

ЭРОЗИЯ  
ПОЧВ

УДК 631.459

КАЛИБРОВКА МОДЕЛЕЙ ПОЧВЕННОЙ ЭРОЗИИ НА ОСНОВЕ  
ИЗУЧЕНИЯ ВЫПАДАЮЩИХ ИЗ АТМОСФЕРЫ РАДИОИЗОТОПОВ

© 1995 г. А. Ю. Сидорчук, В. Н. Голосов

Географический факультет МГУ

Поступила в редакцию 19.10.94 г.

Разработан алгоритм для калибровки моделей почвенной эрозии по данным о содержании в почвенном профиле изотопа  $^{137}\text{Cs}$ . Для двух участков в бассейне р. Ведуги и р. Протвы проведена калибровка моделей Государственного гидрологического института и универсального уравнения почвенной эрозии, рассчитана интенсивность смыва почвы. Получено удовлетворительное совпадение рассчитанных и измеренных величин эрозии почвы.

## ВВЕДЕНИЕ

Эрозия почв является одной из главных причин снижения их плодородия, ухудшения качества поверхностных вод, заиления русел малых рек и водохранилищ. В то же время мониторинг темпов смыва существенно затруднен в связи с многофакторностью явления и, как следствие, большой пространственно-временной изменчивостью и значительной трудоемкостью проведения непосредственных измерений. Поэтому обычной практикой становится замена измерений скорости эрозии почв ее расчетом с помощью моделей почвенной эрозии. Таких моделей к настоящему времени создано большое количество, из которых наиболее известны USLE, CREAMS, ANSWERS, EUROSEM, EPIC, WEPP и другие [7, 9, 10, 14, 16, 18]. Калибровка моделей с использованием данных наблюдений на стоковых площадках и контрольных водосборах показала, что некоторые параметры всех без исключения моделей определяются для конкретных водосборов со значительными ошибками [7]. В первую очередь это относится к противозерозионной устойчивости почв, которая зависит от гранулометрического, агрегатного и химического состава почв, содержания гумуса и растительных остатков, структуры, влажности, пористости почв с учетом изменчивости этих параметров по почвенному профилю. В результате модели почвенной эрозии не заменяют мониторинга, так как для проведения расчетов для конкретных объектов (водосбор, поле и т.д.) необходима калибровка параметров модели, т.е. постановка полевых экспериментов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫПАДАЮЩИХ  
ИЗ АТМОСФЕРЫ РАДИОИЗОТОПОВ  
ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ЭРОЗИОННЫХ  
МОДЕЛЕЙ

Выход из замкнутого круга мониторинг-модель-мониторинг видится в использовании для калибровки эрозионных моделей информации, по-

лученной косвенными методами оценки темпов смыва, например, путем изучения миграции радиоактивных изотопов естественного ( $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{32}\text{Si}$ ) и искусственного ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) происхождения. В частности, изотоп  $^{137}\text{Cs}$  в природе не встречается; он появился в результате испытаний ядерного оружия в атмосфере и аварийных выбросов АЭС. Он практически полностью сорбируется преимущественно глинистой фракцией почвы, слабо мигрирует по вертикали и поэтому может переноситься только совместно с почвенными частицами [5, 13, 15], т.е. является индикатором почвенной эрозии. На этом основании ряд авторов использовали  $^{137}\text{Cs}$  для оценки интенсивности смыва почв и аккумуляции наносов [8, 12, 16].

Запись уравнения баланса  $^{137}\text{Cs}$  в почве зависит от принятой модели привноса и выноса радиоизотопов. Рассмотрим две модели со следующими параметрами:  $Y_i$  – удельное содержание радиоизотопа в слое естественной миграции изотопа в почве,  $Z_i$  – то же в пахотном горизонте ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ );  $X_{ii}$  – выпадение изотопа из атмосферы ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ) за период  $dT$  (в годах);  $H_0$  – мощность в м слоя естественной вертикальной миграции изотопа  $H_0 = v_0 dT$ , где  $v_0$  – скорость естественной вертикальной миграции изотопа (м/год);  $H$  – мощность пахотного слоя, м;  $E_{ii}$  – слой эрозии, м;  $K_r$  – коэффициент равномерности распределения размыва по площади. Индекс “ $i$ ”, “ $i-1$ ” относит величину к моменту времени  $T_i$ ,  $T_{i-1}$ , индекс “ $ii$ ” – к периоду между эпизодами эрозии  $dT = T_i - T_{i-1}$ .

1) Однослойная модель. Привнос радиоизотопов в почву происходит до периода интенсивной эрозии почв, и радиоизотопы распределены в пахотном горизонте равномерно по вертикали. В этом случае

$$Z_i = (X_{ii} + Z_{i-1})(1 - E_{ii}/H). \quad (1)$$

Такая модель эффективна при расчете концентрации радиоизотопов в зоне аккумуляции

ниже распахиваемых склонов для периода после начала 70-х годов (когда были прекращены ядерные испытания в атмосфере и привнос  $^{137}\text{Cs}$  сократился до минимальных размеров), и для расчета интенсивности эрозии на пашне для периода после 1986 г. в районах, где основной объем цезия был привнесен в почву при аварии на Чернобыльской АЭС. Однослойная модель наиболее часто применяется при расчетах интенсивности эрозии по балансу цезия [8, 12].

