УДК 631.6.02

**КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ
НА ПАХОТНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СКЛОНАХ ЦЧР (ЧЕРНОЗЁМЫ, ГИДРОЛОГИЯ)***

СУХАНОВСКИЙ Ю.П.,

доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования эрозионных процессов, ФГБНУ «Курский ФАНЦ» – Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии, e-mail: soil-er@kursknet.ru, тел.: 8(4712)227905.

ПISKУНОВ А.Н.,

научный сотрудник лаборатории моделирования эрозионных процессов, ФГБНУ «Курский ФАНЦ» – Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии, тел.: 8(4712)227905.

ПРУЩИК А.В.,

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования эрозионных процессов, ФГБНУ «Курский ФАНЦ» – Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии, e-mail: model-erosion@mail.ru, тел.: 8(4712)227905.

Реферат. Для модели дождевой эрозии почвы разработана компьютерная модель дождевого стока. Сток описан как случайный процесс, протекающий на чернозёмах пахотных гетерогенных склонах ЦЧР. Поверхность склона аппроксимирована плоскими ячейками. Для каждой ячейки заданы коды севооборотов и гидротехнических сооружений (ГТС). Для севооборотов заданы даты проведения агротехнических операций (обработки почвы, посева, уборки урожая) и даты стадий развития растений, использованы два понятия. Единичное случайное событие – это выпадение дождя и образование стока воды. Реализация случайного процесса – это ряд единичных событий, которые зарегистрированы или рассчитаны за интервал времени $N_{лет}$. Используя распределения вероятностей для дождей и метод Монте-Карло, для заданного интервала $N_{лет}$ проведено численное моделирование $N_{реал}$ реализаций. В результате получен ряд $\{Y_{реал,j}\}, j = 1, 2, \dots, N_{реал}$, где $Y_{реал,j}$ – слой стока со склона за j -ю реализацию. По этому ряду проведена оценка функции плотности вероятности для слоя стока за одну реализацию. Для моделирования разработано программное обеспечение. Проведено моделирование для пяти сценариев использования склона. Однородный склон: 1 – ЗПП (зерно-паро-пропашной севооборот), 2 – ЗТ (зерно-травяной севооборот), 3 – МнТравы (многолетние травы). Гетерогенный склон: 4 – ЗПП+ЗТ (ЗПП на верхней половине склона, ЗТ на нижней), 5 – ЗПП+ГТС+ЗТ (на середине склона добавлено водозадерживающее ГТС).

Ключевые слова: модель, дождевой сток, случайный процесс, гетерогенные склоны, чернозёмы.

**A COMPUTER MODEL OF WATER EROSION ON ARABLE HETEROGENEOUS SLOPES
OF CENTRAL CHERNOZEM REGION (CHERNOZEMS, HYDROLOGY)**

SUKHANOVSKII Yu.P.,

Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher of the Soil Erosion Modeling Laboratory, FSBSI «Kursk FARC» – All-Russia Research Institute of Arable Farming and Soil Erosion Control, e-mail: soil-er@kursknet.ru, tel.: 8(4712)227905.

PISKUNOV A.N.,

Researcher of the Soil Erosion Modeling Laboratory, FSBSI «Kursk FARC» – All-Russia Research Institute of Arable Farming and Soil Erosion Control, tel.: 8(4712)227905.

PRUSHCHIK A.V.,

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher of the Soil Erosion Modeling Laboratory, FSBSI «Kursk FARC» – All-Russia Research Institute of Arable Farming and Soil Erosion Control, e-mail: model-erosion@mail.ru, tel.: 8(4712)227905.

Essay. A computer model of rainfall runoff is developed for a rainfall soil erosion model. The runoff is described as a random process proceeding on chernozem soils of arable heterogenic slopes of Central Chernozem

* Работа выполнена в соответствии с п.142 Программы фундаментальных научных исследований Государственных академий наук на 2013–2020 гг. (тема № 0630–2015–0007).

