

УДК 626.846

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СОЛЕЙ В ПОЧВОГРУНТАХ ПО ДАННЫМ РАДИОИНДИКАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Н. С. ГАЛИБИН

(Кафедра прикладной атомной физики и радиохимии)

Наиболее простой моделью, которая описывает движение минеральных солей, токсикантов и удобрений в почвогрунтах, является уравнение с дисперсионным членом:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Здесь n и N — соответственно количество растворенного и сорбированного ионов в единице объема грунта; D — коэффициент продольной дисперсии; u — средняя скорость движения влаги в поровом пространстве в направлении вертикальной координаты x ; t — время.

В Московской области была проведена серия экспериментов с внесением в почву несорбирующегося изотопа ^{36}Cl [4]. Малый объем раствора изотопа пропитывал первоначально лишь несколько кубических сантиметров почвы, образуя точечную метку. Под действием фильтрующейся влаги атмосферных осадков метка размывается согласно уравнению

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u \frac{\partial n}{\partial x} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + D_0 \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} + D_0 \frac{\partial^2 n}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где D_0 — коэффициент дисперсии при $u=0$.

Уравнение (2) отражает зависимость коэффициента дисперсии от величины и направления скорости u . В случае точечной метки

$$n = \frac{N}{8D^{1/2}D_0(\pi t)^{3/2}} \exp \left\{ -\frac{(x-ut-\xi)^2}{4Dt} - \frac{(y-\eta)^2}{4D_0t} - \frac{(z-\zeta)^2}{4D_0t} \right\}, \quad (3)$$

где N — масса внесенной метки; $x=\xi$, $y=\eta$, $z=\zeta$ — место внесения метки в системе координат x, y, z .

Из уравнения (3) следует, что поперечными равной концентрации являются эллипсоиды вращения, которые и наблюдаются в действительности. По длине большой δ_x и малой $\delta_y=\delta_z$ осей эллипсоида при условии

$$\frac{(x-ut-\xi)^2}{4Dt} + \frac{(y-\eta)^2}{4D_0t} +$$

$$+ \frac{(z-\zeta)^2}{4D_0t} = 1 \quad (4)$$

находим параметры D и D_0 .

$$D = \delta x^2 / 16t, \quad (5)$$

$$D_0 = \delta y^2 / 16t. \quad (6)$$

Влияние скорости u на параметр D в тонкодисперсных пористых средах общеизвестно. Покажем, что для каждого почвогрунта с определенными физико-химическими свойствами существует однозначная зависимость между параметрами D , D_0 , u . Рассмотрим решение уравнения

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u \frac{\partial n}{\partial x} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (7)$$

если в момент $t=0$ все частицы вещества сосредоточены на бесконечно протяженной плоскости $x=0$ в системе координат x, y, z и на единицу площади плоскости приходится Q частиц. При таком начальном условии решение уравнения (7) для бесконечной пористой среды имеет вид

$$n = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp \left\{ -\frac{(x-ut)^2}{4Dt} \right\}. \quad (8)$$

Допустим, что вектор скорости u образует с осью x угол α , а составляющие вектора скорости по осям координат соответственно равны

$$u_x = u \cos \alpha, \quad (9)$$

$$u_y = u \sin \alpha, \quad (10)$$

$$u_z = 0. \quad (11)$$

Вертикальной составляющей u_x соответствует коэффициент дисперсии D_x . Тогда вместо решения (8) получим

$$n = \frac{Q}{2\sqrt{\pi D_x t}} \exp \left\{ -\frac{(x-u_x t)^2}{4D_x t} \right\}. \quad (12)$$

С другой стороны, распределение концентрации к моменту t является результатом суперпозиции точечных источников концентрации мощностью $Q d\eta d\zeta$, которые все вместе в момент $t=0$ образуют бесконечный плоский источник концентрации мощностью Q . Координаты $y=\eta$, $z=\zeta$ определяют каждый такой точечный источник на пло-

скости $x = \xi = 0$. Согласно принципу суперпозиции

$$n = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} QGnd\zeta. \quad (13)$$

Функция G называется функцией концентрационного влияния точечного источника частиц. В решении (3), где направление скорости u совпадает с вертикальной координатой x , эта функция определяется выражением

$$G = \frac{1}{8D^{1/2}D_0(\pi t)^{3/2}} \exp \left\{ -\frac{(x-ut-\zeta)^2}{4Dt} - \frac{(y-\eta)^2}{4D_0t} - \frac{(z-\zeta)^2}{4D_0t} \right\}. \quad (14)$$

