

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.459.2

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-3-169-185

Моделирование потенциальной опасности водной эрозии почв

Александр Игнатьевич Караев¹, Людмила Николаевна Толстолик²,
Станислав Юрьевич Радев³

^{1, 2, 3}Мелитопольский государственный университет, Мелитополь, Российская Федерация

¹akaraiev57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5134-1727>

²l.tolstolik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3752-1008>

³stacyck@yandex.ru

Аннотация. Цель: создание цифровых моделей факторов водной эрозии почв в виде параметрических поверхностей отклика и систем точечных уравнений и установление функциональных связей между ними и геометрическими параметрами микро- и нанорельефа участка поверхности почвы. **Материалы и методы.** В основу способа моделирования эрозионных процессов положены материалы и методы математического аппарата точечного исчисления, которые позволяют представлять эрозионные процессы, вызванные совокупностью факторов потенциальной опасности, в виде их точечных аналогов – поверхностей отклика и систем точечных уравнений. Отмечено, что применение точечного исчисления для построения поверхностей отклика данного типа позволяет уйти от громоздких математических моделей и дает возможность получать числовые значения в любой точке анализируемой поверхности. **Результаты.** Получены формализованные геометрические модели поверхностей отклика и системы точечных уравнений факторов: формирование толщины слоя осадков, стока воды и поглощение ее почвой в произвольной точке поверхности земельного участка. **Выводы.** Полученные модели факторов процесса водной эрозии почв являются математической основой для разработки цифровых моделей микро- и нанорельефа поверхности полей с возможным применением технологий спутникового дистанционного зондирования Земли сервиса ВЕГА-Science. Отмечена необходимость разработки моделей скорости потока воды в произвольной точке поверхности, углов и длины склона, растительности и севооборотов и эффективности противоэрозионных мероприятий, что позволит создать цифровую систему мониторинга по определению потенциальной опасности водной эрозии почв.

Ключевые слова: точечное исчисление, моделирование эрозии почв, поверхность отклика, интенсивность осадков, продолжительность выпадения осадков, дистанционное зондирование земли, рельеф поля

Для цитирования: Караев А. И., Толстолик Л. Н., Радев С. Ю. Моделирование потенциальной опасности водной эрозии почв // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 3. С. 169–185. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-169-185>.

Сведения о научно-исследовательской работе, по результатам которой публикуется статья: работа выполнена и финансировалась в рамках Государственного задания по теме: «Рациональное использование природных ресурсов и повышение устойчивости агроценозов», регистрационный номер НИОКТР: 124040200008-7.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Modeling the potential hazard of water erosion of soils

Alexander I. Karaiev¹, Lyudmila N. Tolstolik², Stanislav Y. Radev³

^{1, 2, 3}Melitopol State University, Melitopol, Russian Federation

¹akaraiev57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5134-1727>

²l.tolstolik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3752-1008>

³ctacyck@yandex.ru

Abstract. Purpose: to create digital models of water erosion factors in the form of parametric response surfaces and systems of point equations and to determine functional links between them and the geometric parameters of the micro- and nanorelief of a soil surface area. **Materials and methods.** The method for modeling erosion processes is based on the materials and methods of the mathematical apparatus of point calculus, which make it possible to represent erosion processes caused by a set of potential hazard factors in the form of their point analogs – response surfaces and systems of point equations. It is noted, that the use of point calculus for constructing response surfaces of this type allows getting away from cumbersome mathematical models and makes it possible to obtain numerical values at any point on the analyzed surface. **Results.** Formalized geometric models of response surfaces and systems of point equations of factors were obtained: formation of sediment layer thickness, water runoff and its absorption by soil at an arbitrary point on the surface of a land plot. **Conclusions.** The obtained models of factors of the water erosion process of soils are a mathematical basis for the development of digital models of micro- and nanorelief of the surface of fields with the possible use of satellite remote sensing technologies of the Earth of the VEGA-Science service. The need to develop models of water flow velocity at an arbitrary point on the surface, slope angles and length, vegetation and crop rotations and the effectiveness of anti-erosion measures is noted, which will allow creating a digital monitoring system to determine the potential danger of water erosion of soils.

Keywords: point calculus, soil erosion modeling, response surface, precipitation intensity, precipitation duration, remote sensing, field terrain

Information about the research work, on results of which the article is published: the work has been carried out and financed within the framework of the State assignment on the theme: “Rational use of natural resources and increasing the sustainability of agrocenoses”, registration number NIOKTR is: 124040200008-7.

For citation: Karaiev A. I., Tolstolik L. N., Radev S. Y. Modeling the potential hazard of water erosion of soils. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(3):169–185. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-169-185>.

Введение. Эрозия почвы под воздействием воды и ветра является одной из основных причин деградации агроландшафтов и может быть вызвана естественными и антропогенными причинами. Эрозионные процессы снижают агрономические характеристики почвенного покрова, приводят к переуплотнению почв, ухудшению их структуры и водоудерживающей

способности. Проблема деградации почв носит глобальный характер [1] и вызывает озабоченность и особую тревогу мирового сообщества¹.