2) Двухслойная модель. Привнос радиоизотопов и эрозия почвы происходит при снеготаянии и/или дождевых осадках. Удаление радиоизотопов при эрозии происходит как из тонкого слоя естественного распространения радиоизотопа с его высокой концентрацией, так и из пахотного горизонта. При этом необходимо учитывать пространственную неравномерность и струйчатость размыва почвы с помощью коэффициента  $K_r$ . Введение этого коэффициента отражает тот факт, что размыв почв и вынос радиоизотопов происходит не тонким равномерным слоем по площади, а неравномерно по эрозионным бороздам и промоинам, которые могут быть глубже, чем слой естественного распространения радиоизотопа  $H_0$ . В этом случае

$$Y_i = X_{ii}^* (1 - K_r^* E_{ii} / H_0) + Y_{i-1}^* (1 - E_{ii} / H), \quad (2)$$

$$Z_i = Z_{i-1}^* (1 - E_{ii} / H),$$

если в конце периода  $dT$  проводится распашка, то для  $Z_i$  устанавливается значение  $Z_i + Y_i$ , для  $Y_{i-0}$ .

Появилась также трехслойная модель Воллинга и Куина [16], в которой принимается во внимание содержание цезия в подпахотном горизонте. Это дает возможность учитывать и аккумуляцию наносов. Однако в этом случае, а также при значительном изменении во времени глубины распашки  $H$ , более целесообразно использовать 3 тип модели баланса цезия с непрерывным изменением его концентрации по вертикали в почвенном профиле.

Решение (1) и (2) для последовательных моментов времени позволяет проследить эволюцию содержания радиоизотопа в почве. Элемент программы на Фортране-77, описывающий эволюцию во времени при чередующихся периодах эрозии во время снеготаяния  $E_s$  и выпадения ливневых дождей  $E_l$  приведен ниже:

```
do 1 j = 1, npoint
  Y = 0.
  Z = 0.
  ii = 0
do 2 i = 1, nevent
  jj = i - (i/2)*2
```

```
if (jj.NE.0) then
  ii = ii + 1
  E = a(n1)*Es(j, ii)*W
  nn = n3
else
  E = a(n2)*El(j, ii)*W
  nn = n4
end if
H0 = v0*dT(i)
p = a(nn)
if (kh(i).NE.0) then (*)
  Z = Z + Y
  Y = 0.
  q = 0.
  H00 = H0
else
  H00 = H00 + v0*dT(i)
  q = a(nn)
end if
Y = X(i)*(1.-p*E/H0) + Y*(1.-q*E/H00)
Z = Z*(1.-(E/H))
2 continue
afa(j) = Y + Z
1 continue
```

Здесь  $npoint$  – количество точек, в которых проводится расчет эрозии и содержания радиоизотопов,  $nevent$  – количество периодов эрозии (по 2 в год). Интенсивность смыва в периоды снеготаяния  $E_s$  и ливневых дождей  $E_l$  рассчитывается заранее по точкам и по годам (последних вдвое меньше, чем эрозионных периодов). Значения управляющих коэффициентов  $kh(i)$  указывают на наличие ( $kh = 1$ ) или отсутствие ( $kh = 0$ ) распашки перед  $i$ -тым периодом эрозии. Коэффициент  $W$  необходим для изменения размерности интенсивности эрозии  $E_s$  и  $E_l$  из т/га год в м/год. Коэффициенты  $a(n_1)$  и  $a(n_2)$  используются для калибровки моделей эрозии для условий снеготаяния и ливневого стока соответственно. Коэффициенты  $a(n_3)$  и  $a(n_4)$  определяют степень равномерности эрозии по площади в эти же периоды. При использовании однослойной модели (1) коэффициенты  $a(n_3)$  и  $a(n_4)$  полагаются равными нулю. Калибровка моделей эрозии заключается в подборе таких коэффициентов  $a(n_i)$ , при которых рассчитанные значения содержания изотопа в почве  $afa(j)$  минимально отличались бы от измеренных  $bk(j)$ .

#### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ ЭРОЗИИ ПОЧВ

В качестве примера возможности применения данных о содержании цезия в пахотных почвах для калибровки эрозионных моделей выбраны две простые расчетные методики:

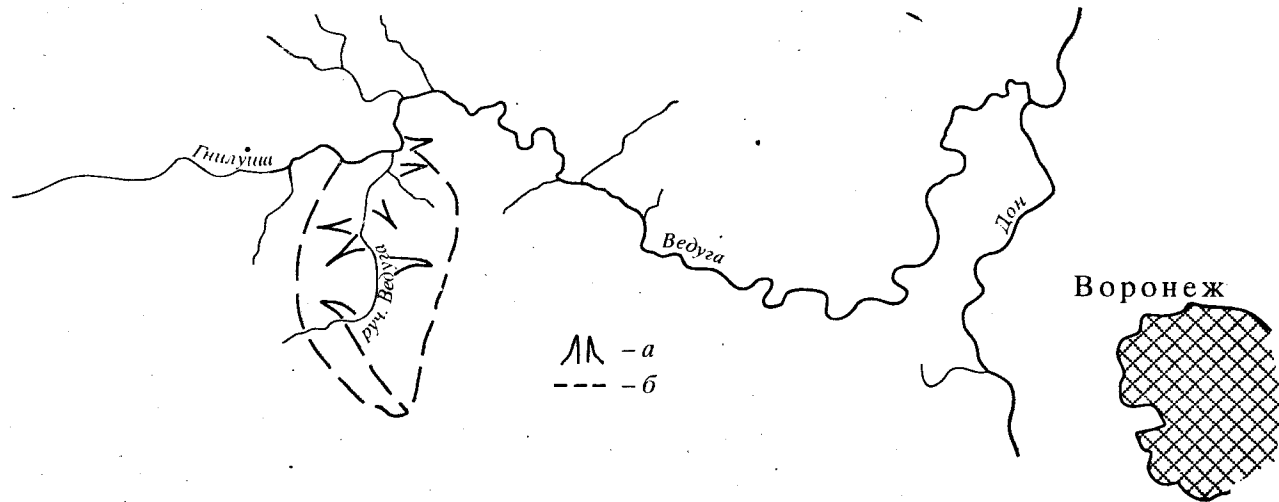


Рис. 1. Схема расположения объекта отбора проб (руч. Ведуга) в бассейне р. Дон. Обозначения: *a* – овражно-балочная сеть, *b* – граница участка отбора проб в бассейне р. Ведуга.

1) Для расчета смыва со склонов в период снеготаяния использована методика государственного геологического института (ГГИ) [2], преобразованная Ларионовым [4]:

$$E_s = C_s F(L, S, n, h). \quad (3)$$

Здесь  $F$  – функция от длины склона  $L$  (от ближайшего водораздела), уклона  $S$ , смываемости

почвы  $n$  и слоя склонового стока воды  $h$ ;  $C_s$  – эрозионный индекс растительности для периода снеготаяния.

2) Для расчета смыва со склонов в период летних дождей использовано Универсальное уравнение почвенной эрозии [18] (УУПЭ):

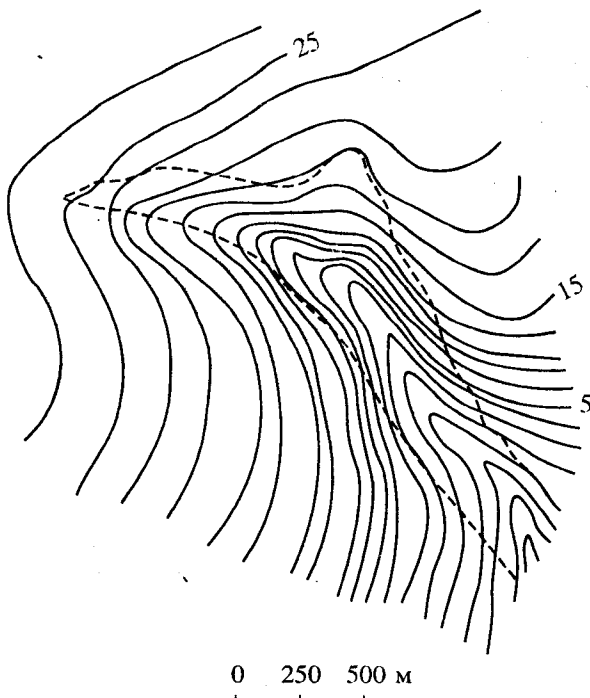
$$E_l = RC_i KLS P. \quad (4)$$

Это уравнение адаптировано для условий России Ларионовым [4]. В него входят эрозионные индексы: дождя  $R$ ; растительности  $C_i$ ; эродируемость почв  $K$ ; рельефа  $LS$  и противозерозионных мер  $P$ .

Необходимость калибровки уравнений ГГИ Службы охраны почв США обусловлена значительным разбросом соотношения измеренной рассчитанной интенсивности эрозии  $A = E_i/E_s$ . По данным Барабанова [2], для уравнения ГГИ на серых лесных почвах величина  $A$  составила 0.2; для оподзоленных черноземов Приобского плато  $A = 0.77$ ; для южных черноземов и каштановых почв Поволжья – 0.012 и 0.05 соответственно. По нашим данным для уравнения ГГИ на дерново-подзолистых почвах Калужской обл.  $A = 5.6$ ; для УУПЭ на черноземах бассейна нижнего Дона  $A = 0.69$ ; на светло-каштановых почвах Волгоградской обл.  $A = 1.86$ ; на выщелоченных черноземах Кузнецкой котловины  $A = 5.61$ .

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ УУПЭ И УРАВНЕНИЯ ГГИ

Для проверки возможности использования данных о содержании радионуклидов в эродированных почвах выбраны 2 участка, расположенные в лесостепной и лесной зонах Европейской части России (рис. 1).



0 250 500 м

Рис. 2. Пример типичного склонового водосбора в бассейне ручья Ведуга. Точками показана граница пашни.

