Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО ОХРАНЕ ВОД (ВНИИВО)

ОХРАНА ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫМ СТОКОМ

(Сборник научных трудов)

Харьков — 1983

В. М. МОСКОВКИН, В. Е. ЛЫСЕНКО, В. З. КОЛПАК,
А. Х. КУРНОСЕНКО
(ВНИИВО)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА НАНОСОВ И ПЕСТИЦИДОВ ПОВЕРХНОСТНЫМ СТОКОМ С СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ВОДОСБОРОВ

Проблема загрязнения водных объектов стоком с сельскохозяйственных угодий наиболее эффективно может решаться с помощью управления (регулирования) поверхностным стоком, переводом его во внутрипочвенный и грунтовый сток, что в свою очередь, обусловливает необходимость построения математических моделей формирования поверхностного стока на сельскохозяйственных водосборах, учитывающих изменчивость гидрофизических и других параметров водосбора. Модели с распределенными параметрами позволяют оценивать влияние локальных противоэрозионных, агролесомелиоративных и других мероприятий, проводимых на водосборе, на качество воды в конечном его створе. Важным условием такого моделирования является геометрическое представление водосбора, разбиение его на простые элементы (представление рельефа стандартным образом с помощью ЭВМ осуществлено в работе [1]). Настоящая задача — получить комплекс подмоделей, описывающих процесс формирования поверхностного стока.

Используемые американские непрерывные балансовые модели (PTR, ARM [2, 7, 8]) сложны для реализации, требуют задания большого объема исходных данных; кроме того, в них используется слишком упрощенный эрозионный алгоритм, лежащий в основе расчета выноса химических веществ с твердой фазой поверхностного стока.

В настоящей работе предлагается достаточно физически обоснованная и в то же время простая математическая модель выноса наносов и пестицидов с сельскохозяйственных склонов, требующая для своего использования доступный набор исходных данных.

В основу моделирования жидкой фазы поверхностного стока положим уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = (I - R)\frac{B}{6 \cdot 10^4} + q_{\text{бок}}, \qquad (1)$$

где ω — площадь поперечного сечения потока, м^2; q — расход воды, м^3/с; I, R — интенсивности дождя и инфильтрации, мм/мин; B — средняя ширина склона, м; t — время, с; x — координата, отсчитываемая вниз по склону, м; $q_{\text{бок}}$ — боковой приток на единицу длины склона, м^2/с.

Интегрируя уравнение (1) по длине склона x от 0 до l (l — длина склона, м), получим уравнение баланса воды в виде

$$\frac{dS}{dt} = q_{\text{вх}} + \frac{(I - R)F}{6} - q_{\text{вых}}, \qquad (2)$$

где S — объем поверхностной воды на склоне, м^3; F — площадь склона, га ($F=10^{-4}lB$); $q_{вх}$, $q_{вых}$ — расходы воды на входе и выходе со склона, м^3/с;

$$q_{вх} = q\Big|_{x=0} + \int_0^l q_{бок}dx.$$

Обычно для замыкания уравнения (2) используется гипотеза $S=Kq_{вых}$, которая приводит это уравнение к обыкновенному дифференциальному уравнению относительно величины $q_{вых}$ (модель Нэша [11] типа «черного ящика», которая требует проведения калибровочных процедур для оценки неопределенного параметра K).

Для замыкания уравнения (2) можно также предложить физически более обоснованный подход, состоящий в представлении расхода воды на выходе со склона с помощью формул Шези и Маннинга $q_{вых}=\frac{1}{n}R^{5/3}\sqrt{i}\,B=\frac{1}{n}\bar{h}^{5/3}\sqrt{i}\,B$ (для плоскостного склонового стока гидравлический радиус R равен средней глубине потока на склоне $\bar{h}$, м) и S в виде $S=10^4\bar{h}F$, n — коэффициент шероховатости, i — средний уклон склона. Подставляя эти соотношения в уравнение (2), придем к нелинейному обыкновенному дифференциальному уравнению относительно величины $\bar{h}$

$$\frac{d\bar{h}}{dt} = (I-R)\frac{10^{-3}}{60} - \frac{\sqrt{i}}{nl}\bar{h}^{5/3} + \frac{q_{вх}(t)}{10^4F}. \qquad (3)$$

Влияние осадков на гидравлическое сопротивление, а следовательно , и на расход воды, как правило, учитывается при расчетах стока с гладких поверхностей (асфальтных и бетонированных покрытий аэродромов и урбанизированных территорий); для шероховатых сельскохозяйственных склонов его можно считать незначительным [1].

