

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИГРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В статье рассмотрены вопросы оценки миграции тяжелых металлов в почвенно-растительных системах. Авторы представляют процесс миграции металлов в системе почва - растение как стационарный марковский процесс. На основе данного подхода теоретически обоснован интегральный показатель, позволяющий оценивать почвенно-растительные системы по их миграционной способности. Приведены результаты интегральной оценки почвенно-растительных систем.

Ключевые слова: тяжелые металлы, миграция, моделирование, почвенно-растительные системы.

Исследования физико-химических свойств почв, выполняемые в последние годы, привели к накоплению значительного экспериментального материала по содержанию в них тяжелых металлов, пестицидов, биогенных и других соединений. Прогнозирование изменений качественного состава почв, содержания в ней токсичных элементов представляет собой весьма актуальную и сложную задачу, для решения которой применяют методы математического моделирования [1, 2]. Отметим, что наряду с математическими моделями, построенными на основе экспериментальных данных (регрессионные модели), которые не позволяют раскрыть механизмы, происходящие в системе, применяется имитационное моделирование. В таких моделях обычно используется значительное количество компонентов, учитывающих процессы трансформации химических соединений, диффузии, сорбции и др. Имитационное моделирование позволяет интегрировать значительный объем информации о физико-химических процессах, происходящих в системе, что дает возможность детального анализа и прогноза динамических характеристик. Однако исследование таких громоздких моделей представляет значительные математические трудности. Необходимо отметить, что для комплексного описания системы достаточно ограничиться одно-, двух- или трехкомпонентными моделями, которые значительно легче поддаются анализу и вместе с тем позволяют оценить основные характеристики поведения системы [4, 5]. Почва, корневая система, подземная часть растений образуют сложную систему, компоненты которой взаимозависимы. Из почвы в растения через корневую систему поступают минераль-

ные и питательные вещества. В свою очередь, из растений поступают сахара, аминокислоты, другие органические соединения. Таким образом, одно и то же растение, произрастающее на различных типах почв, образует различные почвенно-растительные комплексы, различающиеся по миграционным и другим свойствам. Следовательно, можно говорить о том, что систему почва - растение следует рассматривать как отдельные системы [3].

Рассмотрим систему, состоящую из следующих компонентов: почва, корневая система, надземная часть растения. Такую систему можно отнести к саморегулирующимся системам, сформированным в процессе эволюции как системы в целом, так и отдельных ее компонентов. Компоненты системы являются взаимосвязанными.

В процессе взаимодействия компонентов системы друг с другом происходит перенос тяжелых металлов. Определим начальные условия следующим образом: 1) в начальный момент времени в систему (например, через атмосферу) введена C_0 концентрация загрязняющего вещества тяжелых металлов; 2) между компонентами системы существует обмен веществом с различными интенсивностями:

λ_1 – интенсивность перехода вещества из почвы в корневую систему;

λ_2 – интенсивность перехода вещества из корневой системы в надземную часть растения;

λ_3 – интенсивность перехода вещества из надземной части растения в почву.

Будем характеризовать состояние системы вероятностями P нахождения загрязняющего вещества в составных частях системы: P_n – вероятность нахождения загрязнителя в

почве, P_k – вероятность нахождения загрязнителя в корневой системе растений, P_n – вероятность нахождения загрязнителя в наземной части растений. Сформулируем задачу следующим образом: определить концентрацию загрязняющего вещества, установившуюся в каждом из компонентов системы при условии стационарности интенсивностей перехода загрязняющего вещества из одного компонента в другой, при стремлении времени наблюдения в бесконечность.

Суммарный поток событий, выводящий систему из состояния P_n , будет протекать с интенсивностью λ_1 . Вероятность того, что за время Δt система не выйдет из состояния P_n , равна: $(1 - \lambda_1 \Delta t)$.

Суммарная вероятность будет:

$$P_n(t + \Delta t) = P_n(t)(1 - \lambda_1 \Delta t) + \lambda_3 P_n(t) \Delta t$$

После преобразования получим:

$$P_n(t + \Delta t) - P_n(t) = -P_n(t)\lambda_1 \Delta t + \lambda_3 P_n(t) \Delta t$$

При $\Delta t > 0$ имеем:

$$dP_n(t)/dt = -P_n(t)\lambda_1 + \lambda_3 P_n(t) \quad (1)$$

Аналогично для состояний систем $P_k(t)$ и $P_n(t)$ запишем уравнения

$$dP_k(t)/dt = -\lambda_2 P_k(t) + \lambda_1 P_n(t) \quad (2)$$

$$dP_n(t)/dt = -\lambda_3 P_n(t) + \lambda_2 P_k(t) \quad (3)$$

Совокупность уравнений 1, 2, 3 образует систему уравнений Колмогорова, в которой в качестве неизвестных величин фигурируют вероятности P_n, P_k, P_n . Как отмечалось выше, их можно интерпретировать как вероятности нахождения загрязняющих веществ в корневой системе, наземной части растений, почве. За перенос загрязнения из одной среды в другую отвечают различные процессы, такие как диффузия, сорбция, сухое, влажное осаждение и т. д. С течением времени, т. е. при $t \rightarrow \infty$, в компонентах системы устанавливаются концентрации загрязняющих веществ в соответствии с вероятностями P_n, P_k, P_n .