**Таблица 1.** Изменение по годам факторов эрозии (эрозионного индекса дождя  $R$ ; влагозапаса в снеге перед началом снеготаяния  $H_s$  (см); эрозионных индексов растительности для периодов снеготаяния  $C_s$  и дождей  $C_l$ ) и рассчитанной с помощью откалиброванных моделей эрозии средней для всего эталонного участка интенсивности смыва почв при снеготаянии  $E_s$  и при дождях  $E_l$  (т/га в год)

Год	Объект								
	"Егоров овраг"						Ведуга		
	$R$	$H_s$	$C_l$	$C_s$	$E_l$	$E_s$	$R$	$C_l$	$E_l$
1956	7.8	92.0	0.37	1.00	10.2	4.6	17.4	0.22	11.8
1957	5.9	89.0	0.30	1.00	6.2	4.5	10.7	0.46	14.9
1958	9.8	114.0	0.25	0.50	8.6	2.9	12.3	0.29	10.9
1959	5.9	62.0	0.01	0.01	0.2	0.0	5.8	0.61	10.8
1960	5.2	101.0	0.01	0.01	0.2	0.1	2.9	0.34	3.0
1961	9.9	30.0	0.37	0.08	12.9	0.1	5.1	0.22	3.4
1962	5.4	48.0	0.52	0.50	9.9	1.3	14.8	0.53	23.8
1963	6.6	62.0	0.37	1.00	8.6	3.1	3.6	0.29	3.2
1964	2.7	62.0	0.30	1.00	2.9	3.1	6.1	0.59	10.9
1965	9.1	73.0	0.25	0.50	8.0	1.8	6.1	1.00	18.4
1966	9.4	95.0	0.01	0.01	0.3	0.1	9.7	0.22	6.5
1967	5.1	75.0	0.01	0.01	0.2	0.1	3.6	0.46	5.1
1968	7.6	114.0	0.37	0.08	9.9	0.5	2.9	0.29	2.6
1969	5.4	54.0	0.52	0.50	9.9	1.4	10.2	0.61	18.9
1970	8.4	100.0	0.37	1.00	11.0	5.1	1.9	0.34	2.0
1971	2.0	22.0	0.30	1.00	2.1	0.9	0.5	0.22	0.3
1972	3.7	33.0	0.25	0.50	3.3	0.8	9.9	0.53	16.0
1973	11.2	64.0	0.01	0.01	0.4	0.0	3.4	0.29	3.0
1974	4.3	0.0	0.01	0.01	0.2	0.0	14.3	0.59	25.7
1975	9.5	50.0	0.37	0.08	12.4	0.2	14.0	1.00	42.8
1976	17.0	71.0	0.52	0.50	31.2	1.8	2.9	0.22	2.0
1977	13.1	100.0	0.37	1.00	17.1	5.1	5.8	0.46	8.1
1978	2.5	95.0	0.01	0.01	0.1	0.1	7.0	0.29	6.2
1979	3.5	77.0	0.37	0.50	4.6	1.9	5.1	0.61	9.5
1980	9.9	60.0	0.37	0.50	12.9	1.5	31.9	0.34	33.1
1981	11.3	70.0	0.37	0.50	14.7	1.8	6.1	0.22	4.1
1982	1.7	145.0	0.30	1.00	1.8	7.5	11.4	0.53	18.4
1983	0.1	102.0	0.55	1.00	0.2	5.2	6.1	0.29	5.4
1984	2.1	83.0	0.37	0.50	2.7	2.1	18.9	0.59	33.9
1985	0.1	114.0	0.30	1.00	0.1	5.8	18.4	1.00	56.1
1986	0.1	168.0	0.01	0.08	0.0	0.7	11.4	0.22	7.6

**Таблица 2.** Изменение факторов рельефа (уклона  $S$  и длины линий тока  $L$ ), измеренных ( $C_{sф}$ ) и рассчитанных ( $C_{sр}$ ) содержаний в %  $^{137}\text{Cs}$  и рассчитанных среднемноголетних величин интенсивности смыва при дождях  $E_l$  по точкам на площади водосбора ручья Ведуга

Номер точки отбора	Показатель				
	$S$	$L$	$C_{sф}$	$C_{sр}$	$E_l$
1	0.0560000	130.0	55.0	74.2	11.7
2	0.0566667	200.0	34.0	70.7	13.7
3	0.0636364	270.0	39.0	66.9	16.0
4	0.0400000	300.0	75.0	78.5	9.4
5	0.0004608	427.0	89.0	97.0	0.5
6	0.0090909	617.0	63.0	93.3	2.2
7	0.0076923	793.0	84.0	93.5	2.1
8	0.0233333	60.0	86.0	94.8	1.5
9	0.1200000	120.0	65.0	55.6	23.5
10	0.0685714	170.0	56.0	66.9	16.0
11	0.0333333	245.0	58.0	82.5	7.3
12	0.0063158	390.0	100.0	95.7	1.1
13	0.0061404	644.0	100.0	95.0	1.4
14	0.0071006	699.0	90.0	94.2	1.7
15	0.1111111	133.0	73.0	57.1	22.5
16	0.0526316	203.0	57.0	72.8	12.5
17	0.0904762	307.0	91.0	57.0	22.5
18	0.0814815	313.0	82.0	59.9	20.5
19	0.2000000	260.0	70.0	31.8	45.7
20	0.0960000	310.0	67.0	55.1	23.9
21	0.0600000	135.0	84.0	71.4	13.3
22	0.0880000	200.0	34.0	60.8	19.9
23	0.1000000	180.0	39.0	58.2	21.7