Эрозия почв, возникающая из-за образования стока воды, может приводить к смыву до 10 т безвозвратно утраченной плодороднейшей почвы с 1 га [2]. Сопоставление интенсивности смыва с пахотных земель и эрозионного потенциала рельефа свидетельствует, что зональный фактор – морфология рельефа – является ведущим для развития земледельческой эрозии на всех масштабных уровнях [3], а определение степени эрозионной опасности агроландшафтов является неотъемлемой частью разрабатываемых противоэрозионных мероприятий.

Эффективным способом охраны почв от эрозии является создание эрозионно-устойчивых агроландшафтов, базирующихся на системе почвозащитных мелиоративных мероприятиях постоянного действия [4]. При всех преимуществах такой методики ее недостатком является то, что она не предполагает проведения количественной оценки эффективности проекта почвозащитного обустройства агроландшафтной территории.

Количественную оценку можно получить путем прогноза с помощью моделирования эрозионной опасности, существующей на конкретной территории, при условии реализации проекта ее почвозащитного обустройства [5–7]. Анализ существующих моделей эрозии почв показал, что модель WEPP (Water Erosion Prediction Project), разработанная Национальной лабораторией эрозии почв США [8], в наибольшей степени отвечает ее применимости для условий степной зоны юга России. Однако реализация данной модели на практике является трудоемкой и требует значительных затрат временных ресурсов.

С учетом развития цифровых технологий и исходя из вышесказанно-

¹«Конвенция Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием в тех странах, которые испытывают серьезную засуху и/или опустынивание, особенно в Африке» [Электронный ресурс]. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

го следует, что определение потенциальной опасности водной эрозии почв под воздействием дождей возможно проводить путем разработки цифровых моделей микро- и нанорельефа полей и составления карт их эрозионной опасности с отметками классов интенсивности водной эрозии почв, установленных ГОСТ 17.4.4.03-86².

На наш взгляд, эффективным инструментом разработки цифровых моделей полей может стать математический аппарат точечного исчисления [9]. Данный математический аппарат позволяет представить описание эрозионных процессов, вызванных совокупностью факторов, в виде точечных аналогов – поверхностей отклика и систем точечных по координатным уравнений.

Целью исследований является автоматизация процесса прогнозирования потенциальной опасности водной эрозии почв в агроландшафтах путем создания цифровых моделей факторов водной эрозии в виде параметрических поверхностей отклика и систем точечных уравнений, установления функциональных связей между ними и геометрическими параметрами формы микро- и нанорельефа контролируемого участка поверхности почвы.

Объектом исследования являлись процессы мониторинга развития водной эрозии почв агроландшафтов под воздействием дождей. Предметом исследования были закономерности представления факторов потенциальной опасности водной эрозии в виде формализованных геометрических моделей поверхностей отклика и систем точечных уравнений.

Материалы и методы. В рамках данных исследований моделировался фактор эродирующей способности дождей (образование толщины слоя осадков и интенсивность поглощения воды почвой), принятый ГОСТ 17.4.4.03-86².

²ГОСТ 17.4.4.03-86 (СТ СЭВ 5300-85) Охрана природы. Почвы. Методы определения опасности эрозии под воздействием дождей [Электронный ресурс]. Введ. 1987-07-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

Для представления данного фактора в виде поверхностей откликов применен математический аппарат точечного исчисления, который позволяет представлять любые геометрические объекты (процессы) в виде точечных уравнений и вычислительных алгоритмов – упорядоченным множеством точечных уравнений. Это, в свою очередь, дает возможность в системах однотипных параметрических точечных уравнений, которые являются символьной записью, сохранить геометрический смысл параметров изначального алгоритма.

Такие системы точечных уравнений и разработанные на их основе вычислительные алгоритмы удобны для программирования на ЭВМ. Также применение вычислительных алгоритмов точечного исчисления позволяет охватить большое количество исходных точек, на основе которых моделируется поверхность отклика геометрического объекта (процесса), используя при этом алгебраические кривые низших порядков [10], которые удобны для вычислений благодаря тому, что их свойства и особенности проще изучать и анализировать.

Следует отметить, что точечное исчисление позволяет моделировать геометрические формы любой сложности с заданными свойствами с помощью метода подвижного симплекса [10]. Данный метод позволяет устанавливать зависимости между несколькими факторами, что, в свою очередь, делает возможным моделировать процессы потенциальной опасности эрозии почв с учетом n -го множества факторов.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим построение формализованных геометрических моделей поверхностей отклика процессов образования толщины слоя осадков и интенсивности поглощения воды почвой, отображающие фактор эродирующей способности дождей, и получение соответствующих систем точечных уравнений данных процессов.

