

(ВНИИВО)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЫНОСА ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПОВЕРХНОСТНЫМ СТОКОМ С СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ В ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

При построении моделей выноса химических веществ исходят из того, что они являются синтезом эрозионно-гидрологической и химической моделей поведения веществ в почве [8]. Вынос химических веществ определяется по формуле

$$P = P_T + P_{ж},$$

где P_T , $P_{ж}$ — вынос пестицидов твердым и жидким стоком.

Для оценки смыва почвы с водосборов можно опираться на модуль стока наносов (M_{s0} т/га год) [1], который является интегральным показателем смываемости почв на водосборе. Для приближенного учета влияния степени эродированности сельхозугодий на величину формирующегося на них твердого стока предлагаются параметры влияния смывости (эродированности) почвы на относительную величину ее смываемости [2]. Так, для неэродированной почвы этот параметр равен $j_0 = 1$, для слабоэродированной — $j_1 = 1,3-1,5$, для среднеэродированной — $j_2 = 1,8-2,2$, для сильноэродированной — $j_3 = 2,5-3,0$.

Модуль твердого стока (M_{st} , т/га), формирующегося на сельхозугодиях разной степени эродированности почв, можно определить по формуле

$$M_{st} = M_{s0} \frac{j_i}{\sum_{i=0}^3 j_i f_i}, \quad (1)$$

где i — степень эродированности почв ($i=0$ — неэродированные, $i=1$ — слабоэродированные, $i=2$ — среднеэродированные, $i=3$ — сильноэродированные), f_i — доля площадей различных степеней эродированности от общей площади сельхозугодий.

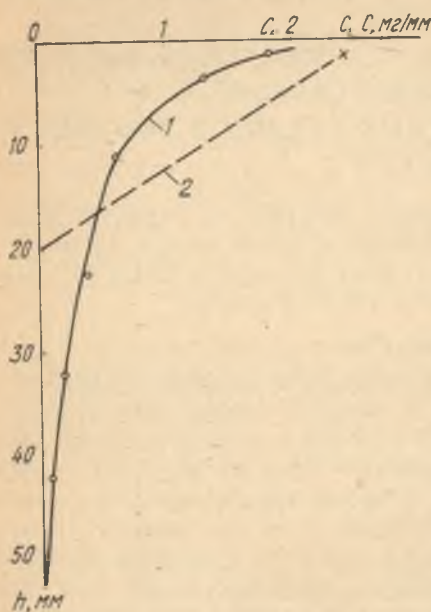
Величина смываемого слоя почвы (h , м) определяется по формуле

$$h_{см} = \frac{M_{st}}{\gamma \cdot 10^4}, \quad (2)$$

где γ — объемный вес почвы в пахотном слое, т/м³.

Так как величина $h_{см}$ мала, то для расчета выноса необходимо знать концентрацию химического вещества в самом верхнем слое, а для определения последней — полную эпюру распределения вещества по профилю (глубине) почвы. Проведен-

ные нами экспериментальные исследования распределения пестицидов по профилю разных почв свидетельствуют о резком нелинейном убывании содержания пестицидов с глубиной. На рисунке представлен график изменения концентрации метафоса по глубине почвы при слое осадков 20 мм и валовом содержании его 22 мг в почвенной колонке размером $10 \times 10 \times 40$ см.



Распределение метафоса по глубине почвы:

1 — экспериментальная кривая; 2 — линейное распределение.

Вначале изложим методику расчета выноса пестицидов с твердым стоком в линейном приближении распределения пестицидов по глубине. Концентрация метафоса в верхнем слое порядка $C_0 = 2$ мг/мм, в слое $h = 20$ мм содержится 75% метафоса (рисунок). Если аппроксимировать распределение метафоса линейной зависимостью, концентрация в верхнем слое

будет $C_1 = \frac{22 \cdot 2}{20} = 2,2$ мг/мм

(предполагалось, что 100% пестицидов находится в

слое $h = 20$ мм). Поверхностная концентрация в этом случае не уменьшается по сравнению с фактической.