Используя для решения уравнения (3) с начальным условием $\bar{h}(0)=0$ широко применяемый для численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений метод Рунге-Кутта четвертого порядка, получим значения $\bar{h}$ через равные промежутки времени Δt. Вычисление ряда $\bar{h}_1$, $\bar{h}_2$, ... $\bar{h}_j$, ... прекращается, когда $\bar{h}$ становится достаточно близким к нулю (фаза спада поверхностного стока). По вычисленным значениям h_j определяются величины расхода воды в эти же моменты времени по формуле

$$q_{вых\,j} = \frac{1}{n}\bar{h}_j^{5/3}\sqrt{i}\,B.$$

[1] Впервые эта гипотеза высказана К. Лэнгфордом и А. Турнером [10], изучавшим сток на шероховатой непроницаемой поверхности, с этим также согласуются экспериментальные лабораторные исследования [3].

В основу расчета смыва почвы (эрозии) со склона положим уравнение неразрывности (баланса наносов) в виде

$$\frac{\partial (Ch)}{\partial t}+\frac{\partial (Cq)}{\partial x}=-K_с(C-C_{тр})h+C_{бок}q_{бок}, \qquad (4)$$

которое получается при осреднении диффузионных уравнений транспорта взвешенных веществ в потоке, где C, q — концентрация взвешенных веществ и удельный расход воды; $C_{тр}$ — концентрация, соответствующая транспортирующей способности потока; $K_с$ — коэффициент седиментации, предложенный в работе [4]; t — время; x — координата, отсчитываемая вдоль склона; h — глубина потока, $C_{бок}$ — концентрация веществ в боковом потоке.

Подобное уравнение было предложено в работе [13]. Интегрируя уравнение (4) по длине склона x от 0 до l с учетом средней ширины склона, получим обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d(\bar{C}S)}{dt}+C_l q_{вых}-C_0 q_{вх}=-K_с(\bar{C}-\bar{C}_{тр})S,$$

$$\bar{C}=\frac{1}{l}\int_0^l C dx;\quad \bar{C}_{тр}=E\frac{v^2}{\bar{h}}=E\frac{1}{n^2}\bar{h}^{1/3}; \qquad (5)$$

$$C_0 q_{вх}=C|_{x=0}\,q|_{x=0}+\int_0^l q_{бок}C_{бок}dx;$$

E — параметр, зависящий от коэффициента Шези $C_ш$ в формуле для мутности взмыва А. В Караушева [5, 6]; C_0, C_l — концентрации взвешенных веществ на входе и выходе со склона, г/м^3.

Принимая линейный закон изменения концентрации по склону ($\bar{C}=(C_l+C_0)/2$) и учитывая выражение для $\frac{dS}{dt}$, полученное из уравнения (3) умножением его на 10^4F, приведем уравнение (5) к следующему обыкновенному дифференциальному уравнению относительно концентрации C_l.

$$\frac{dC_l}{dt}+C_l\left[\frac{(I-R)}{6\cdot 10^4\bar{h}}+\frac{q_{вх}}{10^4F\bar{h}}+\frac{\sqrt{i}}{nl}\bar{h}^{2/3}+K_с\right]+C_0\left[\frac{(I-R)}{6\cdot 10^4\bar{h}}-\right.$$

$$\left.-\frac{q_{вх}}{10^4Fh}-\frac{\sqrt{i}}{nl}\bar{h}^{2/3}+K_с\right]+\frac{dC_0}{dt}=2K_с\frac{E}{n^2}\bar{h}^{1/3}\sqrt{i}, \qquad (6)$$

где $q_{вх}$, C_0 — известные функции от времени, определяемые из решения водноэрозионной задачи для вышележащего склона (для приводораздельного склона C_0 и $q_{вх}$ равны нулю).