Первый находится в бассейне ручья Ведуга на юго-востоке Средне-Русской возвышенности в пределах Воронежской обл. в зоне преобладания ливневого смыва. Рельеф территории является ведущим фактором, определяющим пространственную дифференциацию смыва на склонах. Поэтому в бассейне ручья Ведуга были опробованы типичные склоны с диапазоном длин линий тока от ближайшего водораздела 60 - 790 м и локальных (на отрезке склона длиной 40 м) уклонов 0.005 - 0.2 (табл. 1, пример типичного склона приведен на рис. 2). Почвенный покров территории однороден, это типичные и выщелоченные черноземы разной степени смывистости, с непромывным водным

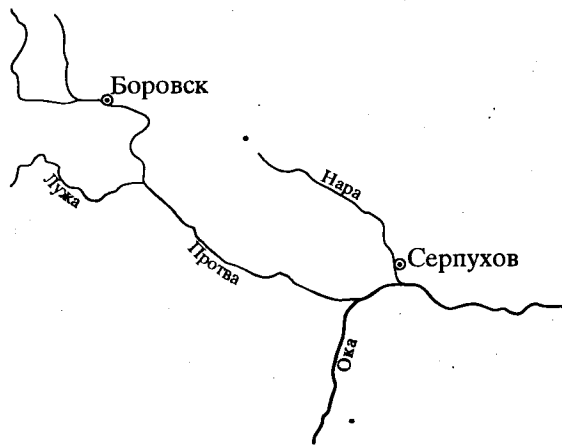


Рис. 3. Схема расположения водосбора "Егоров овраг" в пределах бассейна Оки. Звездочкой отмечено расположение объекта отбора проб в бассейне р. Протвы.

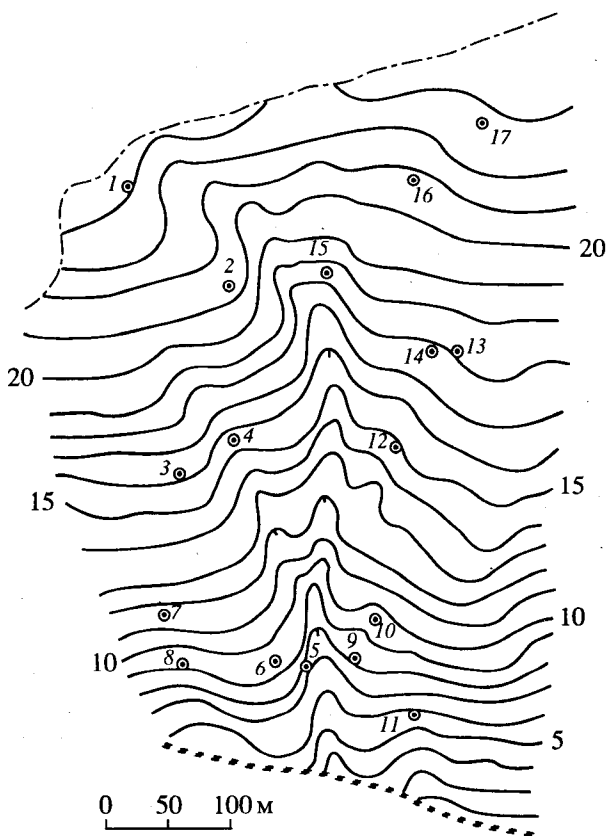


Рис. 4. План участка "Егоров овраг" и расположение точек отбора проб (в кружках). Штриховкой показана грунтовая дорога, штрих-пунктирной линией – граница пашни.

режимом (скорость фильтрации 1.5 мм/мин), хорошей поглотительной способностью  $^{137}\text{Cs}$  (скорость естественной миграции  $v_0 = 4.5 \times 10^{-3}$  м/год по [5]) и средним индексом эродированности почв в УУПЭ  $K = 2.1$  т/га. В 1956 - 1986 гг. на полях применялся

следующий севооборот: озимые, яровые ранние яровые поздние, сахарная свекла и корнеплоды, картофель, кукуруза и подсолнечник. В расчетах принималось, что в течение года одна и та же культура высевалась на всех полях. Средняя глубина распашки составляла 25 см.

Для территории характерно выпадение ливневых осадков в летний период, однако их распределение по годам неравномерно, что отразилось на изменчивости эрозионного индекса дождя  $R$  в УУПЭ (табл. 2), среднемноголетнее значение которого составило 7.8 единиц. Несмотря на практически ежегодное формирование устойчивого снежного покрова, поверхностный сток образуется примерно в 50% случаев [6].