Принимая валовое содержание пестицида в почве за единицу, получим условную концентрацию на поверхности $\bar{C}_0 = \frac{2}{h}$, где h — глубина, в пределах которой содержится не менее 70% пестицидов. Распределение концентрации при этом будет иметь вид

$$\bar{C}(z) = \frac{2}{h} \left(1 - \frac{z}{h} \right),$$

а доля пестицидов, заключенных в слое $h_{см}$, определится соотношением

$$\delta = \int_0^{h_{см}} \frac{2}{h} \left(1 - \frac{z}{h} \right) dz = \frac{h_{см}}{h^2} (2h - h_{см}). \quad (3)$$

а при $h_{см} \approx 0$, $\delta = \frac{2h_{см}}{h}$.

Для проведения расчетов выноса пестицидов в водные объекты в условиях неполной информации на основании обобщения литературных данных и наших экспериментальных исследований получены средние для шести групп пестицидов глубины, в которых концентрируются пестициды.

Деструкцию пестицидов учитываем известным соотношением [8, 9]

$$A(t) = A(0) \exp(-Kt), \quad (4)$$

где $A(t)$ — содержание пестицида в почве в момент времени t , сут, K — константа скорости деструкции.

Константу K определяем по формуле $K = 4,6/t_{0,99}$, где $t_{0,99}$ — время, за которое количество первоначального пестицида $A(0)$ убывает на 99% [3, 4, 8].

Теперь можно определить вынос пестицидов P_T с твердым стоком по формуле

$$P_T = \sum_{i=0}^3 A(t) \delta_i F_i, \quad (5)$$

где F_i — площади разных степеней эродированности, $A(t)$ и δ_i находятся по формулам (4) и (3).

Рассмотрим случай нелинейного экспоненциального распределения концентрации пестицидов по глубине почвы

$$C(z) = C_0 \exp(-\alpha z). \quad (6)$$

При этом общее количество пестицида, находящегося в слое почвы толщиной $h_{см}$, м и площадью F , м², может быть определено интегрированием выражения (6)

$$P_T = F \int_0^{h_{см}} C_0 \exp(-\alpha z) dz = \frac{FC_0}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha h_{см})]. \quad (7)$$

Так как $\alpha h_{см}$ малая величина, разлагая экспоненту в ряд и пренебрегая членами выше первого порядка $\exp(-\alpha h_{см}) \approx 1 - \alpha h_{см}$, получим

$$P_T = C_0 F h_{см}. \quad (8)$$

Для нахождения поверхностной концентрации C_0 , кг/м³, через норму внесения пестицида с учетом его деструкции на момент времени t следует исходить из равенства

$$A(0) \exp(-Kt) = 10^4 \int_0^{h_{max}} C_0 \exp(-\alpha z) dz,$$

где $A(0)$ — норма внесения пестицида в кг/га. Отсюда определим

$$C_0 = \frac{\alpha A(0) \exp(-Kt)}{10^4 [1 - \exp(-\alpha h_{\max})]}. \quad (9)$$

Считая, что h_{\max} соответствует глубине, при которой концентрация пестицида составляет 1% от поверхностной концентрации, определим α из соотношения $\alpha = 4,6/h_{\max}$. Подставляя это соотношение в формулу (9), получим с учетом того, что $\exp(-4,6) \approx 0$,

$$C_0 = \frac{4,6 A(0) \exp(-Kt)}{10^4 h_{\max}}. \quad (10)$$

Итак, формула (8) принимает вид

$$P_T = \frac{4,6 A(0) \exp(-Kt) h_{\text{см}} F}{10^4 h_{\max}}. \quad (11)$$

Как и формулу (5), ее можно представить через суммирование по площадям разной степени эродированности.

Применим данный подход для расчета выноса пестицидов мелколучейковым стоком. В отличие от предыдущего полагаем, что смыв происходит по водороидам и промоинам, имеющим треугольное сечение (равнобедренный треугольник).

Полагаем, что поперечное сечение изменяется по склону подобным образом (с сохранением углов сечения). Начало координат поместим в середине основания треугольного сечения, ось x направим по склону, а ось y — перпендикулярно оси x по основанию сечения.

