

## ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭРОЗИОННОГО ПРОЦЕССА СКЛОНОВОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГОРНОГО И ПРЕДГОРНОГО ЛАНДШАФТА

Хаширова Т.Ю.<sup>1</sup>, Апанасова З.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный университет им.Х.М. Бербекова», Нальчик, Россия (360004, Нальчик, ул. Чернышевского, 173), e-mail: khashirova@mail.ru

Математическое моделирование эрозионно-аккумулятивных процессов насчитывает десятки моделей, представленных в виде алгебраических или дифференциальных уравнений, основанных на различных подходах и опирающихся на общие и частные физические законы. Компьютерное моделирование сложных экологических техносистем основано на методах моделирования сложных динамических систем, которые определяют степень детализации и форму представления реализуемой модели. Активность эрозии определяется различными факторами, такими как: интенсивность поверхностного стокообразования, податливость почвы или рыхлой горной породы размыву, характеристики рельефа и подстилающей поверхности. В научной среде широко применяются модели смыва почв, где в качестве основных факторов эрозионного процесса учитывают длину и крутизну склона либо используют их как интегральный показатель – «фактор рельефа». Областью наших исследований является эрозионный процесс почв на склонах горных и предгорных ландшафтов. Целью нашего исследования стала разработка обобщенной математической модели эрозионного процесса склоновой подсистемы горного и предгорного ландшафта, алгоритм которой приводится в статье. Реализация предложенного в статье алгоритма является начальным этапом в построении системы оценки экологической стабильности склоновой подсистемы на основе полученной обобщенной математической модели эрозионного процесса склоновой подсистемы.

Ключевые слова: эрозионные процессы, обобщенная математическая модель, экологическая оценка, модели смыва почвы

## THEORY AND METHOD OF CONSTRUCTING A GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF THE EROSION PROCESS OF SLOPE SUBSYSTEM OF MOUNTAIN AND FOOTHILL LANDSCAPE

Khashirova T.Y.<sup>1</sup>, Apanasova Z.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia (360004, Nalchik, Chernyshevsky street, 173), e-mail: khashirova@mail.ru

Mathematical modeling of erosion and accumulation processes has a large number of models. They are presented in the form of algebraic or differential equations, which are based on General and specific physical laws of the process of soil erosion. Computer modeling of complex environmental systems based on methods of modeling complex dynamic systems, which determine the level of detail and presentation of the applied model. Active erosion is determined by various factors such as the intensity of surface runoff, susceptibility of soil to erosion, the characteristics of topography and underlying surface. In the scientific community widely used model of soil erosion, where as the main factors of the erosion process take the length and steepness of the slope, or use them as an integral indicator – «relief factor». The scope of our research is erosion the process of soil on the slopes of the mountain and foothill landscapes. The aim of our study was to develop a generalized mathematical model of the erosion process of slope subsystem of mountain and foothill landscape, which algorithm is presented in the article. Implementation of the proposed algorithm is the first stage in the construction of evaluation system of ecological stability of slope subsystem on the basis of the generalized mathematical model of the erosion process of slope subsystem.

Keywords: erosion processes, a generalized mathematical model, environmental assessment, models of soil loss

Тенденция математизации характерна для большинства научных направлений исследований. Применение математического аппарата уже не ограничивается использованием статистических методов для обработки экспериментальных данных, все чаще акцент делается на математическое моделирование. Математическое моделирование

эрозионно-аккумулятивных процессов почв — относительно молодое научное направление, основанное на методах моделирования сложных динамических систем, которые в значительной степени зависят от принципа иерархической организации или принципа интегративных уровней [9]. Этот принцип утверждает, что для предсказания поведения сложной системы не обязательно точно знать, как ее компоненты построены из более простых компонентов. В зависимости от степени упрощения для одной и той же системы-оригинала можно получить несколько различных моделей. Степень детализации модели, форма ее представления в первую очередь определяются целями исследования.

Областью наших исследований является эрозионный процесс почв на склонах горных и предгорных ландшафтов, который обычно делят на два этапа [6]: площадной и линейный. Первый этап связан с поверхностным стокообразованием, эрозионным размывом почв, слагающих поверхность водосбора, и поступлением в русловую сеть наносов. В качестве объекта нашего исследования была выбрана склоновая (плоскостная) водная эрозия [6, 7, 8]. Активность эрозии определяется различными факторами, такими как: интенсивность поверхностного стокообразования, податливость почвы или рыхлой горной породы размыву, характеристики рельефа и подстилающей поверхности. Интенсивная эрозия в исследуемых районах наблюдается в период ливней и паводков [3, 4].

Положительная сторона методов, основанных на математическом моделировании данных по эрозионно-аккумулятивному процессу, состоит в том, что при их использовании:

- есть возможность получения предельно точной информации о характеристиках смыва (это направление потока веществ, места их отложения, скорость смыва и т.д.);
- ускоряется анализ и доступ к данным большого объема;
- появляется возможность точного прогноза развития почвенной эрозии.