Фактическая величина смыва в бассейне ручья Ведуга установлена путем измерения объема аккумуляции наносов в прудках заиления у водозадерживающих валов, расположенных у подножий распаханых склонов. Были выяснены годы сооружения валов и установлено, что они не промывались и не очищались со времени обмера. Средний измеренный смыв почв с распаханых водосборов прудков составил 5.1 т/га в год. Средний смыв в период ливневого стока, рассчитанный по некалиброванной формуле (4), составил на этих же участках 8.0 т/га в год.

Второй участок расположен в среднем течении р. Протвы на границе Калужской и Московской областей (рис. 3) на юге лесной зоны в области распространения вторично-ледникового рельефа. Характерной чертой рельефа обрабатываемых земель являются древние водно-ледниковые эрозионные формы – ложбины и потяжины, расчленяющие склоны на ряд микроводосборов. Опробование почв на содержание изотопа  $^{137}\text{Cs}$  проводилось в пределах одного склонового водосбора "Егоров овраг" площадью 12 га с диапазоном длин линий тока 30 - 240 м и локальными уклонами 0.013 - 0.067 (табл. 3, рис. 4). Почвы участка – среднесуглинистые дерново-подзолистые их водопроницаемость достаточно низкая – около 1 мм/мин, тогда как смываемость высока – коэффициент  $K = 4.3$ . Скорость вертикальной естественной миграции  $^{137}\text{Cs}$  составляет для этого типа почв  $\sim 1.8 \times 10^{-3}$  м/год [5].

Традиционный севооборот на обследованном водосборе включает: картофель, яровые, озимые, три года многолетних трав, озимые. Фактические данные по высеваемым культурам, имеющиеся с 1978 г., свидетельствуют о несоблюдении севооборота, хотя набор культур ему соответствует. Распашка земель проводится на глубину 22 см.

Юг лесной зоны Европейской территории России является областью проявления талого и ливневого смыва. Среднемноголетний индекс осадков  $R = 7.3$  единицы, средние запасы воды в снеге

на период снеготаяния  $H_s = 90$  мм. Вариабельность этих параметров по годам за расчетный период составляет для  $R$  0.07 - 11.3 единицы, для  $H_s$  0 - 168 мм (табл. 1). Фактическими наблюдениями за стоком воды и наносов, которые регулярно проводятся на водосборе с 1982 г., зафиксировано только 4 случая ливневого смыва, тогда как талый смыв отмечался в 50%, а сток талых вод - в 90% лет наблюдений. Смыв почв вычислялся по величине стока наносов в замыкающем створе водосбора "Егоров овраг" и составил в среднем за период снеготаяния в 1982 - 1989 гг. 2.0 т/га в год. Расчет по некалиброванной формуле (3) для этого водосбора получена величина смыва 0.4 т/га в год.

Образцы на содержание  $^{137}\text{Cs}$  отбирались на обоих участках в мае - июне 1986 г. с помощью специального цилиндрического пробоотборника диаметром 8 см послойно через 5 см из пахотного горизонта, а также в опорных точках из подпахотного слоя до глубины 40 см. Анализы на содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве выполнены в лаборатории Института экспериментальной метеорологии (Обнинск). Для каждого разреза по результатам анализов вычислялось суммарное удельное содержание изотопа. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  на распаханых плоских междуречных пространствах принималось за 100%, для остальных точек рассчитывалась доля от этого количества в %. Распределение выпадения  $^{137}\text{Cs}$  из атмосферы на почву по годам принято по данным Силантьева и Шкуратовой [5] также в процентах от суммарного за весь период наблюдений. Такой подход позволяет снизить влияние выноса изотопа с полей неэрозионными процессами, например, с урожаем.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ В МОДЕЛЯХ ЭРОЗИИ И ИХ АНАЛИЗ

Расчеты проводились в следующей последовательности:

1) По формулам (3) и (4) для всех точек по годам рассчитывались величины интенсивности эрозии  $E_s$  и  $E_l$ . 2) Задавались начальные значения коэффициентов  $a(n_1)$ ,  $a(n_2)$ ,  $a(n_3)$  и  $a(n_4)$ ; 3) по программе (\*) для каждой точки по годам рассчитывалось конечное содержание изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в почве  $afa(j)$ ; 4) для всех точек определялась сумма квадратов разностей, рассчитанных  $afa(j)$ , и фактических  $bk(j)$  содержаний изотопа и вычислялось среднеквадратическое отклонение  $f_0$ :

$$f_0 = 0.$$

$$\text{do } 3 \text{ } j = 1, \text{ npoint}$$

$$f_0 = f_0 + (afa(j) - bk(j)) ** 2 (**)$$

3 continue

$$f_0 = \text{sqrt}(f_0) / \text{float}(\text{npoint} - 1)$$

Таблица 3. Изменение факторов рельефа (уклона  $S$  и длины линий тока  $L$ ), измеренных ( $Cs_{\phi}$ ) и рассчитанных ( $Cs_p$ ) содержаний в %  $^{137}\text{Cs}$  и рассчитанных среднеемноголетних величин интенсивности смыва при снеготаянии  $E_s$  и при дождях  $E_l$  (т/га в год) по точкам на водосборе "Егоров овраг"