Моделирование толщины слоя осадков Δ проведено путем построения параметрической поверхности отклика по значениям девяти точек по-

верхности, переменными которого являются интенсивность C и продолжительность дождя t . Соотношения данных переменных и определение значений толщины слоя осадков Δ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Определение значений толщины слоя выпавших осадков Δ
В мм

Table 1 – Determination of the values of precipitation Δ layer thickness
In mm

Продолжительность дождя t , ч	Интенсивность дождя C , мм/мин		
	C_0	C_1	C_2
t_0	Δ_{00}	Δ_{01}	Δ_{02}
t_1	Δ_{10}	Δ_{11}	Δ_{12}
t_2	Δ_{20}	Δ_{21}	Δ_{22}

Для построения поверхности отклика толщины слоя осадков Δ приняты такие значения переменных C и t (значения C приняты ГОСТ 53613-2009³):

- $C_2 = 1,66$ мм/мин – соответствует ливневому типу дождя;
- $C_1 = 0,25$ мм/мин – соответствует интенсивному типу дождя;
- $C_0 = 0$ – осадки отсутствуют;
- $t_0 = 0$; $t_1 = 0,5$ ч, $t_2 = 1$ ч.

Это позволяет получить поверхность отклика, которая учитывает возможные варианты соотношения между переменными C и t . При этом система точечных уравнений для определения слоя осадков будет имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta_0 = \Delta_{00}\bar{u}(1-2u) + 4\Delta_{10}u\bar{u} + \Delta_{20}u(2u-1) \\ \Delta_1 = \Delta_{01}\bar{u}(1-2u) + 4\Delta_{11}u\bar{u} + \Delta_{21}u(2u-1) \\ \Delta_2 = \Delta_{02}\bar{u}(1-2u) + 4\Delta_{12}u\bar{u} + \Delta_{22}u(2u-1) \\ \Delta_T = \Delta_0\bar{v}(1-2v) + 4\Delta_1v\bar{v} + \Delta_2v(2v-1) \end{cases} \quad (1)$$

где Δ_0 – значение слоя осадков в конкретной точке полинома (направляющей), которая проходит через точки: Δ_{00} , Δ_{10} , Δ_{20} ;

³ГОСТ Р 53613-2009. Воздействие природных внешних условий на технические изделия. Общая характеристика. Осадки и ветер. Введ. 2011-01-01. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.

Δ_{00} – значение слоя выпавших осадков при заданной интенсивности и продолжительности дождя;

u – параметр точечного уравнения $\bar{u} = 1 - u$, при построении соответствует значениям оси абсцисс, характеризующий время продолжительности осадков t ;

Δ_T – текущее значение точки, формирующей образующую дугу сегмента поверхности отклика слоя осадков, построенной по направляющим $\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2$.

v – параметр точечного уравнения $\bar{v} = 1 - v$, при построении соответствует значениям оси ординат, характеризующий интенсивность осадков C ;

С учетом допущения того, что количество осадков по всей поверхности остается постоянным, изменение толщины слоя осадков может быть представлено поверхностью отклика $\Delta(C, t)$ (рисунок 1).

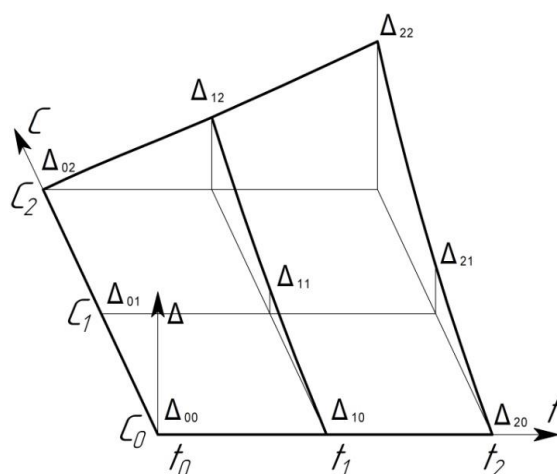


Рисунок 1 – Геометрическая модель поверхности отклика толщины слоя осадков $\Delta(C, t)$

Figure 1 – Geometric model of the response surface of the precipitation layer thickness $\Delta(C, t)$

Моделирование поглощения воды почвой Δ^n проведено путем построения параметрической поверхности отклика, характеризующей способность почвы поглощать воду. Для построения такой поверхности рассчитаем меру поглощения Δ_{ij}^n в обозначенных девяти точках (таблица 1).

Согласно модели (рисунок 1), система точечных уравнений для построения поверхности отклика поглощения воды имеет вид:

$$\begin{cases} \Delta_0^n = \Delta_{00}^n \bar{u}(1-2u) + 4\Delta_{10}^n u\bar{u} + \Delta_{20}^n u(2u-1) \\ \Delta_1^n = \Delta_{01}^n \bar{u}(1-2u) + 4\Delta_{11}^n u\bar{u} + \Delta_{21}^n u(2u-1) \\ \Delta_2^n = \Delta_{02}^n \bar{u}(1-2u) + 4\Delta_{12}^n u\bar{u} + \Delta_{22}^n u(2u-1) \\ \Delta^n = \Delta_0^n \bar{v}(1-2v) + 4\Delta_1^n v\bar{v} + \Delta_2^n v(2v-1) \end{cases} \quad (2)$$

Модель поверхности отклика процесса поглощения воды почвой представлена на рисунке 2.