Закон изменения глубины промоины (водороины) или высоты треугольного сечения по склону зададим функцией $h(x)$, тангенс угла при основании равнобедренного треугольника обозначим через a и общую длину промоины (водороины) через l , тогда количество пестицидов, находящихся в этой линейной эрозионной форме и соответственно вынесенное со склона, определится тройным интегралом

$$P_T = 2 \int_0^{h(x)/a} \int_0^{h(x)-ay} \int_0^l C_0 \exp(-\alpha z) dz dy dx = \frac{2C_0}{\alpha a} \int_0^l h(x) dx + \\ + \frac{2C_0}{\alpha^2 a} \int_0^l \exp(-\alpha h(x)) dx - \frac{2C_0 l}{\alpha^2 a}. \quad (12)$$

При $h(x) = h = \text{const}$ из выражения (12) получим

$$P_{\tau} = \frac{2C_0 l}{\alpha a} \left[\frac{h\alpha - 1 + \exp(-ah)}{\alpha} \right]. \quad (13)$$

В первом приближении расчет выноса в предположении равномерного плоскостного смыва дает завышенный результат по сравнению с тем же объемом смыва, происходящего по ручейкам. Это следует из того, что в первом случае расчет выноса химических веществ производится по максимальной концентрации C_0 .

Приведем пример. Пусть на участке площадью 1 га объем смыва почвы составил $W_{\tau} = 10 \text{ м}^3/\text{га}$, а максимальная глубина профикиновения химического вещества и его количество на момент смыва составляют соответственно: $h_{\text{max}} = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$, $A(t) = 3 \text{ кг/га}$. Тогда

$$C_0 = \frac{4,6 \cdot 3 \text{ кг}}{10^4 \text{ м}^2 \cdot 0,05 \text{ м}} = 0,0276 \text{ кг/м}^3.$$

Вынос при предположении равномерного плоскостного смыва составит

$$P_{\tau} = W_{\tau} C_0 = 0,276 \text{ кг/га}.$$

Пусть теперь этот же объем почвы ($10 \text{ м}^3/\text{га}$) выносится ручейковым стоком с параметрами: $h = h_{\text{max}} = 0,05 \text{ м}$; $b = 2h/a = 0,04 \text{ м}$ — ширина линейной эрозионной формы; $N = 100$ — количество ручейков; $l = 100 \text{ м}$. Так как $\alpha = 4,6/h_{\text{max}}$ и значит $\exp(-4,6 h/h_{\text{max}}) = \exp(-4,6) \approx 0$, то значение $P_{\tau} = NP_{\tau}$ по формуле (13) будет равно

$$P'_{\tau} = \frac{2 \cdot 0,0276 \cdot 10^4}{2,5 \left(\frac{4,6}{0,05} \right)^2} \approx 0,09,$$

то есть вынос химического вещества ручейковым стоком оказывается в 3 раза меньшим, чем при равномерном плоскостном смыве.

В предположении неравномерного по склону плоскостного смыва ($h_{\text{см}} = \varphi(x)$) вынос химических веществ определится по формуле

$$P_{\tau} = C_0 F \int_0^l \int_0^{\varphi(x)} \exp(-az) dz dx = \frac{C_0}{\alpha} \int_0^l [1 - \exp(-a\varphi(x))] dx, \quad (14)$$

где C_0 находится по формулам (9) или (10).

Перейдем теперь к определению выноса пестицидов с жидким стоком $P_{ж}$. В результате проведенных нами экспериментов установлено, что при внесении заведомо завышенных норм метафоса концентрация растворенного пестицида в поверхностном стоке не превышала 1—1,5 мг/л, что примерно в 50 раз ниже его химической растворимости. Это может быть связано с влиянием на растворимость пестицидов свойств почвы, физических условий (температуры, давления и т. п.), поглощения растворенного пестицида частицами почвы и других процессов. Поэтому при количественной оценке выноса пестицидов с водным стоком целесообразно вводить параметр r , определяющий часть пестицида, которая может быть вынесена в растворенном виде с 1 мм поверхностного стока.

Значение параметра r зависит от химической растворимости пестицида, а также от условий среды и определялась нами в виде $r = \beta \sqrt{R}$ на основании экспериментальных данных.