Математическое моделирование эрозионно-аккумулятивных процессов насчитывает десятки моделей, представленных в виде алгебраических или дифференциальных уравнений, основанных на различных подходах и опирающихся на общие и частные физические законы. Можно выделить три типа моделей для прогнозирования эрозии: физические, эмпирические и полуэмпирические. Так, значительный объем исследований в данной области основан на теории взвесенесущих потоков (Маккавеев В.М., Гончаров В.Н., Мирцхулава Ц.Е., Швец Г.И., Кузнецов М.С. и др.) [1, 12], которая составляет основу для различных полуэмпирических зависимостей поверхностной эрозии почв.

Существующие методики количественной оценки смыва почвы можно свести к следующим:

- методы балльной оценки;
- сравнительные методы;

- эмпирические зависимости;
- методы, основанные на физике гидромеханического процесса.

Суть метода балльной оценки сводится к количественной оценке качественных явлений. Каждому из существенных с точки зрения изучения моделируемого процесса факторов назначается балл. В некоторых моделях предполагается возможность ранжировать основополагающие факторы с указанием их весового значения. Интегральная оценка смыва почвы представляет собой линейную свертку назначенных баллов. В основу данной методики может быть положен математический аппарат нечеткой логики, предусматривающий возможность количественной оценки качественных показателей, которым присуща субъективность [11].

Метод сравнительной оценки – это разновидность метода балльной оценки. Особенностью данной методики является необходимость сравнения количественных данных, полученных в результате вычислительного эксперимента, с эталоном. В результате имеется объективное обоснование полученных данных и выводов. Основным недостатком данного метода заключается в разрозненности оценок взаимосвязанных величин.

Одним из более совершенных приемов считается метод эмпирической оценки смыва, в основу которого положен аналитический аппарат обобщения количественных законов изучаемого процесса. В качестве проблем данного подхода Швец Г.И. указывает отсутствие надежного обоснования структуры расчетной схемы и формально-статистический подход к определению многих критериев расчетной формулы.

Гидромеханический метод в силу возможности раскрытия механизма явления имеет ряд преимуществ, но зачастую это делается без должного изучения динамики процесса. В данном случае необходимо детально рассматривать все исходные условия, что налагает определенные ограничения на механический перенос уже известных выражений на изучаемые процессы и явления.

В настоящее время имеется довольно обширный ряд методик, позволяющих прогнозировать эрозию, а также большое число противоэрозионных мероприятий. Однако в научной литературе не приводится описание обобщенных методик, связующих их в единую последовательность логических или расчетных процедур.

Целью нашего исследования стала разработка обобщенной математической модели эрозионного процесса склоновой подсистемы горного и предгорного ландшафта, алгоритм которой приводится на рисунке.



*Алгоритм построения обобщенной математической модели эрозионного процесса склоновой подсистемы горного и предгорного ландшафта*

Одним из самых распространенных методов определения почвенных потерь является метод, основанный на универсальном уравнении потери почвы [13].

$$A = (0,224) RKLSCP,$$

где  $A$  — потеря почвы в кг/м<sup>2</sup>,  $R$  — фактор эродирующей способности дождя,  $K$  — фактор подверженности почв эрозии,  $L$  — фактор длины склона,  $S$  — фактор уклона,  $C$  — фактор системы ведения растениеводства,  $P$  — фактор борьбы с эрозией.

Факторы длины  $L$  и крутизны  $S$  склона часто рассматриваются как единый топографический фактор  $LS$  или, иначе именуемый, «фактор рельефа». Для склонов со сложным профилем Уишмейером было предложено упрощенное решение, предусматривающее разбиение сложного склона на несколько сегментов, каждый из которых должен иметь ровный уклон и однородный почвенный покров. Значение фактора  $LS$  находится путем деления суммы значений каждого сегмента на полную длину склона.

Данная методика легла в основу действующего государственного стандарта ГОСТ 17.4.4.03-86, введенного в 01.07.1987 г. Настоящий стандарт устанавливает метод определения потенциальной опасности эрозии почв под воздействием дождей с разбивкой по

классам интенсивности для составления карт эрозионной опасности. Метод основан на определении факторов атмосферных осадков, устойчивости почв, длины и крутизны склона, севооборота, агротехники и зависимостей между ними [2].

Модели, в основе которых лежит «универсальное уравнение потерь почвы», обладают большими возможностями в области прогнозирования и планирования противоэрозионных мероприятий, а также довольно просты в применении на практике. В силу этого они получили большое распространение во многих странах и легли в основу исследований, направленных на разработку региональных вариантов этой модели.