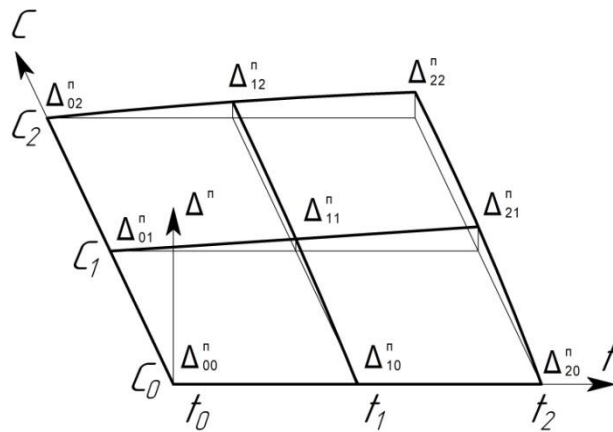


Рисунок 2 – Поверхность отклика поглощения воды почвой
Figure 2 – Soil water absorption response surface

Следует отметить, что данную модель процесса поглощения воды почвой можно считать рабочей в том случае, если значения, полученные экспериментально, будут находиться в пределах допустимой погрешности моделируемого процесса.

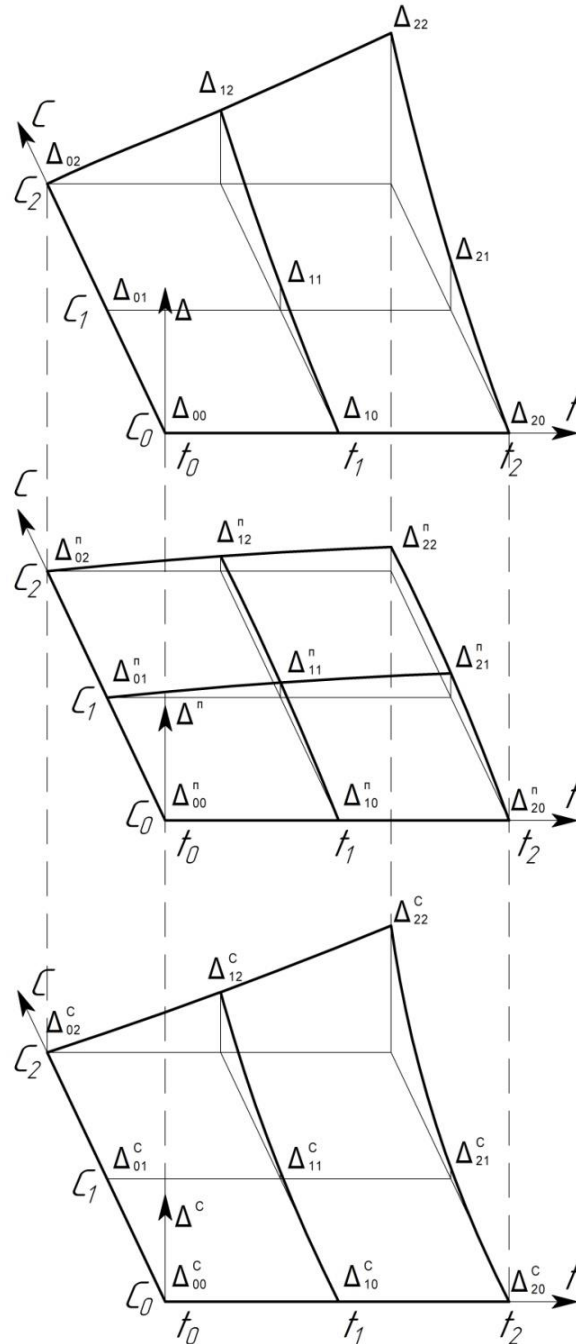
С учетом того, что слой стока воды является частью слоя осадков без учета доли поглощенной почвой воды, Δ^C определяется в мм из выражения:

$$\Delta^C = \Delta - \Delta^n, \quad (3)$$

где Δ – толщина слоя осадков;

Δ^n – толщина слоя осадков, поглощаемого почвой.

Формирование поверхностей отклика процесса поглощения воды почвой и определение слоя стока Δ^C приведено на рисунке 3.



C – интенсивность осадков; t – продолжительность осадков

C – precipitation intensity; t – precipitation duration

Рисунок 3 – Формирование поверхностей отклика поглощения воды почвой Δ^n и образования слоя стока Δ^C

Figure 3 – Formation of response surfaces of water absorption by soil Δ^n and formation of runoff layer Δ^C

Следует отметить, что если скорость поглощения единицы объема осадков больше скорости поступления осадков такого же объема, то сток воды формироваться не будет.