Таблица 1

Значения константы β

Препарат	Растворимость в воде R , мг/л	Количество препарата в почве к моменту выпадения дождя A (г), мг	Слой поверхностного стока $h_{ст}$, мм	Количество препарата, вынесенное водным стоком, $P_{ж}$		$\frac{P_{ж}}{h_{ст}}$	$\frac{P_{ж} \cdot 10^3}{h_{ст} A}$ (г)	$\beta \cdot 10^4$
				мг	% от внесенного			
Атразин	33	3240	86,4	145	4,49	1,678	0,518	0,902
	33	6480	105,0	739	11,4	7,038	1,086	1,890
	33	3940	102,0	334	10,3	3,274	0,831	1,446
	33	6480	93,7	463	7,14	4,941	0,762	1,326
Дихлорбензил	10	13600	86,4	321	2,36	3,715	0,273	0,863
	10	13600	105,0	1040	7,61	9,905	0,728	2,302
	10	13600	102,0	816	5,99	8,000	0,588	1,860
	10	13600	93,7	281	2,07	2,999	0,221	0,699
Метафос	55	60000	1,36	8,98	0,015	6,603	0,110	0,148
	55	60000	1,12	14,56	0,023	13,000	0,216	0,291
Метафос	55	2000	10	42,4	2,12	4,240	2,120	2,859
	55	2000	19,6	68,6	3,43	3,500	1,750	2,360
	55	2000	20	46,0	2,30	2,300	1,150	1,551
	55	4000	6	73,2	1,83	12,503	3,051	4,114
	55	4000	21	147,0	3,67	7,000	1,750	2,360
	55	4000	10	24,0	0,6	2,400	0,600	0,809
	55	4000	5	36,97	0,92	4,394	1,099	1,482
	55	4000	14,5	116,0	2,9	8,000	2,000	2,697
	55	6000	10	84,5	1,41	8,451	1,408	1,898
	55	6000	19,7	191,09	3,18	9,700	1,616	2,179
	55	7360	15,5	117,8	1,6	7,600	1,032	1,392

Таким образом, вынос пестицидов жидким стоком определяется по формуле

$$P_{\text{ж}} = \beta \sqrt{R} h_{\text{ст}} A(t), \quad (15)$$

где $h_{\text{ст}}$ — слой поверхностного стока, мм [5], значение химической растворимости R берется по справочной литературе [6, 7].

Исходя из формулы (15), $\beta = P_{\text{ж}} / A(t) h_{\text{ст}} \sqrt{R}$ (табл. 1). Для расчетов в условиях неполной информации значение константы β , вычисленное по литературным и экспериментальным данным, может быть принято равным средневзвешенному значению $1,7 \cdot 10^{-4}$.

В качестве веса выбрана величина, обратная квадрату показателя точности выборочных наблюдений, среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,33$. Согласно распределению Стьюдента, при уровне значимости 90% доверительный интервал $\beta = 0,88 \div 2,44$, погрешность составляет 47%.

Параметр β характеризует способность химических веществ переходить из почвы в водный поток. Он зависит от физико-химических свойств веществ и почвы, гидромеханики потока, капельно-дождевого воздействия и др.

По данным табл. 1, связи этого параметра со средней скоростью потока, вычисленной по формуле Шези — Маннинга, не обнаружено.

Но, видимо, при более детальных экспериментальных исследованиях может быть обнаружена зависимость этого параметра от безразмерных чисел Рейнольдса, Фруда, Вебера и др.

С учетом площадей разной степени эродированности формулу (15) запишем в виде

$$P_{\text{ж}} = \beta \sqrt{R} \sum_{t=0}^3 A(t) h_{\text{ст}} t F_t. \quad (16)$$

Для оценки достоверности расчетов, выполняемых по изложенным методикам (формулы (5), (16)), проведено сравнение экспериментальных значений выноса пестицидов с расчетными [9].

В табл. 2 приведен расчет выноса параквата с твердым стоком по исходным данным ($F = 2,71$ га; $A(0) = 11,2$ кг/га; $\gamma = 1,3$ т/м³; $h = 0,01$ м; $K = 0,0092$ сут⁻¹) экспериментальных исследований [9]. Среднее отклонение расчетных данных от экспериментальных составляет 30% и максимальное не превышает 60%. Расхождение расчетных данных и экспериментальных может быть значительно уменьшено при расчете по формуле нелинейного приближения (11).

В табл. 3 показан расчет выноса дифенамида жидким стоком по исходным данным ($F = 2,71$ га; $A(0) = 3,4$ кг/га; $R = 240$ мг/л; $K = 0,051$ сут⁻¹) экспериментальных исследований [9]. Среднее отклонение расчетных данных от экспериментальных — порядка 45%.