Коэффициент K_c определяется согласно работе [4] по формуле

$$K_c = \frac{u}{\bar{h}}\left(1 + \frac{MC_{ш}u}{4gv}\right), \tag{7}$$

где u — гидравлическая крупность частиц, м/с; g — ускорение силы тяжести, м/с²; $M = 0{,}7 \cdot C_{ш} + 6$; $C_{ш} = \frac{1}{n}\bar{h}^{-1/6}$; $v = \frac{1}{n}\bar{h}^{-2/3}\sqrt{i}.$

Аппроксимация табличных данных зависимости параметра E от коэффициента Шези [5] привела к формуле

$$E = 9{,}85\, C_{ш}^{1,75} = 9{,}85\left(\frac{1}{n}\bar{h}^{-1/6}\right)^{1,75}. \tag{8}$$

Таким образом, для расчета концентрации взвешенных веществ на выходе со склона приходим к замкнутой системе обыкновенных дифференциальных уравнений (3, 6). Уравнение (6) решается численно методом Рунге-Кутта с учетом подстановки в него найденных из уравнения (3) значений $\bar{h}$.

Для моделирования руслового стока используется близкая система уравнений, записанная в функциях ω и C_l, где ω — площадь поперечного сечения потока в русле. Предусмотрено четыре типа русел с прямоугольным, треугольным, трапециедальным и параболическим сечениями. Программным путем также предусмотрено решение уравнений склонового и руслового стока по одному численному алгоритму. Мелкоручейковая структура склонового стока может учитываться поправочным множителем к коэффициенту шероховатости или с помощью задания системы русловых микроформ и расчета стока в них аналогично тому, как это делается для русловых форм.

Твердый расход, г/с, определится произведением $Q = C_l q_{вых}$.

Перейдем теперь к выводу формул для расчета выноса пестицидов с жидкой и твердой фазами стока.

Массу пестицида в почве (г/га) в момент начала стока ($t_{ст}$) определим согласно известной экспоненциальной зависимости, описывающий распад пестицида [2, 7, 8]

$$P = P_0 \exp\left[-K_d\left(t_{ст} - t_{вн}\right)\right], \tag{9}$$

где P_0 — норма внесения пестицида, г/га; $t_{вн}$ — время внесения пестицида; K_d — коэффициент распада пестицида, 1/сут; $t_{ст} - t_{вн}$, сут (в расчетах вместо момента начала стока можно брать время начала дождя).

Одновременно с распадом пестицида происходит его сорбция и растворение. В основу описания этих процессов наиболее часто кладется гипотеза мгновенного сорбционного равновесия, которая описывается уравнением Фрейндлиха. Рассмотрим баланс массы пестицида в объеме почвы, соответствующем максимальной глубине проникновения пестицида в почву ($h_{гл}$, м) и площади в 1 га. Масса почвы, кг, соответствующая этому объему, определится выражением $M_п = 10^4 \gamma h_{гл}$, где γ — объемный вес почвы в пахотном слое, кг/м^3. Уравнение Фрейндлиха [2, 7, 8], соответствующее этой массе почвы, запишется в виде

$$P_c / M_п = K_F C_р^{n_F}, \tag{10}$$

где P_c — масса сорбированного пестицида в рассматриваемом объеме почвы, г; $C_р$ — равновесная концентрация пестицида в растворе, г/л; K_F, n_F — эмпирические константы уравнения Фрейндлиха.

Предполагаем, что часть массы пестицида (9) сорбируется на частицах почвы, а другая — растворяется в воде

$$P_0 \exp\left[-K_d (t_{ст} - t_{вн})\right] = P_c + P_р, \tag{11}$$

где $P_р$ — масса растворенного пестицида, г/га, которую определим по выражению

$$P_р = C_р W, \tag{12}$$

W — объем влаги в рассматриваемом объеме почвы с учетом слоя выпавших осадков, л/га. Объем W вычисляем по формуле баланса влаги в почве

$$W = \left(\frac{W_0}{0,2} h_{гл} + 10H\right) 10^3, \tag{13}$$

W_0 — начальный влагозапас (до начала дождя) в пахотном слое глубиной 0,2 м, м^3/га; H — слой осадков за дождь; мм.

Подставляя в соотношение баланса (11) выражения (10, 12, 13), получим трансцендентное уравнение для определения равновесной концентрации в растворе

$$P_0 \exp\left[-K_d (t_{ст} - t_{вн})\right] = 10^4 \gamma h_{гл} K_F C_р^{n_F} + 10^3 \left(\frac{W_0}{0,2} h_{гл} + 10H\right) C_р. \tag{14}$$

После этого по уравнению (10) определим концентрацию сорбированного пестицида $C_c = K_F C_р^{n_F}$ г/кг.