Точечные уравнения для построения направляющих поверхности отклика стока воды имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\Delta^{C0} &= \Delta_{00}^C \cdot (1-u) \cdot (1-2 \cdot u) + 4 \cdot \Delta_{10}^C \cdot u \cdot (1-u) + \Delta_{20}^C \cdot u \cdot (2 \cdot u - 1), \\ \Delta^{C1} &= \Delta_{01}^C \cdot (1-u) \cdot (1-2 \cdot u) + 4 \cdot \Delta_{11}^C \cdot u \cdot (1-u) + \Delta_{21}^C \cdot u \cdot (2 \cdot u - 1), \\ \Delta^{C2} &= \Delta_{02}^C \cdot (1-u) \cdot (1-2 \cdot u) + 4 \cdot \Delta_{12}^C \cdot u \cdot (1-u) + \Delta_{22}^C \cdot u \cdot (2 \cdot u - 1).\end{aligned}\quad (4)$$

Точечное уравнение поверхности отклика стока воды в развернутом виде имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\Delta^C &= \Delta_{00}^C \cdot (1-u) \cdot (1-2 \cdot u) + 4 \cdot \Delta_{10}^C \cdot u \cdot (1-u) + \Delta_{20}^C \cdot u \cdot (2 \cdot u - 1) \cdot (1-v) \cdot (1-2 \cdot v) + \\ &+ 4 \cdot \Delta_{01}^C \cdot (1-u) \cdot (1-2 \cdot u) + 4 \cdot \Delta_{11}^C \cdot u \cdot (1-u) + \Delta_{21}^C \cdot u \cdot (2 \cdot u - 1) \cdot v \cdot (1-v) + \\ &+ \Delta_{02}^C \cdot (1-u) \cdot (1-2 \cdot u) + 4 \cdot \Delta_{12}^C \cdot u \cdot (1-u) + \Delta_{22}^C \cdot u \cdot (2 \cdot u - 1) \cdot v \cdot (2 \cdot v - 1).\end{aligned}\quad (5)$$

В уравнении (5) параметры u и v однозначно определяют поверхность, проходящую через девять наперед заданных точек. Значения данных параметров изменяются в пределах от 0 до 1. Шкала нормированных значений параметра интенсивности осадков v приведена в таблице 2, а значение нормированного параметра u соответствует значению продолжительности осадков t .

Таблица 2 – Шкала нормированных значений интенсивности осадков C
Table 2 – Scale of normalized values of precipitation intensity C

Интенсивность дождя C , мм/мин	Нормированное значение параметра v
0	0
0,166	0,1
0,332	0,2
0,498	0,3
0,664	0,4
0,83	0,5
0,996	0,6
1,162	0,7
1,328	0,8
1,494	0,9
1,66	1,0

Функциональные зависимости, характеризующие изменение толщины стока воды различной интенсивности дождя и его продолжительности, приведены на рисунке 4.

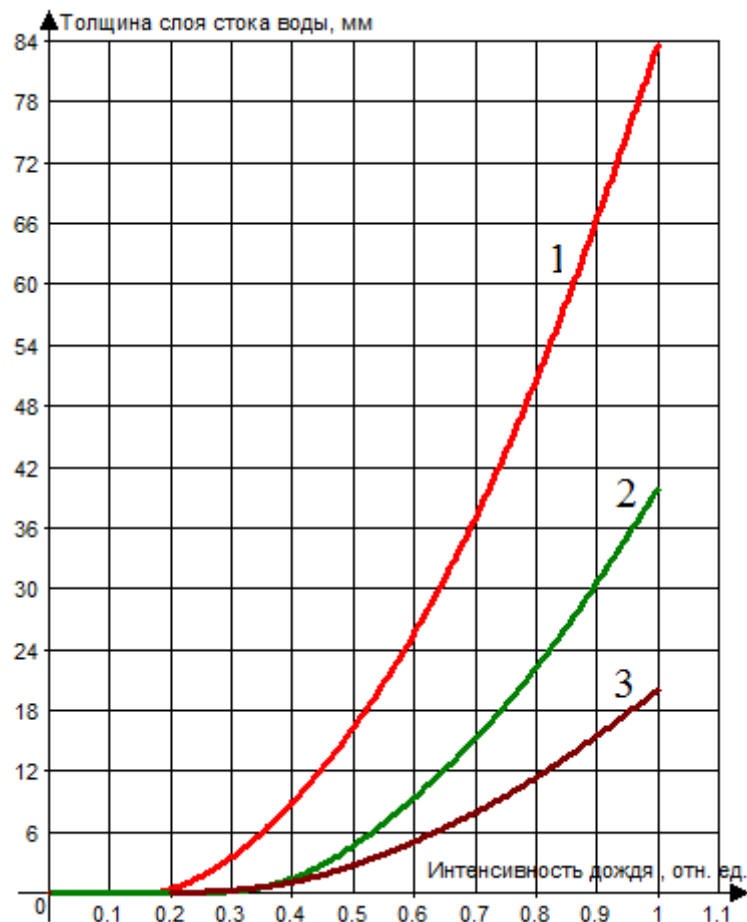


Рисунок 4 – Характеристика процесса формирования слоя стока воды Δ^C в зависимости от интенсивности дождя C для продолжительности t : 1 – 1 ч; 2 – 0,5 ч; 3 – 0,25 ч
Figure 4 – Characteristics of the process of water runoff layer Δ^C formation depending on the rain intensity C for duration t : 1 – 1 h; 2 – 0.5 h; 3 – 0.25 h

Зависимости, приведенные на рисунке 4, отображают физический смысл направляющих кривых линий Δ_{20}^C , Δ_{21}^C , Δ_{22}^C (рисунок 3) и позволяют вычислить значение толщины слоя стока воды в любой точке поверхности отклика для значений интенсивности дождя, приведенных в таблице 2, но только для продолжительности дождя $t = 1; 0,5; 0,25$ ч.