В общем виде влияние рельефа на величину смыва почвы со склонов может быть выражено зависимостью [10]:

$$\overline{W}_L = aI^n L^p,$$

где  $\overline{W}_L$  – среднее значение модуля смыва для склона длиной  $L$ ,  $a$ ,  $n$  и  $p$  – эмпирические показатели. По результатам экспериментальных данных было установлено, что величина  $p$  колеблется в диапазоне [0,4; 0,5], а  $n$  – в диапазоне [0,7; 2,2]. Величина  $a$  получена обратным расчетом для набора опытов и осреднена [10].

Экспериментальные исследования и обобщение обширных материалов дают общее выражение для среднего модуля смыва [10]:

$$W_{cp} = aI^n L^{0,5}.$$

Показатель степени при уклоне зависит от эрозионной устойчивости подстилающей поверхности и приводится в таблице.

Зависимость показателя степени крутизны склона от эрозионной устойчивости поверхности

Характер подстилающей поверхности	Почва			
	Чернозем и лесная		Оподзоленная и каштановая	
	несмытая и слабосмытая	средне- и сильносмытая	несмытая и слабосмытая	средне- и сильносмытая
Обработанная поверхность без растительности	1,30	1,35	1,40	1,50
Пропашные культуры	1,15	1,25	1,30	1,35
Стерня и начальные фазы развития густопокровных культур	0,90	1,00	1,00	1,10
Густопокровные культуры	0,85	0,90	0,90	0,95
Многолетние травы, залежь, пастбище	0,80	0,80	0,80	0,80
Лес, луг, целина	0,70	0,70	0,70	0,70

Для осредненных условий, водосбора прямоугольной формы и прямого профиля была получена следующая зависимость:

$$W = 1,5aI^n L^{0,5} [10].$$

Широко применяются модели смыва почв, где в качестве основных факторов эрозионного процесса учитывают длину и крутизну склона либо используют их как интегральный показатель – «фактор рельефа» (Сурмач Г.П., Мирцхулава Ц.Е., Швебс Г.И., Ларионов Г.А. и др.). По заключению Гаршинева Е.А., фактор рельефа  $I^m L^n$  ( $I$  – крутизна,  $L$  – длина склона) является значимым фактором, объединяющим в себе гидрологические и топографические характеристики.

Реализация предложенного выше алгоритма является начальным этапом в построении системы оценки экологической стабильности склоновой подсистемы на основе полученной обобщенной математической модели эрозионного процесса склоновой подсистемы.

### Список литературы

1. Гаршинева Е.А. Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация: Экспериментальная оценка, расчет и проектирование. – Волгоград, 2002. – 220 с.
2. ГОСТ 17.4.4.03-86 Охрана природы. Почвы. Метод определения потенциальной опасности эрозии под воздействием дождей Постановление Госстандарта СССР от 10.11.1986. № 3401.
3. Ламердонов З.Г. Гибкие берегозащитные сооружения, адаптированные к морфологическим условиям рек. – Нальчик: КБГСХА, 2004. – 151с.
4. Ламердонов З.Г. Методология и теория охраны земель от боковой водной эрозии гибкими противозерозионными берегозащитными сооружениями, адаптированными к морфологии рек // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 9. — С. 27–31.
5. Математическое моделирование в гидрологии: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
6. Хаширова Т.Ю. Охрана горных и предгорных ландшафтов управлением твердого стока.– Нальчик: Полиграфсервис и Т, 2007. – 220 с.
7. Хаширова Т.Ю., Апанасова З.В. Применение компьютерного моделирования в проблемах оценки экологического состояния природных ландшафтов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: [www.science-education.ru/120-15355](http://www.science-education.ru/120-15355) (дата обращения: 03.04.2015).
8. Хаширова Т.Ю., Ламердонов З.Г. Охрана горных и предгорных ландшафтов как природно-техногенных комплексов природообустройства // Проблемы региональной экологии. – 2007. – № 5. – С. 15–18 .

9. Хаширова Т.Ю., Ламердонов З.Г., Кузнецов Е.В. Системный подход в решении экологических проблем охраны горных и предгорных ландшафтов управлением твердого стока // Экологические системы и приборы. – 2007. – № 9. – С. 29–33.
10. Швебс Г.И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 184 с.
11. Эдгулова Е.К., Хаширова Т.Ю., Апанасова З.В. Моделирование задачи ранжирования берегозащитных сооружений в условиях неполноты исходной информации // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: [www.science-education.ru/120-16032](http://www.science-education.ru/120-16032) (дата обращения: 03.04.2015).
12. Эрозионные процессы / Под ред. Маккавеева Н.И., Чалова Р.С. – М.: Мысль, 1984. – 256 с.
13. Эрозия почвы / Пер. с англ. И предисловие М.Ф. Пушкарева. М.: Колос, 1984, 415 с.

**Рецензенты:**

Анахаев К.Н., д.т.н., профессор, зам. директора по селевой проблематике ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик;

Ламердонов З.Г., д.т.н., профессор, Кабардино-Балкарский аграрный университет, г. Нальчик.