Интенсивности выноса пестицида жидкой ($Q_р$, г/с) и твердой (в сорбированном виде, Q_c, г/с) фазами определятся соответственно по формулам

$$Q_р = 10^3 C_р q_{вых} \tag{15}$$

$$Q_c = 10^{-3} C_l q_{вых} C_c = 10^{-3} C_l q_{вых} K_F C_р^{n_F}. \tag{16}$$

При более корректном подходе к расчету выноса пестицидов в сорбированном виде следует иметь в виду, что концентрация пестицидов на взвешенных частицах в потоке отличается от их концентрации в почве. Известно, что основная часть пестицидов сорбируется на высокодисперсной фракции (до одного микрона) [12]. В связи с этим в расчет интенсивности выноса по формуле (16) целесообразно ввести поправочный коэффициент (ER — коэффициент обогащения), аналогично коэффициентам, вводимым при расчете выноса азота и фосфора (функции нагрузки Мак Элроя) [9, 12].

$$ER = \xi_{вз}/\xi_{поч}, \qquad (17)$$

где $\xi_{вз}$, $\xi_{поч}$ — доли взвешенных частиц и почвы размером не более одного микрона.

Величина $\xi_{вз}$ может быть рассчитана по формуле работы [12]

$$\xi_{вз} = \xi_{поч} \exp(-\beta) \Big/ \left(\frac{6 \cdot q_{max}}{(I-R)_{max} F}\right)^{0,56}, \qquad (18)$$

где q_{max} — пиковый расход воды на выходе со склона, м^3/с; $(I-R)_{max}$ — максимальная интенсивность избыточных (эффективных) осадков, мм/мин.

Параметр β согласно работе [12] определится по формуле

$$\beta = -\ln\left(\frac{6q_{max}}{(I-R)_{max}F}\right)^{0,56} / 4,47. \qquad (19)$$

С учетом формул (18, 19) коэффициент обогащения (17) примет вид

$$ER = \left(\frac{6q_{max}}{F(I-R)_{max}}\right)^{-0,337}. \qquad (20)$$

Отметим, что в исходной формуле работы [12] размер частиц входил в экспоненту $\exp(-\beta d)$, а формула (18) записана при $d=1$ $\mu m=1$ мкм. С учетом найденного поправочного коэффициента формула (16) запишется в виде

$$Q_c = 10^{-3} C_t q_{вых} K_F C_p^{n_F} \left(\frac{6q_{max}}{F(I-R)_{max}}\right)^{-0,337}. \qquad (21)$$

Общие выносы взвешенных веществ и пестицидов определятся интегрированием соответствующих расходов взвешенных веществ и пестицидов за время поверхностного стока.

Проведены численные эксперименты по уравнению (3) при отсутствии инфильтрации и входного расхода воды. Дождь задавался постоянной интенсивности 0,1 мм/мин с продолжительностью 1 ч. Остальные параметры уравнения были следующие: $\Delta t=5$ мин, $l=100$ м, $B=10$ м, $i=0,001$—$0,4$ $n=0,01$—$0,5$. Расчеты показали, что по виду кривой гидрографа стока он близок к экспериментальным гидрографам и расчетам по более сложному кинематико-волновому уравнению (крутая фаза подъема стока, выход на стационарное состояние и плавная фаза спада стока). Численная схема дает сохранение объема воды (6 м^3 воды выпало в виде дождя и столько же ее стекло со склона при отсутствии инфильтрации). Трансформация гидрографа стока при разных уклонах и шероховатости качественно правильно отражает влияние этих параметров на сток.

Разработанная модель отличается от существующих более совершенным водноэрозионным алгоритмом, причем уравнения, лежащие в его основе, не содержат физически неопределенных параметров. Химический блок модели приближенно соответствует таковому блоку известной американской модели ARM [8] и отличается от существующих замкнутой балансовой схемой для определения сорбируемого и растворенного пестицида на основе решения трансцендентного уравнения (14). Ее применение позволит производить прогнозные расчеты (на основе доступных данных гидрометеорологической, агрохимической и других служб) выноса наносов и пестицидов в водные объекты и тем самым оценивать качество воды этих объектов, принимающих сток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колпак В. З., Лысенко В. Е. Контроль качества воды неточечных источников загрязнения с использованием математического моделирования формирования поверхностного стока. — В кн.: Контроль качества природных и сточных вод. Харьков, 1982, с. 128—134.