Численные значения величины стока можно определить по уравнениям данных зависимостей (6), (7) и (8) соответственно:

$$Y1(x) = -(5,9374657 \cdot 10^{-13}) \cdot x^5 + (1,4490146 \cdot 10^{-12}) \cdot x^4 - (1,2185275 \cdot 10^{-12}) \cdot x^3 + 102,4 \cdot x^2 - 18,8 \cdot x - (1,4571677 \cdot 10^{-16}), \quad (6)$$

$$Y2(x) = 225,2083333 \cdot x^5 - 630,5833333 \cdot x^4 + 639,5916667 \cdot x^3 - 216,8966667 \times \\ \times x^2 + 22,4 \cdot x - (4,5010292 \cdot 10^{-15}), \quad (7)$$

$$Y3(x) = 81,7708333 \cdot x^5 - 228,9583333 \cdot x^4 + 232,2291667 \cdot x^3 - 71,9416667 \cdot x^2 + \\ + 6,8 \cdot x - (1,6751646 \cdot 10^{-15}). \quad (8)$$

Исходными значениями для построения уравнений полиномов (6), (7) и (8) являются данные, взятые с поверхностей отклика, построенных по точечным уравнениям. В частности было использовано уравнение (5) для получения массивов точек, принадлежащих кривым Δ_{20}^C , Δ_{21}^C , Δ_{22}^C (рисунок 3), что соответствует значениям толщины слоя стока при продолжительности дождя 1 ч. Аналогично были получены массивы значений для построения уравнений полиномов при продолжительности дождя 0,25 и 0,5 ч.

Данные уравнения позволяют определять слой стока воды для заданного значения продолжительности дождя, которые имеют дискретный характер (в данном случае – 1; 0,5 и 0,25 ч). Для определения промежуточных значений необходимы дополнительные уравнения.

Моделирование потенциальной водной эрозии с использованием точечного исчисления позволяет формировать поверхности отклика физических процессов с охватом большого количества исходных точек и получать значения в любой точке поверхности, на основе которых моделируется искомый многопараметрический геометрический объект, с использованием при этом алгебраических кривых низших порядков.

Применение таких кривых при построении поверхностей отклика в реализуемом программном коде позволяет увеличить скорость выполнения расчетных операций, снизить затраты памяти, дискового пространства и процессорного времени, что дает возможность применять полученное программное обеспечение на ПК с ограниченными характеристиками. При этом структура получаемой программы становится более понятной и поддерживаемой.

Точность предлагаемых моделей формирования поверхностей отклика толщины слоя осадков, поглощения воды почвой и слоя стока воды в значительной степени зависит от плотности точек построения как параметрических поверхностей отклика, так и поверхностей микро- и нанорельефа полей.

В данных исследованиях построение поверхностей отклика проведены по значениям девяти точек (таблица 1), для повышения точности следует увеличивать кратность плотности точек. Также для повышения точности расчетов поверхностей микро- и нанорельефа полей съемку следует проводить методами, обеспечивающими необходимую плотность пикетных точек с учетом результатов физических моделей процесса эрозии почв [7].

Получены модели систем точечных уравнений и поверхностей отклика для вычисления значений фактора эродирующей способности дождей (образование толщины слоя осадков и интенсивность поглощения воды почвой), принятого ГОСТ 17.4.4.03-86².

В дальнейшем следует разработать модели факторов:

- податливости почв эрозии;
 - длины и крутизны склона (определение скорости потока воды в произвольной точке поверхности);
 - растительности и севооборота;
 - эффективности противоэрозионных мероприятий,
- что позволит:

1) создать целостную систему мониторинга по определению подверженности полей развитию водной эрозии под воздействием дождей на мелиорированных землях;

2) проводить оптимальное размещение постов контроля плодородия почв по площади поля;

3) оценивать природоресурсный потенциал агроландшафтов и своевременно проводить соответствующие противоэрозионные мероприятия

с использованием методологии создания информационных систем в землеустройстве [11].

Выводы. Полученные формализованные геометрические модели факторов потенциальной опасности водной эрозии почв являются математической основой цифровых моделей микро- и нанорельефа поверхности полей с применением технологий спутникового дистанционного зондирования Земли для определения координат высотных пикетов и интенсивности растительного покрова.

Применение цифровой модели рельефа полей в качестве базовых данных для построения поверхностей отклика позволяет моделировать развитие потенциальной опасности водной эрозии в условиях, максимально приближенных к реальным.