Месяц	Время со дня обработки до расчетного момента t , сут.	Kt	$\exp(-Kt)$	Количество парахвата в почве к расчетному моменту времени $A(t)$, кг/га	Модуль твердого стока M_s , т/га
VII	15	0,138	0,871	9,76	2,21
VIII	45	0,414	0,661	7,40	1,40
IX	75	0,690	0,502	5,62	0,004
X	105	0,966	0,381	4,27	0,01
XI	135	1,242	0,289	3,24	0,0
XII	165	1,518	0,219	2,45	0,15

Таблица 3

Расчет выноса дифенамида с поверхностным (водным) стоком

Месяц	Время со дня обработки до расчетного момента времени t , сут.	Kt	$\exp(-Kt)$	Количество дифенамида в почве к расчетному моменту времени $A(t)$, кг/га	$r = \beta\sqrt{R}$	Слой поверхностного стока $h_{ст}$, мм	Вынос дифенамида с водным стоком $P_{ж}$, кг		Относительная ошибка, %
							расчетный	экспериментальный	
VII	15	0,765	0,465	1,581	0,0026	14,7	0,162	0,057	184
VIII	45	2,295	0,100	0,340	0,0026	12,7	0,030	0,018	67
IX	75	3,825	0,022	0,075	0,0026	0,1	0,000	0,000	—
X	105	5,355	0,005	0,016	0,0026	0,2	0,000	0,000	—
XI	135	6,885	0,001	0,003	0,0026	0,1	0,000	0,000	—
XII	165	8,415	0,0002	0,0007	0,0026	22,0	0,000	0,000	—

Расчет выноса химических веществ в водные объекты важен при решении вопросов управления качеством вод (например в назначении тех или иных водоохраных мероприятий на сельскохозяйственных водосборах) и назначении оптимальных норм внесения химических веществ на сельскохозяйудия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указания по расчету стока наносов. ВСН 61—73. Л., Гидрометеоздат. 1974, 29 с.
2. Швец Г. И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка. Л., Гидрометеоздат. 1974, 183 с.
3. Мельников Н. Н., Волкова А. И., Короткова О. А. Пестициды и окружающая среда. «Химия», М., 1977, с. 240.

с твёрдым стоком

Слой смытой почвы $h_{см}$, м	Для параквата в смытой почве δ	$\delta A (t)$	Вынос параквата с твёрдым стоком P_T , кг		Относительная ошибка, %
			расчетный	экспериментальный	
$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,034	0,332	0,900	1,211	-25,7
$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,022	0,160	0,434	0,883	-50,8
$0,003 \cdot 10^{-4}$	0,0001	0,00034	0,0009	0,001	-10,0
$0,008 \cdot 10^{-4}$	0,0002	0,0006	0,0016	0,001	+60
0	0	0	0	0	0
$0,12 \cdot 10^{-4}$	0,0024	0,006	0,016	0,021	+23,8

4. Химическая защита растений. Под ред. Груздева Г. С. М., «Колос», 1974, 375 с.

5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л., Гидрометеиздат, 1975, 600 с.

6. Справочник по пестицидам (гигиена применения и токсикология). Под ред. Медведя Л. И. Киев., «Урожай», 1974, 448 с.

7. Краткий справочник по ядохимикатам. Под ред. Юхтина Н. Н. М., «Колос», 1973, 223 с.

8. Control of Water Pollution from Cropland ARS USDA, ORD US EPA, vol. I, II, November, 1975—June, 1976, p. 298.

9. Pesticide Transport and Runoff Model for Agricultural Lands. ORD US EPA, December, 1973, p. 360.

Computational methods for determination of chemicals (pesticides) washout from agricultural lands into water bodies by non-point run-off are described. Washout with the sediment discharge by rainwash and rivulets is calculated by a pesticide depth distribution diagram, and their portion carried away by rainfall run-off is determined by a parameter for determination of the pesticide portion carried off as a solution in 1 mm of the non-point run-off.

А. Н. СМЕРНОВА, А. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, Н. Г. ПРИМА,
Л. В. ДОБРОВОЛЬСКАЯ, Л. Я. АНИЩЕНКО

(ВНИИВО)

ПРОГНОЗ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОМЕХ В КАНАЛЕ ОКА — ДОН

При разработке Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР [2] выявился дефицит водных ресурсов в районе Верхнего Дона. Предусматривается обводнение его путем переброски части стока реки Оки. В качестве одного из вариантов трассы канала Ока — Дон предполагается частичное использование русла реки Осетр, которая впадает в Оку в 15 км выше г. Коломны.