

УДК 550.461:502.65

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЧВЕННО-ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СКЛОНОВОГО СТОКА

Мельникова Е.А., Лукашов С.В., Иванченкова О.А., Левкина Г.В.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», Брянск,  
e-mail: sergelukashov@yandex.ru

В данной статье авторы попытались описать эрозионные процессы, используя кинетическую модель, базирующуюся на определении изменения высоты слоя почвогрунта, переходящего в склоновый сток. Целью настоящей работы являлось изучение закономерностей протекания водной эрозии с помощью модельных исследований. Рассмотрена схема механизма эродирования почвогрунта, которая отражает процесс перехода исходного почвогрунта в склоновый сток и включает: границы рассматриваемого склона, исследуемое сечение склона, высоту склона почвогрунта, находящегося в естественном состоянии и переходящем в склоновый сток и эрозионный потенциал. Предложена методика искусственного моделирования ливневых осадков на склон, позволяющая исследовать частный случай процесса водной эрозии, когда на склон воздействует поток воды с вышележащей водосборной площади. Сделана попытка описания почвенно-эрозионных процессов при помощи обобщенных параметров кинетики формирования склонового стока. Предложено дифференциальное уравнение для описания эрозионных процессов, отвечающее принципам формальной кинетики. Предложенное уравнение математической модели содержит минимальное число легко определяемых эмпирических констант, которые учитывают максимальное число факторов, воздействующих на процесс эрозии рассматриваемого склона. Для полученных экспериментальных данных построены линеаризованные кривые эрозионных процессов в расчетных створах. Обработка экспериментальных результатов проводилась с помощью математического моделирования с применением компьютерного программного пакета – Mathcad. Авторами настоящей работы предлагается использовать оптимизированную кинетическую модель для моделирования и последующего описания эрозионных процессов на склоновых участках в рассматриваемом сечении, так как данные, полученные на ее основе, хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в процессе полевых исследований.

**Ключевые слова:** эрозия, динамика склонового стока, почвогрунт, водосборная площадь, математическая модель, дифференциальное уравнение, ливневые осадки

## IMPROVING METHODS FOR MODELING SOIL EROSION PROCESSES BASED ON THE KINETIC MODEL OF SLOPE RUNOFF

Melnikova E.A., Lukashov S.V., Ivanchenkova O.A., Levkina G.V.

Bryansk State Engineering-Technological University, Bryansk, e-mail: sergelukashov@yandex.ru

In this article, authors tried to describe erosion processes using a kinetic model based on determining change in height of soil layer that passes into the slope runoff. The purpose this work was to study patterns water erosion using model studies. The scheme of mechanism of flushing of soil, which reflects the transition original soil slope runoff and include: the boundaries of the considered slope of the investigated section of the slope, height of slope a soil in natural state and rolling slope runoff and erosion potential. A method artificial modeling of storm precipitation on slope is proposed, which allows us to study a special case water erosion, when slope is affected by flow of water from overlying catchment area. Attempt has been made to describe soil erosion processes by using generalized parameters of kinetics formation of slope runoff. A differential equation for description erosion processes that meets principles formal kinetics is proposed. The proposed equation of mathematical model contains a minimum number easily determined empirical constants that take into account maximum number of factors affecting process erosion slope under consideration. For the obtained experimental data, linearized curves of erosive processes in calculated gates constructed. The experimental results were processed using mathematical modeling a computer software package – Mathcad. The authors this paper propose use optimized kinetic model for modeling and subsequent description erosion processes on slope sections in section under consideration, since data obtained its basis are in good agreement with experimental data obtained in course field research.

**Keywords:** erosion, slope flow dynamics, soil, catchment area, mathematical model, differential equation, storm precipitation

Почвенная эрозия представляет собой процесс разрушения почвогрунтов под воздействием следующих основных факторов: ветра и водных потоков. Процесс эрозии причиняет большой вред народному хозяйству, например потеря сельскохозяйственных угодий оценивается приблизительно в 2 млрд гектаров, включая около 50 млн гектаров пахотных земель.

Исследования в области изучения эрозионных процессов начались еще с середины прошлого столетия и продолжают до сих пор, так как актуальности эрозия не потеряла: ежегодно обширные площади сельхозугодий, склонов, да попросту отвалов земли подвергаются размыву, выходя из строя.

Большой вклад в разработку способов оценки противоэрозионной стойкости почв

внесли В.Б. Гуссак, Г.И. Швобс, Г.В. Ба-страков, М.С. Кузнецов. В эмпирических моделях деструкции почвы широкое распространение получили относительная оценка противозрозионной устойчивости Иванова В.Д. и Сурмача Г.П. В основном практически все методы дают аналогичные оценки смываемости основных типов почв по зонам [1; 2].