Номер точки отбора	Показатель					
	$S$	$L$	$Cs_{\phi}$	$Cs_p$	$E_l$	$E_s$
1	0.0200000	50.0	100.0	92.6	1.5	0.0
2	0.0600000	65.0	13.6	35.4	9.3	7.3
3	0.0400000	50.0	100.0	86.0	3.6	0.6
4	0.0666667	125.0	58.2	32.0	17.7	6.9
5	0.0400000	45.0	53.2	89.7	3.3	0.2
6	0.0342857	40.0	82.8	92.1	2.5	0.1
7	0.0285714	205.0	89.8	77.1	6.9	1.1
8	0.0424242	240.0	83.3	58.4	12.3	2.8
9	0.0400000	150.0	39.5	66.1	9.4	2.1
10	0.0400000	125.0	75.4	68.1	8.2	2.1
11	0.0450000	100.0	53.5	60.4	8.3	3.3
12	0.0400000	85.0	57.9	63.6	5.8	3.3
13	0.0400000	50.0	56.4	86.0	3.6	0.6
14	0.0125000	200.0	57.1	92.8	2.0	0.2
15	0.0500000	150.0	67.6	52.7	13.2	3.6
16	0.0200000	100.0	81.0	90.0	2.3	0.5
17	0.0200000	30.0	100.0	94.4	1.2	0.1

Путем вариации значений коэффициентов  $a(n_i)$  величина  $f_0$  минимизировалась по алгоритму Пауэлла [1]. Для лесостепного водосбора ручья Ведуга минимум  $f_0$  составил 4.244% при значениях коэффициентов  $a(n_1) = 0.0$ ;  $a(n_2) = 0.4$ ;  $a(n_3) = 0.0$ ;  $a(n_4) = 0.0$ . Это соответствует средним величинам смыва  $E_s = 0.0$  и  $E_l = 14.0$  т/га. Таким образом калибровка формулы (3) показала, что эрозия при снеготаянии на этой территории не выражена, что полностью подтверждается данными наблюдений. Это позволило провести калибровку только модели смыва при дождях (4), минимум  $f_0$  составил 4.243% при коэффициентах  $a(n_2) = 0.38$  и  $a(n_4) = 6.3\%$ . Это соответствует средней величине смыва во время ливней 13.4 т/га.

Для расположенного на юге лесной зоны водосбора "Егоров овраг" минимум  $f_0$  варьировал в пределах 4.901 - 4.903% в диапазоне коэффициентов  $a(n_1)$  4.87 - 7.04;  $a(n_2)$  0.62 - 0.68;  $a(n_3)$  67.3 - 100.0%;  $a(n_4)$  0.5 - 2.8% при среднегодовых величинах

смыва –  $E_s$  1.58 - 2.29 и  $E_t$  6.53 - 7.19 т/га в год. По площади и во времени величины смыва меняются в соответствии с изменениями значений факторов эрозии (табл. 1, 2).

Большое значение имеет устойчивость процедуры оптимизации и ее результатов при случайной изменчивости исходных параметров. При использовании двухслойной модели (2) и всех четырех калибровочных коэффициентов минимизируемая функция для рассмотренных примеров многомодальна. При этом количество локальных минимумов и величина  $f_0$  в точке глобального минимума увеличиваются с уменьшением количества расчетных точек по площади. Поэтому необходимо тщательное исследование поверхности минимизируемой функции путем варьирования величин начальных значений коэффициентов и последовательности выбора направлений поиска минимума. Гораздо более устойчивы решения при использовании 2 или 1 калибровочных коэффициентов (применение уравнения (2) только для смыва при снеготаянии, или при дождях; либо применение уравнения (1)). В этом случае вариация количества расчетных точек на площади показала, что метод дает устойчивые результаты при количестве точек опробования  $> 8$ .

Случайные изменения годовых величин выпадения  $^{137}\text{Cs}$  относительно кривой Силантьева в пределах 1 - 5% не влияют на средние величины рассчитанного смыва. Близкий вывод получен Воллингом и Куином [16] при численных экспериментах по сравнению рассчитанной по балансу цезия интенсивности эрозии при разном распределении величин выпадения цезия по годам. Ошибки в задании параметров модели эрозии почв (например  $P$  и  $C$ ) также демпфируются процедурой калибровки.

Наибольшее влияние на величину рассчитанного смыва оказывает значение средней глубины пахотного слоя  $H$ , что непосредственно следует из упрощенного (слой эрозии во времени неизменен) и линеаризованного решения уравнения (1). В то же время случайная изменчивость мощности пахотного горизонта по площади в пределах  $dH = 5$  см практически не влияет на среднюю величину рассчитанного смыва, хотя дисперсия оценки увеличивается с увеличением  $dH$ .