Region. The slope surface is approximated by flat cells. For each cell codes of crop rotations and hydraulic works (HW) were given. For crop rotations dates of conducting agronomical operations (tillage, sowing, harvesting) and dates of plant development phases are given. Two concepts are used. A single random event is a rainfall and water runoff formation. Realization of a random process is a number of single events which are registered or calculated for a time interval N_{yr} . Using distribution of probabilities for rainfalls and numerical Monte Carlo methods for a given interval N_{yr} numerical modeling of N_{real} is carried out. As a result a series $\{Y_{real,j}\}$, $j=1, 2, \dots, N_{real}$, where $Y_{real,j}$ is a layer of runoff from the slope for j^{th} realization is obtained. For this series a probability function for a runoff layer for one realization is estimated. Software is developed for modeling. Modeling for five scenarios of slope use is conducted. A homogeneous slope is: 1 – GFR (grain crop-fallow-row crop rotation), 2 – GG (grain crop-grasses crop rotation), 3 – PG (perennial grasses). A heterogeneous slope is: 4 – GFR+GG (GFR is on the upper slope half, GG is on the lower part), 5 – GFR+HW+GG (in the middle of the slope water retaining HW are added).

Key words: model, rainfall runoff, random process, heterogeneous slopes, chernozems.

Введение. Дожди, выпадая на пахотные склоны, образуют поверхностный сток. Это является причиной уменьшения запасов влаги в почве, потери из почвы питательных веществ, эрозии почвы, загрязнения и заиливания водных объектов. В «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [1] одним из приоритетных направлений определён «переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству», а в долгосрочной перспективе к особо актуальным исследованиям отнесено понимание, в частности, природных процессов. Всё это определяет необходимость исследований процессов дождевого стока с пахотных склонов, которые являются случайными, а слой стока является случайной величиной.

Полной характеристикой этой величины является функция плотности вероятности. Для понимания указанных процессов и для решения практических задач необходимо уметь оценивать эти функции для разных вариантов использования почв на пахотных склонах. Для условий России и стран СНГ не проводились и не проводятся систематические многолетние наблюдения за дождевым стоком с пахотных склонов. Применительно к однородным склонам (на склоне размещён только один севооборот) предложены эмпирические формулы для расчёта слоя стока с разной вероятностью превышения [2, 3]. Отсутствие необходимых данных наблюдений исключает возможность оценки погрешности для рассчитанных по этим формулам значений слоя дождевого стока. Использование на склоне противозерозионных комплексов трансформирует однородный склон в гетерогенный. Ранее, для чернозёмов ЦЧР была разработана математическая модель дождевой эрозии как случайного процесса [4, 5]. Она была разработана и проверена для однородных пахотных склонов. Эта модель включает модель, описывающую дождевой сток как случайный процесс. Цель исследований – разработка компьютерной модели дождевого стока для модели водной эрозии на чернозёмах пахотных гетерогенных склонов ЦЧР. Задачи исследований – разработка алгоритма численного моделирования

дождевого стока; разработка программного обеспечения; примеры моделирования для нескольких сценариев использования пахотного склона; анализ результатов моделирования.

Материал и методика исследования. В исследовании использованы два понятия. Единичное случайное событие – это выпадение одного дождя и образование поверхностного стока воды. Реализация случайного процесса – это ряд единичных событий, которые были зарегистрированы или рассчитаны за интервал времени $N_{лет}$. Важно то, что неизвестно, какая реализация будет в будущем. Поэтому значение слоя стока за одну реализацию необходимо оценивать с позиции вероятности. Для этого необходимо уметь оценивать функцию плотности вероятности для слоя стока. Такая оценка проведена следующим образом. Для заданного интервала времени $N_{лет}$ проводят численное моделирование определённого количества различных реализаций N_{real} и для каждой реализации рассчитывают слой стока как сумму слоёв стока от единичных событий. В результате получают ряд значений $\{Y_{real,j}\}$, $j=1, 2, \dots, N_{real}$, где $Y_{real,j}$ – слой стока за j -ю реализацию. Используя этот ряд, оценивают распределение вероятности и его характеристики. За основу принята математическая модель дождевого стока для однородного склона, входящая в модель дождевой эрозии почвы [4]. Для расчёта слоя стока при единичном событии использовано уравнение SCS (Службы Охраны Почв США) [6]. Алгоритм численного моделирования сводится к следующему.