Сложность и трудоемкость измерения количества грунта, подвергающегося эрозии, в полевых условиях предопределили интенсивное развитие исследований в области математического моделирования эрозионных процессов. Первоначально исследователи, не имея достаточного экспериментального материала, в основном брали за основу по большей части элементарные представления о гидравлике склоновых потоков [3; 4].

Среди российских эмпирических моделей эрозионного процесса наиболее популярна разработка В.Д. Иванова, Г.П. Сурмача и Государственного гидрологического института (ГГИ) [5; 6]. Модель ГГИ построена на весьма обширном экспериментальном материале и учитывает зависимость смыва от слоя стока. Испытание этой модели показывает, что разработанные учеными методы имеют неточности, а именно завышают количество грунта, который переходит в склоновый сток, а модель ГГИ занижает данный показатель. Главным дефектом модели ГГИ считается то, что она не учитывает дину склона, а этот факт приводит к тому, что исключается вероятность применения ее для проектирования мер по предотвращению эрозионных процессов. Кроме того, в модели использовано слишком огубленное деление почв по противозрозионной стойкости, а применяемый слой весеннего половодья ликвидирует вероятность учета воздействия физико-химической структуры почвогрунта на динамику склонового стока.

В модели эрозионных процессов, предложенной Г.И. Швобсом [7], предусмотрено воздействие энергии ливня на способность склонов противостоять размывающему действию струй, и предложен механизм, описывающий динамику склонового стока. Недостатком данной модели является то, что данные о зависимости смыва от водоотдачи, определяемые эмпирически по воздействию водного потока на малые площади, скорость которого близка к максимуму, привели к неточности в сторону завышения воздействия интенсивности водоотдачи на смыв.

Ранее мы предложили кинетическую модель описания эрозионных процессов, в основе которой лежат постулаты формальной химической кинетики [8]. Основной эмпирической константой предложенного уравнения является масса грунта, переходящая в склоновый сток в единицу времени. Существенным недостатком предложенной модели является трудоемкость определения массы смываемого грунта в полевых условиях.

В настоящей работе нами предпринята попытка исследовать динамику склонового стока в зависимости от высоты слоя почвогрунта, перешедшего в склоновый сток в рассматриваемом поперечном сечении, и оптимизировать предложенное нами ранее дифференциальное уравнение для описания эрозионных процессов [8].

Цель исследования: оптимизация кинетической модели, описывающей процесс поверхностной эрозии.

#### Материалы и методы исследования

Процесс эрозии моделировали, используя лабораторную дождевальную установку типа ЛДУ-1М [9]. Исследовались почвогрунты, взятые в бассейне реки Десна Трубчевского района.

Зависимость динамики склонового стока от высоты склона в рассматриваемом сечении изучали, используя следующую методику. Грунт предварительно увлажняли до наименьшей влагоемкости, которая показывает количество воды, удерживаемое почвой в практически неподвижном состоянии после обильного полива и стекания гравитационной влаги. Затем формировали искусственный откос для моделирования ливневых осадков на склон.

Исследовали частный случай, когда воздействие водного потока на поверхность отвала грунта происходит таким образом, что объем влаги, размывающий грунт, оказывает воздействие на склон выше первого расчетного створа, а затем устремляется вниз, проходя через расчетные сечения. В данном случае моделируется процесс, происходящий, например, при снеготаянии, когда на склон воздействует поток воды с вышележащей водосборной площади. Измеряли высоту слоя почвогрунта, перешедшего в склоновый сток в контрольном сечении в определенных временных интервалах.

Обработка экспериментальных результатов проводилась с помощью математического моделирования с применением компьютерного программного пакета – Mathcad, по известной методике [10].

### Результаты исследования и их обсуждение

Как было показано нами ранее [8], кинетическая модель эрозионных процессов склонового стока должна учитывать анализ механизма рассматриваемого процесса и составление его схемы, которая отражает переход исходного грунта в склоновый сток.

Схема смыва грунта приведена на рис. 1.

