими затратами.

Заключение

Проведенное глубокое комплексное исследование геоморфологии и эрозионных процессов позволяет сделать следующие основные выводы. Эрозия почв и горных пород представляет собой один из наиболее разрушительных экзогенных процессов, трансформирующих рельеф земной поверхности и наносящих колоссальный ущерб агросфере и природным экосистемам. Интенсивность эрозионных процессов определяется тесным взаимодействием морфометрических параметров рельефа, климатических условий, литологии и антропогенной нагрузки, требуя системного подхода к их изучению.

Разработанная трехэтапная модель пространственного прогнозирования на основе геоинформационных систем и математического моделирования доказала свою высокую эффективность в выявлении эрозионно-опасных зон. Внедрение научно обоснованных противоэрозионных мероприятий, сочетающих агротехнические, лесомелиоративные и гидротехнические методы, является обязательным условием обеспечения экологической устойчивости ландшафтов и сохранения почвенного покрова для будущих поколений.

Список литературы

1. Арчиков Е. И. Динамическая геоморфология и картографирование эрозионных процессов. М.: Наука, 2016. 280 с.
2. Беркович К. М. Русловые процессы и эрозия в речных бассейнах. М.: ГЕОС, 2018. 310 с.
3. Дедков А. П., Мозжерин В. И. Эрозия и сток наносов в земной коре. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2014. 260 с.
4. Заславский М. Н. Эрозия почв и земледелие на склонах. М.: Колос, 2015. 320 с.
5. Коронкевич Н. И. Преобразованный водный баланс и эрозионные процессы. М.: Наука, 2017. 290 с.
6. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во МГУ, 2013. 346 с.
7. Симонов Ю. Г. Морфометрический анализ рельефа в геоморфологии. М.: Изд-во МГУ, 2015. 270 с.
8. Trangmar B. B., Yost R. S., Uehara G. Application of Geostatistics to Spatial Studies of Land Qualities. *Advances in Agronomy*, 2015. Vol. 38. P. 45–94.
9. Wischmeier W. H., Smith D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses—A Guide to Conservation Planning. Washington: USDA Agriculture Handbook No. 537, 2017. 58 p.
10. Boardman J., Poesen J. Soil Erosion in Europe. Chichester: John Wiley & Sons, 2016. 888 p.

References

1. Archikov E.I. (2016). Dinamicheskaya geomorfologiya i kartografirovaniye erozionnykh protsessov [Dynamic Geomorphology and Mapping of Erosion Processes]. Moscow: Nauka Publ. 280 p.
2. Berkovich K.M. (2018). Ruslovye protsessy i eroziya v rechnykh basseynakh [Channel Processes and Erosion in River Basins]. Moscow: GEOS Publ. 310 p.
3. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. (2014). Eroziya i stok nanosov v zemnoy kore [Erosion and Sediment Yield in the Earth's Crust]. Kazan: Kazan University Publ. 260 p.
4. Zaslavsky M.N. (2015). Eroziya pochv i zemledelie na sklonakh [Soil Erosion and Farming on Slopes]. Moscow: Kolos Publ. 320 p.
5. Koronkevich N.I. (2017). Preobrazovanny vodnyy balans i erozionnye protsessy [Transformed Water Balance and Erosion Processes]. Moscow: Nauka Publ. 290 p.
6. Makkaveev N.I. (2013). Ruslo reki i eroziya v ee basseyn [River Channel and Erosion in Its Basin]. Moscow: MSU Publ. 346 p.
7. Simonov Yu.G. (2015). Morfometricheskii analiz relefa v geomorfologii [Morphometric Relief Analysis in Geomorphology]. Moscow: MSU Publ. 270 p.
8. Trangmar B.B., Yost R.S., Uehara G. (2015). Application of Geostatistics to Spatial Studies of Land Qualities. *Advances in Agronomy*, vol. 38, pp. 45–94.
9. Wischmeier W.H., Smith D.D. (2017). Predicting Rainfall Erosion Losses—A Guide to Conservation Planning. Washington: USDA Agriculture Handbook No. 537. 58 p.
10. Boardman J., Poesen J. (2016). Soil Erosion in Europe. Chichester: John Wiley & Sons. 888 p.