Выбор исходных данных. Для склона задают его профиль. Проекцию длины склона на горизонтальную плоскость разбивают на N одинаковых отрезков с длиной Δl (рисунок 1). Ширину склона принимают равной Δl . Получают, что проекция поверхности склона на горизонтальную плоскость разбита на N одинаковых ячеек с площадью $S_{яч} = \Delta l \times \Delta l$. По заданному профилю склона для каждой ячейки рассчитывают средний угол θ_k , отрезок склона $\Delta X_k = \Delta l / \cos(\theta_k)$ и площадь поверхности

почвы $\Delta S_k = \Delta \lambda \times \Delta X_k$ (рисунок 1). Номера ячейкам ($k = 1, 2, \dots, N$) присваивают сверху вниз. Для каждой ячейки записывают коды севооборотов и гидротехнических сооружений (ГТС). Для севооборотов задают даты проведения агротехнических операций (обработки почвы, посева, уборки урожая) и даты стадий развития растений. Для рассматриваемой почвы выбирают значения параметров, входящих в уравнение стока SCS. Задают: $N_{\text{лет}}$ – количество лет в одной реализации; $N_{\text{реал}}$ – количество реализаций. Для дождей задают их распределения вероятности.

Численное моделирование. Используя распределения вероятностей для дождей и метод Монте-Карло [7], случайным образом для первого года разыгрывают количество дождей в году, даты их выпадения, слой и продолжительность каждого дождя. Далее, по данным о севообороте и дате дождя для каждой ячейки определяют наличие или отсутствие ГТС, а также состояние почвы, на которую выпадает дождь (пар это или культура, какая культура, стадия развития растений). Для каждого дождя и для каждой ячейки по уравнению SCS рассчитывают слой стока Y_k и объём водоотдачи $V_k = Y_k \times \Delta S_k$. Затем рассчитывают объём вытекающей из ячейки воды $V_{\text{выт},k} = V_{\text{втек},k} + V_k$ (рисунок 1). Этот объём будет втекающим объёмом $V_{\text{втек},k+1}$ для расположенной ниже ячейки. Расчёт начинают с первой (верхней) ячейки, для которой $V_{\text{втек},1} = 0$. Рассчитанные объёмы воды, вытекающей из последней (нижней) ячейки, суммируют. В результате получают объём стекающей воды со склона за первый год. Делают переход ко второму году. Всё повто-

ряют для оставшихся ($N_{\text{лет}} - 1$) лет. Если в севообороте количество лет $N_{\text{сев}} < N_{\text{лет}}$, то после последнего года в севообороте делают переход к первому году севооборота. В результате получают объём стекающей воды со склона за первую реализацию (за $N_{\text{лет}}$). Этот объём делят на всю площадь склона и получают слой воды $Y_{\text{реал},1}$, которая была потеряна со склона за первую реализацию случайного процесса. Аналогично проводят моделирование для заданного количества реализаций $N_{\text{реал}}$. В результате получают ряд значений $\{Y_{\text{реал},j}\}$, $j = 1, 2, \dots, N_{\text{реал}}$. Используя этот ряд, оценивают распределение вероятности для слоя стока за заданный интервал времени ($N_{\text{лет}}$) и значения его характеристик. Для проведения численного моделирования разработано программное обеспечение на языке Visual Basic Microsoft Excel 2010.