Если повернуть систему координат x, y, z вокруг оси z на угол α так, чтобы направление оси x совпало с вектором u , получим новую систему координат x_1, y_1, z_1 , где вид функции концентрационного влияния точечного источника аналогичен функции (14)

$$G = \frac{1}{8D^{1/2}D_0(\pi t)^{3/2}} \times \exp \left\{ -\frac{(x_1-ut-\xi_1)^2}{4Dt} - \frac{(y_1-\eta_1)^2}{4D_0t} - \frac{(z_1-\zeta_1)^2}{4D_0t} \right\}. \quad (15)$$

Учитывая связь между системами координат

$$x_1 = x \cos \alpha - y \sin \alpha, \quad (16)$$

$$y_1 = x \sin \alpha + y \cos \alpha, \quad (17)$$

$$z_1 = z, \quad (18)$$

получим

$$x_1 - ut - \xi_1 = (x - u_x t - \xi) \cos \alpha - (y + u_y t - \eta) \sin \alpha, \quad (19)$$

$$y_1 - \eta_1 = (x - u_x t - \xi) \sin \alpha + (y + u_y t - \eta) \cos \alpha, \quad (20)$$

$$z_1 - \zeta_1 = z - \zeta. \quad (21)$$

Запишем функцию (15) в системе координат x, y, z при $\xi = 0$.

$$G = \frac{1}{8D^{1/2}D_0(\pi t)^{3/2}} \times \exp \left\{ -A(x - u_x t)^2 - B(x - u_x t)(y - u_y t - \eta) - C(y + u_y t - \eta)^2 - \frac{(z - \zeta)^2}{4D_0 t} \right\}, \quad (22)$$

где

$$A = \cos^2 \alpha / 4Dt + \sin^2 \alpha / 4D_0 t, \quad (23)$$

$$B = \sin \alpha \cos \alpha (1/2D_0 t - 1/2Dt), \quad (24)$$

$$C = \sin^2 \alpha / 4Dt + \cos^2 \alpha / 4D_0 t. \quad (25)$$

Подставляя (22) в (13) и выполняя интегрирование, получим

$$n = \frac{Q}{2 \sqrt{\pi t [D_0 + (D - D_0) u_x^2 / u^2]}} \times \exp \left\{ -\frac{(x - u_x t)^2}{4t [D_0 + (D - D_0) u_x^2 / u^2]} \right\}. \quad (26)$$

Из равенства выражений (12) и (26) находим

$$D_x = D_0 + (D - D_0) u_x^2 / u^2. \quad (27)$$

Так как угол α выбран произвольно, то из (27) следует

$$\frac{D_x - D_0}{u_x^2} = \frac{D - D_0}{u^2} = \lambda = \text{const}, \quad (28)$$

или

$$D = D_0 + \lambda u^2. \quad (29)$$

Обработка результатов натуральных наблюдений проводилась по данным размытия меток, полученных с трех участков.

Участок 1 расположен в лесу на выровненном водораздельном плато. Почва подзолистая, тяжелосуглинистая, оглеенная, сформирована на покровном суглинке мощностью около 2 м.

Участок 2 расположен на пашне, приблизительно в 500 м от участка 1. Почва представляет собой хорошо окультуренный аналог почвы под участком 1.

Участок 3 расположен на равнине, образованной древнеаллювиальными и озерными отложениями. Поверхностные пески и супеси подстилаются на глубине 1,5—3,5 м тяжелыми озерными глинами. Почва дерново-слабоподзолистая, иллювиально-железистая под лесной естественной растительностью.

Через определенное время после внесения изотопной метки в почву с помощью счетчиков излучения в лабораторных условиях определялось пространственное распределение относительной активности размытой метки.

В табл. 1 приведены результаты определения концентрации вещества по профилю почвы и соответственно параметры u, D, D_0, λ , полученные по данным наблюдений с 13 октября по 19 декабря 1976 г. на участке 1 и с 10 октября по 22 декабря 1977 г. на всех трех участках. В расчет принимались те повторности на каждом участке, где можно пренебречь боковым смещением точки с максимальной концентрацией вещества по профилю.

В табл. 2 приведены данные о гранулометрическом составе исследуемых почв. Доля фракции крупных частиц на участке 3 значительно превышает долю этой фракции на участках 1 и 2 в тяжелосуглинистых почвах. Поэтому, естественно, что значения D_0 и λ на участках 1 и 2 близки или совпадают.