На рассматриваемой схеме представлены следующие элементы:

I-I – верхняя граница склона;

II-II – рассматриваемое вертикальное сечение (расчетный створ);

III-III – нижняя граница склона;

1 – кривые пересечения поверхностей смыва в пространстве с вертикальной плоскостью сечения толщи грунта;

W – высота слоя почвогрунта, находящегося в естественном состоянии в рассматриваемом сечении, см;

Z – высота слоя почвогрунта, перешедшего в склоновый сток в сечении II-II, мм;

$W_m$  – эрозионный потенциал, см/л;

$Z_0$  – высота склона в рассматриваемом сечении, см;

l – расстояние от рассматриваемого сечения II-II до верхней границы склона I-I, см;

L – расстояние от сечения II-II до точки пересечения кривых «1» в разные временные интервалы, см;

0-0 – максимальная мощность слоя грунтов, вовлеченного в эрозионный процесс, см.

Для выражения процесса по схеме:

$$W + Z_0 \rightarrow Z + W_m \quad (1)$$

используем уравнение, описывающее процесс взаимодействия двух компонентов системы

$$\frac{dZ}{dt} = (W_m - Z)Z, \quad (2)$$

где  $\mu$  – комплексный параметр, характеризующий влияние комплекса различного характера факторов на склоновый сток.

Увеличение склонового стока будет равно уменьшению зоны не подвергшегося смыву в результате эрозии грунта, то есть

$$-\frac{dW}{dt} = (W_m - Z)Z. \quad (3)$$

Таким образом, уравнения (2) и (3) описывают процесс взаимодействия двух компонентов системы «W» и «Z».

Интегрируя уравнение (2) при начальных значениях  $t = 0$  и  $Z = Z_0$ , получаем:

$$Z_t = \frac{W_m}{1 + \frac{W_m - Z_0}{Z_0} e^{-\mu W_m t}}. \quad (4)$$

Кинетические кривые могут быть преобразованы в прямую линию, представлением результатов в координатах:

$$\frac{dZ}{dt} \frac{1}{Z} = f(Z)$$

или

$$\frac{d \ln Z}{dt} = f(Z). \quad (5)$$

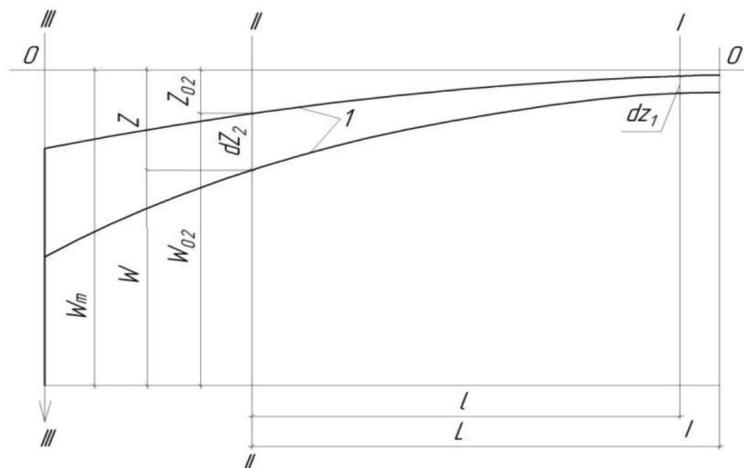


Рис. 1. Схема смыва грунта

Эмпирические константы  $\mu(W_m)$ , которые не изменяются во времени, для данного участка можно определить графически, продифференцировав кинетическую кривую, отражающую изменения толщи незродированного грунта во времени.

При этом средняя скорость изменения склонового стока будет описываться уравнением:

$$\frac{\Delta \ln Z}{\Delta t} = \frac{\ln Z_{t+\Delta t} - \ln Z}{\Delta t}, \quad (6)$$

где  $Z_t, Z_{t+\Delta t}$  – склоновый сток к моментам времени  $t$  и  $t+\Delta t$ .

Подставим в уравнение (6) выражение  $Z_t$  и  $Z_{t+\Delta t}$  из уравнения (4):

$$\frac{\Delta \ln Z}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{1 + \frac{W_m - Z_0}{Z_0} e^{-\mu W_m(t+\Delta t)}}{1 + \frac{W_m - Z_0}{Z_0} e^{-\mu W_m t}}. \quad (7)$$

Из уравнения (4) выразим  $\frac{W_m - Z_0}{Z_0}$  через  $Z$ :

$$\frac{W_m - Z_0}{Z_0} = \frac{W_m - Z}{Z e^{-\mu W_m}}. \quad (8)$$

Преобразуя уравнение (7) относительно (8), получаем:

$$\frac{Z_{t+\Delta t}}{Z_t} = \frac{1}{e^{-\mu W_m} + \frac{Z}{W_m}(1 - e^{-\mu W_m \Delta t})}. \quad (9)$$

При представлении экспериментальных данных в координатах  $f\left(\frac{Z_{t+\Delta t}}{Z_t}\right)$  по оси абсцисс отсекается отрезок, равный высоте слоя почвогрунта, перешедшего в склоновый сток в конце временного периода ( $Z_{CT}$ ), а на оси ординат – отрезок  $(1 - e^{-\mu W_m \Delta t})$ . Отсюда, зная величину  $\Delta t$ , можно найти значение параметра  $\mu W_m$ . При этом необходимо, чтобы интервал времени между измерениями запасов склонового стока был одинаковым на протяжении всего периода измерений.