Результаты исследования. В качестве примера проведено численное моделирование дождевого стока со склона длиной 500 м, с углом наклона 3° , почва – чернозём тяжелосуглинистый. Рассмотрены пять сценариев использования склона (таблица 1). Сценарии 4 и 5 являются наиболее типичными противоэрозионными мерами, которые однородный склон трансформируют в гетерогенный. В сценарии 5 принято, что водозадерживающее гидротехническое сооружение (ГТС) полностью задерживает сток воды с верхней половины склона. Для оценки эффективности севооборотов принято $N_{\text{лет}} = 4$ года (период ротации севооборотов), а количество реализаций $N_{\text{реал}} = 100$. В таблице 2 представлены полученные результаты.

Рисунок 1 – Схема вытекания воды из ячейки поверхности склона

Таблица 1 - Сценарии использования склона

№ сценария	Сценарий	Описание сценария	Примечание
1	ЗПП	Зерно–паро–пропашной севооборот (на всём склоне)	Типичный для XIX – XX вв.
2	ЗТ	Зерно–травяной севооборот (на всём склоне)	Почвозащитный
3	МнТравы	Многолетние травы (на всём склоне)	Консервация
4	ЗПП+ЗТ	На верхней половине склона ЗПП, на нижней ЗТ	Комбинация противо-эрозионных мер
5	ЗПП+ГТС+ЗТ	Между ЗПП и ЗТ добавлено водозадерживающее ГТС	Комбинация противо-эрозионных мер

Таблица 2 – Результаты моделирования дождевого стока

Наименование показателя	№ сценария				
	1	2	3	4	5
Характеристики для слоя стока за 4 года (за ротацию севооборотов)					
Среднее значение, мм	15	9	5	12	5
Стандартное отклонение, мм	20	15	11	16	7
Коэффициенты: вариации, %, асимметрии	135 2,4	161 2,9	222 4,2	138 2,6	161 2,9
Сток отсутствует *					
Вероятность, %	1	13	30	1	14
Слой стока, мм					
Вероятность **: P = 10 %	47	27	16	38	13
P = 50 %	7	4	1	7	2

* – принято: сток отсутствует, если рассчитанный слой стока меньше 0,01 мм; ** – вероятность превышения.

Данные таблицы 2 приводят к следующему. 1. По сравнению со сценарием 1, средний слой стока уменьшился на 6 мм для сценария 2; на 10 мм, для сценариев 3 и 5; на 3 мм для сценария 4. Это показывает задержание дождевой воды на склоне. 2. Слой стока со склона за период ротации севооборотов сильно варьирует: коэффициент вариации в интервале 135 – 222 %. Коэффициент асимметрии (2,4 – 4,2) показывает, что функция распределения плотности вероятности «вытянута» вправо относительно среднего значения. 3. При переходе к многолетним травам вероятность отсутствия стока увели-

чилась до 30 %. Это можно объяснить увеличением впитывающей способности почвы под многолетними травами. 4. Функции плотности вероятности для всех сценариев разные.

Выводы. Для модели дождевой эрозии на пахотных гетерогенных склонах ЦЧР разработана компьютерная модель дождевого стока как случайного процесса, протекающего на чернозёмах пахотных гетерогенных склонах. Результаты численного моделирования для пяти сценариев использования конкретного склона привели к выводу, что для всех сценариев разные функции плотности вероятности.

Список использованных источников

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента РФ от 1.12.2016 г. № 642. / <https://reestr.extech.ru/docs/sntr.pdf>.
2. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противозерозионных мероприятий на Европейской территории СССР (ВСН 04–77) / А.И. Чеботарев, А.В. Караушев, И.В. Боголюбова и др. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - 62 с.
3. Герасименко В.П., Кумани М.В. Рекомендации по регулированию почвенно–гидрологических процессов на пахотных землях / Под ред. член–корр. РАСХН В.М. Володина. - Курск, 2000. - 108 с.