Важно правильно рассчитать зависимость $N=f(n)$ для уравнения (1). Нужно получить несколько значений отношения N/n при различных концентрациях n . Расчет следует вести относительно каждого из сор-

Параметры дисперсионной модели

Повторность	Глубина l , м	δ_x^2	δ_y^2	u	D	D_0	λ , сут	D_0 среднее	λ среднее
		см ²		см/сут					
Участок 1									
Время размытия 67 сут, 1976 г.									
№ 1	40	1570	823	0,60	1,46	0,77	1,92	0,70	2,22
№ 2	32	1290	662	0,48	1,20	0,62	2,52		
Время размытия 73 сут, 1977 г.									
№ 1	47	1950	680	0,64	1,67	0,58	2,66	0,63	2,25
№ 2	58	2120	795	0,79	1,83	0,68	1,84		
Участок 2									
Время размытия 72 сут, 1977 г.									
№ 1	50	2360	762	0,69	2,05	0,66	2,92	0,69	2,61
№ 2	60	2640	813	0,83	2,29	0,71	2,29		
Участок 3									
Время размытия 73 сут, 1977 г.									
№ 1	58	2780	1520	0,79	2,38	1,30	1,73	1,14	1,51
№ 2	56	2018	1135	0,77	1,73	0,97	1,28		

бирующихся ионов, так как в почвогрунтах идут всевозможные реакции обмена, в результате меняется ионный состав порового раствора. Допустим, имеется исходный раствор данного иона с концентрацией C_0 . После того как K мл этого раствора смешали с l г сухого порошка грунта, концентрация иона в фильтрате уменьшилась и оказалась равной C . Следовательно, 1 г сухого вещества сорбировал данный ион в количестве $(C_0 - C)K/l$. В единице объема грунта содержится d г сухого вещества, поэтому

$$N = (C_0 - C)Kd/l \quad (30)$$

или

$$N/n = (C_0 - C)Kd/Clq, \quad (31)$$

где $n = Cq$, q — объемная влажность грунта.

Проводя серию таких экспериментов при различных C_0 и определяя концентрацию C фильтрата химическим методом, получим изотерму сорбции $N = f(n)$. Если у исследуемого иона имеется подходящий радиоактивный изотоп, то измерение концентрации исходного раствора и фильтрата проводится счетчиком излучения. Так как кон-

центрация раствора пропорциональна удельной активности излучения индикатора, то

$$N/n = (a - b)Kd/blq, \quad (32)$$

где a и b — соответственно удельная активность исходного раствора фильтрата.

Далее зависимость $N = f(n)$ аппроксимируется полиномом и подставляется в уравнение (1), которое решается обычно численными методами при различных краевых и начальных условиях. В каждой точке грунта средняя скорость вымывания сорбирующегося иона v определяется отношением n/N [2]:

$$v = u \frac{n}{n + N} = u \frac{Cq}{Cq + N}, \quad (33)$$

где C — концентрация порового раствора. Поэтому часто используемое отношение $R_f = v/u$ зависит от влажности грунта

$$R_f = \frac{C}{C + N/q}. \quad (34)$$

Скорость вымывания сорбирующегося иона будет тем больше, чем выше влажность грунта.

Т а б л и ц а 2

Гранулометрический состав почвогрунтов (%)

Участок	Глубина, см	Фракции, мм					
		1—0,25 мм	0,25—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	0,001
1	25—50	0,1	5,5	52,4	7,8	14,6	25,2
2	30—50	0,7	17,2	54,6	9,4	11,6	6,5
3	30—40	11,2	39,8	26,4	9,1	5,1	8,4

ЛИТЕРАТУРА

1. Асанакунув А. Рачинский В. В. Зависимость размытия фронта вымывания солевого раствора из почвогрунта от скорости потока и концентрации раствора. — Докл. ТСХА, 1964, вып. 99, с. 537—542. —
2. Рачинский В. В. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии. М.: Наука, 1964. —
3. Рачинский В. В. Практикум по применению изотопов и излучений в сельском хозяйстве. Вып. VIII. Применение метода меченых атомов в почвоведении и мелиорации. ТСХА, 1969. —
4. Рачинский В. В., Фокин А. Д., Торма-сов С. А., Талдыкин С. А. Исследование влагопереноса в подзолистых почвах в осенний и весенний периоды методом радиоактивных индикаторов. — Изв. ТСХА, 1980, вып. 2, с. 78—87. —
5. Рачинский В. В., Фокин А. Д., Талдыкин С. А., Сиушева А. Г., Шкарин Б. И. Абиогенная миграция токсикантов в подзолистых и дерново-подзолистых почвах. Депон. во ВНИИ информцентре, Б 748457, 5 апреля.

Статья поступила 19 февраля 1981 г.

SUMMARY

Variations in longitudinal dispersion coefficient with the rate of moisture filtration in soil-grounds is found. The method of determining the parameters of a dispersion pattern for transferring salts in soil-grounds by the profiles of washing out the dot radioindicator marks under natural conditions is described. The technique of estimating the sorption processes as applied to the dispersion pattern is discussed.