Проверку достоверности предлагаемой методики описания эрозионных процессов осуществляли, моделируя частный случай, когда воздействие на поверхность отвала почвогрунта происходит таким образом,

что объем влаги, размывающий почвогрунт, действует на склон выше первого расчетного створа, а затем устремляется вниз, проходя через расчетные сечения. В данном случае моделируется процесс, происходящий, например, при снеготаянии, когда на склон воздействует поток воды с вышележащей водосборной площади.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы почвогрунты, характерные для верхнего горизонта дерново-подзолистой почвы как одной из распространенных типов почв Трубчевского района Брянской области.

В качестве метода измерений был выбран метод учета эрозии по замеру высоты слоя почвогрунта, перешедшего в склоновый сток в контрольном сечении, так как с его помощью возможно без сложного оборудования на любом участке поля в первом приближении определять смыв почвогрунта от выпадения одного или нескольких ливней.

Процесс размыва почвогрунта и образование отрицательных форм рельефа заметен уже в первом сечении. При переходе вниз по склону наблюдается тенденция увеличения размыва почвогрунта, глубина борозд растет как в глубину, так и в ширину. В последнем расчетном створе наблюдается четкое слияние отдельных борозд в единый поток.

Экспериментальные данные размыва поверхности почвогрунта через одинаковые промежутки времени, равные пяти минутам, наносили на график. Примеры определения параметров  $Z, W_m, \mu W_m$  по экспериментальным данным приведены на рис. 2.

Полное время протекания эрозионного процесса можно установить, используя уравнение:

$$t = \frac{1}{\mu W_n} \ln \frac{Z_K(Z_0 - Z_{CT})}{Z_0(Z_K - Z_{CT})}, \quad (10)$$

где  $Z_K$  – высота слоя почвогрунта, перешедшего в склоновый сток в конце временного периода, мм;

$Z_{CT}$  – высота слоя почвогрунта, перешедшего в склоновый сток в стационарном периоде процесса, мм.

Модель смыва грунта в процессе эрозии имеет вид:

$$Z_t = \frac{Z_\infty}{1 + \frac{Z_\infty - Z_0}{Z_0} e^{-\mu W_m t}}. \quad (11)$$

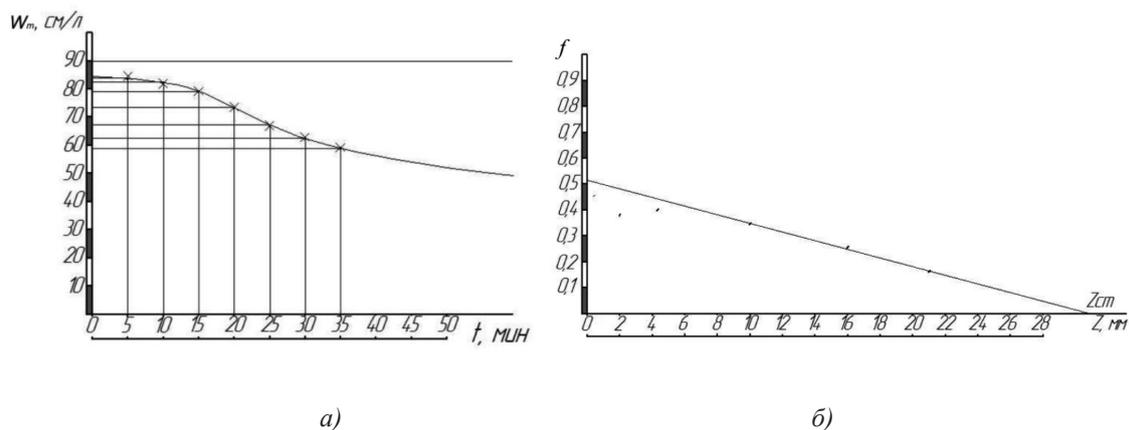


Рис. 2. а) кривая динамики эрозионного процесса в расчетном створе, б) линеаризованная кривая эрозионного процесса в расчетном створе

### Выводы

1. Исследованы закономерности динамики склонового стока в зависимости от высоты склона в рассматриваемом поперечном сечении.