## ВЫВОДЫ

1. Метод калибровки моделей эрозии почв по концентрации в почве  $^{137}\text{Cs}$  при применении уравнения (2) и всех четырех коэффициентов  $a(n_1)$ ,  $a(n_2)$ ,  $a(n_3)$  и  $a(n_4)$  требует тщательного поиска глобального минимума. Поэтому для территорий с совместным проявлением эрозии при снеготаянии и во время дождей для калибровки формул

(3) и (4) необходимо располагать не менее чем 25 - 30 точками измерения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве. При использовании двух коэффициентов метод устойчив по отношению к случайным изменениям основных факторов. Поэтому для территорий с преобладанием одного вида эрозии для калибровки формул (3) и (4) достаточно 8 - 10 точек измерения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве.

2. Наиболее сильное воздействие на результаты калибровки оказывает величина мощности пахотного горизонта – слоя осреднения концентрации изотопа в почве. Поэтому определение этого параметра необходимо проводить наиболее тщательно.

3. Сравнение рассчитанных по калиброванным моделям и измеренных значений смыва почв показывает их удовлетворительное совпадение. Для водосбора "Егоров овраг" среднемноголетний измеренный смыв для периода снеготаяния в 1982 - 1989 гг. составил 2.0 т/га в год, а рассчитанный по модели ГГИ с калибровочным коэффициентом  $a(n_1) = 5.0 - 7.0$  находится в пределах 2.0 - 2.8 т/га в год. Для водосбора ручья Ведуга средний измеренный смыв при дождях составил менее 5.1 т/га в год, а рассчитанный с помощью УУПЭ с калибровочным коэффициентом  $a(n_2) = 0.4 - 3.2$  т/га в год.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аоки М. Введение в методы оптимизации. М.: Наука, 1977. 235 с.
2. Барабанов Н.Т. Агролесомелиорация в почвозащитном земледелии. Волгоград: Изд-во ВНИИ-АЛМИ, 1993. 156 с.
3. Инструкция по определению расчетных гидрологических характеристик при проектировании противоэрозионных мероприятий на Европейской территории СССР. ВСН 04-77. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 62 с.
4. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
5. Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г. Обнаружение промышленных загрязнений почвы и атмосферных выпадений на фоне глобального загрязнения. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 136 с.
6. Сурмач Г.П. Опыт расчета смыва для комплекса противоэрозионных мероприятий // Почвоведение. 1979. № 4. С. 92 - 104.
7. Bingner R.L. Comparison of the components used in several sediment yield models // Trans. of Amer. Soc. Agric. Eng. 1990. V. 33. № 4. P. 1229 - 1238.
8. Kachanoski R.G. Comparison of measured soil Caesium-137 losses and erosion rate // Canadian Journal of Soil Science. 1987. V. 67. № 2. P. 199 - 203.

9. *Knisel W.G.* CREAMS: a field scale model for chemicals runoff and erosion from agricultural managements. USDA Conservation Research Report. № 26. 640 p.
10. *Laflen J.M., Lane L.J., Foster G.R.* WEPP: A new generation of erosion prediction technology // *J. of Soil and Water Conservation*. 1991. V. 46. № 1. P. 34 - 38.
11. *Livens F.R., Baxter M.S.* Chemical associations of artificial radionuclides in Cumbrian soils // *Environmental Radioactivity*. 1988. № 7. P. 75 - 86.
12. *Loughram R.J., Elliott G.L., Campbell B.L. et al.* Estimation of erosion using the radionuclide Caesium-137 in three diverse areas in eastern Australia // *Applied Geography*. 1993. № 13. P. 169 - 188.
13. *Squire H.M., Middleton L.J.* Behavior of  $^{137}\text{Cs}$  in soils and pastures – a long term experiment // *Radiation Botany*. 1966. № 6. P. 413 - 423.
14. *Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.R.* RUSLE – revised universal soil loss equation // *J. Soil and Water Conservation*. 1991. V. 46. № 1. P. 30 - 33.
15. *Walling D.E., Quine T.A.* The use of Caesium-137 measurement in soil erosion surveys. Erosion and Sediment Trasport Monitoring Programmes in the River Basins. IAHS Publ. 1992. № 210. P. 143 - 152.
16. *Walling D.E., Quine T.A.* The use of Caesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation: Handbook for application of the Caesium-137 technique. Univ. of Exeter, Dept. of Geogr. 1993. 196 p.
17. *Williams J.R., Renard K.G., Dyke D.T.* A new method for assessing the effect of erosion on productivity. The EPIC model // *J. of Soil and Water Conservation*. 1983. V. 38. № 6. P. 381 - 383.
18. *Wischmeier W.H., Smith D.P.* Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. USDA Handbook № 237, Washington, 1978. 65 p.

## Calibrating of Soil Erosion Models by Studies of Radioactive Atmospheric Fall Out

A. Yu. Sidorchuk, V. N. Golosov

An algorithm to calibrate soil erosion models has been proposed, it was derived from data on  $^{137}\text{Cs}$  isotope content in soils. Two models for soil erosion assessment – of the State Hydrological Institute and the Universal Soil Loss Equation, have been calibrated at two experimental plots in the Protva and Veduga rivers basins; soil loss rate has been quantified. The coincidence of data, obtained by calculation and direct measurements proved to be satisfactory.