2. Борзилов В. А., Драголюбова И. В. Физико-математическое моделирование поведения пестицидов на малом водосборе. — Труды ИЭМ, М., 1982, вып. 12 (98), с. 54—79.

3. Быков В. Д., Малютин А. Н., Назаров Н. А., Орлова Г. Б. Экспериментальное изучение дождевого стока на проницаемом склоне. — В кн.: Проблемы гидрологии. М.: Наука, 1978, с. 80—96.

4. Лысенко В. Е. Определение коэффициента седиментации взвешенных веществ в потоке. — В кн.: Гидравлика и гидротехника. Киев, 1983, № 37, с.

5. Зубкова К. М. Исследование гидравлических и морфометрических характеристик склоновых потоков. — В кн.: Сборник работ по гидрологии. Ленинград, 1977, № 12, с. 100—107.

6. Караушев А. В. Теория и методы расчета речных наносов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 271 с.

7. Crawford N. H., Donigian A. S. Pesticide transport and runoff model for agricultural lands. — Technical report EPA—660/2—74—013, 1973.— 211 p.

8. Donigian A. S., Davis H. H. User's manual for agricultural management model. EPA—600/3—78—080, 1978.—163 p.

9. Mc Elroy A, D., Chiu S. Y., Nebgen I. W., Aleti A., Bennett F. W. Loading Function for Assessment of Water Pollution from Nonpoint Sources Environmental Protection Technology Series, V. S. EPA, EPA — 600/2—76—151.— 445 p.

10. Langford K. I., Turner A. K. Effects of rain and depression storage on overland flow.— Trans. Inst. Civil Engrs Austral., 1972, vol. 14, N 2.

11. Nash J. E. The form of the instantaneous unit hydrograph.— Int. Assos. Sci. Hydrol., 1957, vol. 3, N 5.
12. Williams J. R. SPNM. A Model for Predicting Sediment, Phosphorus and Nitrogen Yields from Agricultural Basins.— Water Resources Bulletin, 1980, vol. 16, N 5, у. 843—848.
13. Witinok P. M., Whelan G. Distributed parameter watershed sedimentation model.— Proc. Iowa Acad. Sci., 1980, vol. 87, N 3, p. 103—111.

Developed is a mathematical model of sediments and pesticides discharge from water catchment areas under agricultural use, which is based on balance equations. Water erosion block of the model is a system of common differential equations of the first order which can be solved by using numerical method of Runge-Kutt. Chemical block of the model is based on a balance principle with use of the Freindlich equations and disintegration of pesticides and is presented by transcedent equation for determination of equilibrium concentration of a pesticide in soil solution. Numerical experiments on the submodel of water flow were also carried out.

В. М. МОСКОВКИН, В. Е. ЛЫСЕНКО, В. З. КОЛПАК

(ВНИИВО)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ПОВЕРХНОСТНЫМ СТОКОМ С ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА

Осуществление контроля неточечных источников загрязнения водных объектов невозможно без построения математических моделей формирования состава поверхностного стока, позволяющих также наиболее эффективно назначать мероприятия по его перехвату.

Поверхностный сток формируется на больших площадях, его поступление в водные объекты рассредоточено по их длине.

Для наиболее точного представления о процессах, влияющих на формирование поверхностного стока, в настоящее время используются детерминированные модели, так как из-за сложных связей и ограниченности данных натурных исследований статистические модели не эффективны в оценке неточечных источников загрязнения, в них используются средние условия и характеристики, экстраполяция к другим географическим регионам или условиям часто невозможна [9]. При непрерывном моделировании внимание уделяется междождевым событиям. Непрерывное моделирование неточечного загрязнения аналогично «трехслойной пирамиде», в основании которой лежит гидрология водосбора, средним слоем является моделирование эрозии и транспорта наносов, верхним—взаимодействие различных загрязняющих веществ с жидкой и твердой фазами стока, в результате чего происходит их транспорт [9]. Верхний слой пирамиды полностью обусловлен двумя нижними слоями. Учитывая дополнительно, что транспорт химических веществ городским поверхностным стоком осуществляется в основном на взвешен-