2. Оптимизирована кинетическая модель описания эрозионного процесса грунта, предложено дифференциальное уравнение, в котором основной определяемой константой является высота склона.

3. Полученные значения в результате теоретических расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет рекомендовать оптимизированную кинетическую модель для прогнозирования эрозионных процессов.

### Список литературы / References

1. Сухановский Ю.П., Санжарова С.И., Вытовтов В.А., Прущик А.В., Титов А.Г. Прогресс за 50 лет в моделировании эрозии почвы // Сборник докладов Международной научно-практической конференции и Школы молодых ученых, посвящённых Году экологии и 50-летию выхода Постановления о борьбе с эрозией почвы. Курск: ООО «ТОП+», 2017. С. 18–25.

Sukhanovsky Yu. P., Sanzharova S.I., Vytovtov V.A., Pimple A.V., Titov A.G. Progress over 50 years in modeling soil erosion // Collection of reports of the International scientific and practical conference and School of young scientists dedicated to the year of ecology and the 50th anniversary of the Resolution on combating soil erosion. Kursk: «TOP+», 2017. P. 18–25 (in Russian).

2. Шевченко Д.А., Сивоконь Ю.В. Влияние стока талых вод на водную эрозию почвы // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 7–2 (38). С. 133–135.

Shevchenko D.A., Sivokon Yu. V. Influence of melt water runoff on water soil erosion // Mezhdunarodny'j nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2015. № 7–2 (38). P. 133–135 (in Russian).

3. Кузнецова П.С. Механизмы процесса ручейковой эрозии // Сборник докладов Международной научно-практической конференции и Школы молодых ученых, посвящённых Году экологии и 50-летию выхода Постановления о борьбе с эрозией почвы. Курск: ООО «ТОП+», 2017. С. 58–62.

Kuznetsova P.S. Mechanisms of stream erosion process // Collection of reports of the International scientific and practical

conference and School of young scientists dedicated To the year of ecology and the 50th anniversary of the Resolution on combating soil erosion. Kursk: «TOP+», 2017. P. 58–62 (in Russian).

4. Танасиенко А.А., Чумбаев А.С., Якутина О.П., Миллер Г.Ф. Условия и интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов в лесостепи Предсалаирья // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1397–1408. DOI: 10.7868/S0032180X13110099.

Tanasiyenko A.A., Chumbaev A.S., Yakutina O.P., Miller G.F. Conditions and intensity of erosion-accumulative processes in the forest-steppe of the pre-Siberian Region // Pochvovedenie. 2013. № 11. P. 1397–1408 (in Russian).

5. Сурмач Г.П. Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозионные мероприятия. Волгоград, 1992. 175 с.

Surmach G.P. Relief Formation, forest-steppe formation, modern erosion and anti-erosion measures Volgograd, 1992. 175 p. (in Russian).

6. Извеков А.С. Защита почв от эрозии и воспроизводство их плодородия в южных степных и лесостепных районах России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2012. № 70. С. 79–95.

Izvekov A.S. Protection of soils from erosion and reproduction of their fertility in the southern steppe and forest-steppe regions of Russia // Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva. 2012. № 70. P. 79–95 (in Russian).

7. Швец Г.И. Теоретические основы эрозиоведения. Киев: Вища школа, 1991. 222 с.

Shvebs G.I. Theoretical bases of erosivity. Kiev: Vishha shkola, 1991. 222 p. (in Russian).

8. Мельникова Е.А., Лукашов С.В. Использование постулатов формальной кинетики для описания процесса поверхностной водной эрозии // Успехи современного естествознания. 2019. № 1. С. 99–103.

Melnikova E.A., Lukashov C.V. using the postulates of formal kinetics to describe the process of surface water erosion // Advances in current natural sciences. 2019. № 1. P. 99–103 (in Russian).

9. Комиссаров М.А. Эрозия почвы при орошении мобильными дождевальными установками // Мелиорация и водное хозяйство. 2011. № 3. С. 32–34.

Komissarov M.A. Soil erosion at an irrigation mobile water-sprinklers // Melioraciya i vodnoe khozyajstvo. 2011. № 3. P. 32–34 (in Russian).

10. Иванченкова О.А., Гамазин В.П., Луцевич А.А. Оценка состояния территории, загрязненной в результате аварии на магистральном нефтепроводе // Успехи современного естествознания. 2019. № 7. С. 82–87.

Ivanchenkova O.A., Gamazin V.P., Lutsevich A.A. Assessment of the state of the territory polluted as a result of the accident on the main oil pipeline // Advances in current natural sciences. 2019. № 7. P. 82–87 (in Russian).