4. Сухановский Ю.П. Модель дождевой эрозии почв // Почвоведение. - 2010. - № 9. - 1114–1125.
5. Сухановский Ю.П. Вероятностный подход к расчету эрозионных потерь почвы // Почвоведение. - 2013. - № 4. - С. 474–481.
6. Young R.A., Onstad C.A., Bosch D.D., Anderson W.P. AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model. A Watershed Analysis Tool. U.S. Dept. of Agr. Conservation Research Report 35, 1987. - 80 p.
7. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. - М.: Наука, 1973. - 312 с.

List of sources used

1. The Strategy of Scientific-Technological Development of the RF: the Decree of President of the RF of 1.12.2016 N 642. / <https://reestr.extech.ru/docs/sntr.pdf>.
2. Directions on the Determination of Design-Basis Hydrologic Characteristics when Designing Anti-Erosion Measures on the European Territory of the USSR (VSN 04–77) / A.I. Chebotarev, A.V. Karaushev, I.V. Bogoliubova et al. - Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. - 62 p.
3. Gerasimenko V.P., Kumani M.V. Recommendations on Regulating Soil-Hydrologic Processes on Arable Lands / Ed. Corresponding Member of RAAS V.M. Volodin. Kursk, 2000. - 108 p.
4. Sukhanovskii Yu. P. Rainfall Erosion Model // Soil Science. - 2010. - N 9. - P. 1114–1125.
5. Sukhanovskii Yu. P. Probabilistic Approach to the Calculation of Soil Erosion Loss // Soil Science. - 2013. - N 4. - P. 474–481.
6. Young R.A., Onstad C.A., Bosch D.D., Anderson W.P. AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model. A Watershed Analysis Tool. U.S. Dept. of Agr. Conservation Research Report 35. - 1987. - 80 p.
7. Sobol I.M. Numerical Monte Carlo Methods. Moscow: Nauka, 1973. - 312 p.

УДК 332.33

МОНИТОРИНГ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЗЕМЛЕВЛАДЕНИЯ И ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ В СУБЪЕКТАХ СЕВЕРОКАВКАЗСКОГО РЕГИОНА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ШАЛОВ Т.Б.,

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры землеустройства и экспертизы недвижимости ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова.

Реферат. Анализ состояния и использования земельного фонда имеет важнейшее значение в управлении земельными ресурсами и перспективном планировании использования земель. Несмотря на единство земельного кадастра по всей стране, характер распределения земель в разных частях страны и регионах имеет свою специфику. В представленной работе проведено сравнение распределения земель по категориям, угодьям и формам собственности в регионах Российской Федерации, расположенных на Северном Кавказе, в динамике за 12 летний период. Наряду с большим разнообразием природных условий, влияющих на структуру земельного фонда по угодьям, анализируемые регионы отличаются разными путями реформирования сельскохозяйственного землеустройства и землепользования, что обусловило распределение в них земель по формам собственности. В субъектах Российской Федерации, где провели земельную реформу с наделением сельских жителей земельными долями на безвозмездной основе, в структуре земельного фонда частное землепользование занимает десятки процентов. И напротив, где воспользовались правом моратория на приватизацию сельскохозяйственных земель, государственная и муниципальная земельная собственность охватывает более 90 % территории. Разграничение государственной и муниципальной земельной собственности на федеральные, региональные и муниципальные земли в регионах Северного Кавказа имеет широкие различия: от преимущественного оформления разграниченных земель в федеральную собственность, до первоочередного оформления региональной и муниципальной собственности на разграниченных земельных участках.

Ключевые слова: сельскохозяйственные землеустройства и землепользования, категории земель, сельскохозяйственные угодья, формы собственности на землю.

MONITORING OF AGRICULTURAL LAND TENURE AND LAND USE IN SUBJECTS OF THE NORTH CAUCASIAN REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION

SHALOV T.B.,

the doctor of agricultural sciences, professor of chair of land management and examination of real estate, the Kabardino-Balkarian state agricultural university of V. M. Kokov, timur.shalov@mail.ru.