Список источников

1. Bourema D. Modeling of Soil Erosion by Water in the Provinces of Sikasso and Koulikoro (Republic of Mali) // *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2021. Vol. 7, no. 2. P. 36–48. DOI: 10.17071/2410-8553-2021-2-36-48. EDN: NKRVWO.
2. Попов Л. Г., Кухарук Е. С. Современное состояние и перспективы развития исследований по защите почв от эрозии в Республике Молдова // *Сахаровские чтения 2020 года: экологические проблемы XXI века: материалы 20-й междунар. науч. конф., г. Минск, 21–22 мая 2020 г. В 2 ч. Ч. 1.* Минск: ИВЦ М-ва финансов Респ. Беларусь, 2020. С. 284–287. DOI: 10.46646/SAKH-2020-1-284-287. EDN: EXDNMF.
3. Литвин Л. Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России / Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Географ. фак. М.: Академкнига, 2002. 255 с.
4. Рулев А. С., Юферев В. Г., Юферев М. В. Геоинформационные исследования эрозионной деградации в агроландшафтах // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2013. № 2(30). С. 84–88. EDN: QCWVEJ.
5. Подлесных И. В., Зарудная Т. Я. К усовершенствованию теоретических основ противоэрозионной организации территории сельхозпредприятий для формирования экологически сбалансированных агроландшафтов в системах земледелия Центрального Черноземья // *Вестник Курской сельскохозяйственной академии*. 2017. № 6. С. 13–18. EDN: ZIZQSH.
6. Ермолаев Н. Р., Юдин С. А., Белобров В. П. Оценка потенциала водной эрозии почв Ставропольского края на основе факторной модели RUSLE // *Сельскохозяйственный журнал*. 2019. № 3(12). С. 1–12. DOI: 10.25930/0372-3054/001.3.12.2019. EDN: SVYBBG.
7. Сухановский Ю. П., Прущик А. В. Моделирование водной эрозии почв: монография. Курск: КФАНЦ, 2023. 175 с.
8. Котова М. М. Количественная оценка эрозионной опасности с использованием ГИС и модели эрозии WEPP // *Теоретические и прикладные вопросы изучения и ис-*

пользования почвенно-земельных ресурсов: тезисы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию кафедры почвоведения БГУ, 16–20 сент. 2003 г. / отв. ред. В. С. Аношко. Минск: БГУ, 2003. С. 152–155.

9. Балюба И. Г., Конопацкий Е. В. Точечное исчисление. Историческая справка и основополагающие определения // Физико-техническая информатика (СРТ 2020): материалы 8-й Междунар. конф., Пушкино, Московская обл., 9–13 нояб. 2020 г. Нижний Новгород: НИЦ физ.-техн. информатики, 2020. Ч. 2. С. 321–327. DOI: 10.30987/conferencearticle_5fd755c0adb1d9.27038265. EDN: DOMLNV.

10. Конопацкий Е. В. Подход к построению геометрических моделей многофакторных процессов многомерной интерполяции // Программная инженерия. 2019. Т. 10, № 2. С. 77–86. DOI: 10.17587/prin.10.77-86. EDN: POFNKR.

11. Лавренникова О. А., Крылова А. А. Методология проектирования информационных систем в землеустройстве при расчетах смыва почвы от водной эрозии // Инновационное развитие землеустройства: сб. науч. тр. Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., г. Кинель, 29 марта 2024 г. Самара: ИБЦ Самарского ГАУ, 2024. С. 179–190. EDN: ZWVMIA.

References

1. Bourema D., 2021. Modeling of Soil Erosion by Water in the Provinces of Sikasso and Koulikoro (Republic of Mali). *Anthropogenic Transformation of Nature*, vol. 7, no. 2, pp. 36–48, DOI: 10.17071/2410-8553-2021-2-36-48, EDN: NKRWHO.

2. Popov L.G., Kuharuk E.S., 2020. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya issledovaniy po zashchite pochv ot erozii v Respublike Moldova* [Current status and development prospects of studies research on soil protection against erosion in the Republic of Moldova]. *Sakharovskie chteniya 2020 goda: ekologicheskie problemy XXI veka: materialy 20-oy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Sakharov Readings 2020: Environmental Problems of the 21st Century: Proceed. of the 20th International Scientific Conference]. In 2 parts, pt 1. Minsk, Institute of Agricultural Sciences of the Republic of Belarus, pp. 284–287, DOI: 10.46646/SAKH-2020-1-284-287, EDN: EXDNMF. (In Russian).

3. Litvin L.F., 2002. *Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii* [Geography of Soil Erosion on Agricultural Lands in Russia]. Moscow State University named after M. V. Lomonosov, Geographical faculty. Moscow, Akademkniga Publ., 255 p. (In Russian).

4. Rulev A.S., Yuferov V.G., Yuferov M.V., 2013. *Geoinformatsionnye issledovaniya erozionnoy degradatsii v agrolandshaftakh* [Geoinformation studies of erosion degradation in agricultural landscapes]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bullet. of the Lower Volga Agrarian University Complex: Science and Higher Education], no. 2(30), pp. 84–88, EDN: QCWVEJ. (In Russian).

5. Podlesnykh I.V., Zarudnaya T.Ya., 2017. *K usovershenstvovaniyu teoreticheskikh osnov protiverozionnoy organizatsii territorii sel'khozpredpriyatiy dlya formirovaniya ekologicheskii sbalansirovannykh agrolandshaftov v sistemakh zemledeliya Tsentral'nogo Chernozem'ya* [To the Improvement of the theoretical foundations of anti-erosion organization of the territory of agricultural enterprises for the formation of ecologically balanced agricultural landscapes in the farming systems of the Central Black Earth Region]. *Vestnik Kurskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bullet. of Kursk Agricultural Academy], no. 6, pp. 13–18, EDN: ZIZQSH. (In Russian).

6. Ermolaev N.R., Yudin S.A., Belobrov V.P., 2019. *Otsenka potentsiala vodnoy erozii pochv Stavropol'skogo kraya na osnove faktornoy modeli RUSLE* [Assessment of soil water erosion potential in the Stavropol territory based on the RUSLE factor model]. *Sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [Agricultural Journal], no. 3(12), pp. 1–12, DOI: 10.25930/0372-3054/001.3.12.2019, EDN: SVYBBG. (In Russian).

7. Sukhanovsky Yu.P., Prushchik A.V., 2023. *Modelirovanie vodnoy erozii pochv: monografiya* [Modeling of Water Erosion of Soils: monograph]. Kursk, KFANTS Publ., 175 p. (In Russian).

8. Kotova M.M., 2003. *Kolichestvennaya otsenka erozionnoy opasnosti s ispol'zovaniem GIS i modeli erozii WEPP* [Quantitative assessment of erosion hazard using GIS and the WEPP erosion model]. *Teoreticheskie i prikladnye voprosy izucheniya i ispol'zovaniya pochvenno-zemel'nykh resursov: tezisy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashch. 70-letiyu kafedry pochvovedeniya BGU* [Theoretical and Applied Issues of Studying and Using Soil and Land Resources: Abstracts of the International Scientific-Practical Conf., Dedicated to the 70th Anniversary of the Department of Soil Science of BSU]. Minsk, BSU, pp. 152-155. (In Russian).

9. Balyuba I.G., Konopatsky E.V., 2020. *Tochechnoe ischislenie. Istoricheskaya spravka i osnovopolagayushchie opredeleniya* [Point calculus. Historical background and Basic definitions]. *Fiziko-tekhnicheskaya informatika (SRT 2020): materialy 8-oy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Physical and Technical Informatics (SRT 2020): Proceed. of the 8th International Conference]. Nizhny Novgorod, Research Center of Physical and Technical Informatics, part 2, pp. 321-327, DOI: 10.30987/conferencearticle_5fd755c0adb1d9.27038265, EDN: DOMLVN. (In Russian).

10. Konopatsky E.V., 2019. *Podkhod k postroeniyu geometricheskikh modeley mnogofaktornykh protsessov mnogomernoy interpolatsii* [Approach to the Construction of Geometric Models of Multifactor Processes and Phenomena by the Method of Multidimensional Interpolation]. *Programmnaya inzheneriya* [Software Engineering], vol. 10, no. 2, pp. 77-86, DOI: 10.17587/prin.10.77-86, EDN: POFNKR. (In Russian).

11. Lavrennikova O.A., Krylova A.A., 2024. *Metodologiya proektirovaniya informatsionnykh sistem v zemleustroytve pri raschetakh smyva pochvy ot vodnoy erozii* [Methodology for information systems design in land management when calculating soil loss from water erosion]. *Innovatsionnoe razvitie zemleustroystva: sb. nauch. trudov Vserossiyskoy (nats.) nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovative Development of Land Management: Coll. of Scientific Papers of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference]. Samara, IBC Samara State Agrarian University, pp. 179-190, EDN: ZWVMIA. (In Russian).

Информация об авторах

А. И. Караев – заведующий кафедрой, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Мелитопольский государственный университет (272312, Запорожская область, г. о. Мелитополь, г. Мелитополь, пр-кт Богдана Хмельницкого, д. 18), AuthorID: 11223, ORCID: 0000-0002-3752-1008;

Л. Н. Толстолик – директор НИИ растениеводства, доцент, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Мелитопольский государственный университет (272312, Запорожская область, г. о. Мелитополь, г. Мелитополь, пр-кт Богдана Хмельницкого, д. 18), l.tolstolik@mail.ru, AuthorID: 452798, ORCID: 0000-0002-3752-1008;

С. Ю. Радев – научный сотрудник, Мелитопольский государственный университет (272312, Запорожская область, г. о. Мелитополь, г. Мелитополь, пр-кт Богдана Хмельницкого, д. 18), ctacyck@yandex.ru.

Information about the authors

A. I. Karaev – Head of Department, Doctor of Technical Sciences, Senior Research, Melitopol State University (272312, Zaporizhzhia region, Melitopol city district, Melitopol, avenue Bogdan Khmelnytskyi, 18), AuthorID: 11223, ORCID: 0000-0002-3752-1008;

L. N. Tolstolik – Director of the Research Institute of Crop Production, Associate Professor, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Research, Melitopol State University (272312, Za-

porizhzhia region, Melitopol city district, Melitopol, avenue Bogdan Khmelnytskyi, 18),
l.tolstolik@mail.ru, AuthorID: 452798, ORCID: 0000-0002-3752-1008;

S. Y. Radev – Researcher, Melitopol State University (272312, Zaporizhzhia region, Melitopol city district, Melitopol, avenue Bogdan Khmelnytskyi, 18), ctacyck@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024; одобрена после рецензирования 17.07.2025; принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 17.07.2025; accepted for publication 29.09.2025.