Определим финальные вероятности P_n, P_k, P_n из следующих соображений: финальные вероятности не зависят от времени и, следовательно:

$$dP_n/dt = 0; dP_k/dt = 0; dP_n/dt = 0$$

Тогда имеем систему:

$$\begin{cases} -\lambda_1 P_n + \lambda_3 P_n = 0 \\ -\lambda_2 P_k + \lambda_1 P_n = 0 \\ -\lambda_3 P_n + \lambda_2 P_k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Система (4) переопределена, поэтому исключим третье уравнение и заменим его уравнением

$$P_n + P_k + P_n = 1$$

Получим систему:

$$\begin{cases} -\lambda_1 P_n + \lambda_3 P_n = 0 \\ -\lambda_2 P_k + \lambda_1 P_n = 0 \\ P_n = 1 - P_k - P_n \end{cases} \quad (5)$$

Перейдем от вероятностей к концентрациям, получим:

$$\begin{cases} -\lambda_1 C_n + \lambda_3 C_n = 0 \\ -\lambda_2 C_k + \lambda_1 C_n = 0 \\ C_n = C_0 - C_k - C_n \end{cases} \quad (6)$$

Решая систему (6), получим:

$$\begin{aligned} C_n &= \lambda_1 \lambda_2 C_0 / (\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3 \lambda_1); \\ &= \lambda_1 \lambda_3 C_0 / (\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3 \lambda_1); \\ C_n &= \lambda_2 \lambda_3 C_0 / (\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3 \lambda_1). \end{aligned} \quad (7)$$

Полученные соотношения позволяют по известным интенсивностям переходов веществ в системе почва - растение определять преимущественное распределение веществ в подсистемах. Следует отметить, что интенсивности переходов определяются свойствами почв и растений.

Для интегральной оценки почвенно-растительных комплексов предложен показатель, учитывающий физико-химические свойства почв и растений. В качестве такого критерия выбран знаменатель в уравнениях (7).

Расчет интенсивностей переходов микроэлементов $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, характеризующих соотношение между содержаниями изучаемого химического элемента в растениях и в почве, показал, что интенсивность переходов микроэлементов зависит от разновидностей растений.

В результате теоретического моделирования процессов взаимодействия в системе почва - растение ранее были предложены системы уравнений для оценки риска загрязнения компонентов системы (уравнения 7):

$$P_n = \lambda_2 \lambda_3 / (\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3 \lambda_1); \quad (8)$$

$$P_n = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3 \lambda_1); \quad (9)$$

$$P_k = \lambda_1 \lambda_3 / (\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3 \lambda_1); \quad (10)$$

В уравнении 7 знаменатель является интегральным показателем взаимодействия в системе почва - растение (I). Этот показатель зависит от физико-химических свойств почв и растений.

$$I = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3 \quad (11)$$

Преобразуем выражение 7 таким образом, чтобы интегральный показатель зависел от двух переменных (λ_1, λ_2). Для этого выразим λ_3 через λ_1 и λ_2 .

Зная, что:

$$\lambda_1 = C_k / C_n, \quad (12)$$

$$\lambda_2 = C_n/C_k, \quad (13)$$

$$\lambda_3 = C_n/C_n. \quad (14)$$

Выразим из выражения (12) C_n :

$$C_n = C_n/\lambda_p, \quad (15)$$

И из выражения (14) – C_n :

$$C_n = C_k \lambda_2, \quad (16)$$

Подставим формулы 15 и 16 в 14. Получим:

$$\lambda_3 = 1/\lambda_p \lambda_2, \quad (17)$$

Подставив выражение (17) в (11), получим:

$$I = f(\lambda_p, \lambda_2) = \lambda_p \lambda_2 + 1/\lambda_p + 1/\lambda_2 = \\ = 1/\lambda_p + 1/\lambda_2 + \lambda_p \lambda_2, \quad (18)$$

Таким образом, мы выразили интегральный показатель через две переменные.

Аналогично можно представить интегральный показатель как функцию от λ_1 и λ_3 ; λ_2 и λ_3 .

$$I = f(\lambda_p, \lambda_3) = 1/\lambda_p + 1/\lambda_3 + \lambda_p \lambda_3, \quad (19)$$

$$I = f(\lambda_2, \lambda_3) = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3, \quad (20)$$

Рассмотрим частные случаи интегральной функции I при различных интенсивностях перехода веществ:

1. Если $\lambda_1 \gg 1, \lambda_2 \gg 1$,

тогда $1/\lambda_1 \rightarrow 0, 1/\lambda_2 \rightarrow 0$, то уравнение (18) примет следующий вид:

$$I = f(\lambda_p, \lambda_2) = \lambda_p \lambda_2, \quad (21)$$

2. Если $0 < \lambda_1 \ll 1, 0 < \lambda_2 \ll 1$,

тогда $\lambda_p \lambda_2 \rightarrow 0$, в этом случае уравнение (18) будет выглядеть следующим образом:

$$I = f(\lambda_p, \lambda_2) = 1/\lambda_p + 1/\lambda_2 \quad (22)$$

3. Если $\lambda_1 \gg 1, 0 < \lambda_2 \ll 1$,

то $1/\lambda_1 \rightarrow 0$, интегральный показатель будет рассчитываться следующим образом:

$$I = f(\lambda_p, \lambda_2) = 1/\lambda_2 + \lambda_p \lambda_2, \quad (23)$$

И наоборот, если $\lambda_2 \gg 1, 0 < \lambda_1 \ll 1$,

то $1/\lambda_2 \rightarrow 0$, выражение (18) будет иметь следующий вид:

$$I = f(\lambda_p, \lambda_2) = 1/\lambda_p + \lambda_p \lambda_2 \quad (24)$$

Аналогичные зависимости можно получить и для уравнений 8.48 и 8.48.

Методы исследования, результаты и обсуждение

Для оценки миграционных свойств тяжелых металлов в почвенно-растительных системах отбирались пробы почв и растений Московской и Оренбургской областей. Для отбора пробы почв выбирался участок размером приблизительно 100 м² на природных ландшафтах. Площадки, подлежащие обследованию, выбирались с однородным почвенным и растительным покровом, наиболее типичным по основным агроэкологическим признакам для данно-

го района: типы почв, элементы рельефа. С выбранной площадки отбирали смешанный образец почвы, состоящий из пяти точечных проб, взятых по методу конверта. В пробах почв и растений определялась концентрация тяжелых металлов.

В таблице 1 приведены рассчитанные (формула 11) интегральные показатели, характеризующие миграционные свойства металлов в почвенно-растительных системах. Прежде всего при анализе таблицы 1 следует отметить, что интегральный показатель I показывает степень распределения тяжелых металлов в почвенно-растительных системах. Так, если $I=3$ – означает равномерное распределение тяжелого металла в компонентах почва, корневая система, надземная часть растения. Чем ближе величина I к трем, тем более равномерное распределение тяжелых металлов характерно для почвенно-растительной системы.

Как следует из анализа таблицы 1, относительно равномерным распределением в рассмотренных почвенно-растительных системах характеризуются медь, цинк, серебро, никель, молибден. Значительной неоднородностью распределения в почвенно-растительных системах характеризуются ванадий, титан. Промежуточное положение в такой классификации занимают свинец, барий, цирконий, марганец, хром.

В таблице 2 приведены результаты расчета комплексного показателя, характеризующего миграционные способности тяжелых металлов в почвенно-растительных системах. Расчет проводился по формулам 19, 20 для каждого металла с последующим нахождением комплексного показателя K для каждой почвенно-растительной системы по формуле:

$$K = \sqrt{\sum (I_i)^2}, \quad (25)$$

где i – название металла.

Полученные результаты позволяют оценивать миграционные способности тяжелых металлов в различных почвенно-растительных системах с единых методических позиций, позволяют сравнивать различные почвенно-растительные системы по миграционным характеристикам, что необходимо при проведении фиторекультивации почв. Данный подход позволяет создавать искусственные почвенно-растительные системы с заданными миграционными свойствами.

Таблица 1. Интегральная оценка почвенно-растительных систем для различных металлов

почва	растения	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	V	Ti	Mo	Ag	Ba	Zr	Mn
чернозем южный	шалфей	14	7,4	20,1	12,1	33,3	30,3	71	6,38	38,9	17,1	20	15,7
	татарник	4,7	10	13	10,4	41,1	31,8	43,8	7,69	7,12	14,4	11	17,4
	цикорий	4,6	5,7	11,2	7,28	8,77	19,9	26,6	3,67	3,71	15,6	12	26,9
	полынь обыкновенная	6,3	8,6	10,5	7,93	8,38	44,3	47,2	10,7	3,81	17,5	15	12,7
	тысячелистник	6,7	7,1	11,7	10,5	33,4	33,9	42,3	5,28	3,51	16,3	15	11,3
	одуванчик	6,7	6,8	8,29	9,87	50	36	44,2	4,63	4,62	17	16	12,1
	клевер луговой	5,7	14	16,6	13,3	28,9	45,6	46,3	3,73	11,2	23,8	20	26,8
	солодка	5,8	18	15,3	9,26	45	38,9	58,5	10,6	6,41	24,2	21	14,7
чернозем обыкновенный	шалфей	6	5,1	17,4	9,48	49,3	19,6	93,8	5,23	3,42	9,63	28	11,3
	татарник	5	5,2	16,1	6,59	21	15,5	76,9	4,22	5,33	9,04	18	5,92
	цикорий	4,8	4,8	19,8	7,76	11,1	21,2	59,3	3,19	10,3	12,4	21	8,77
	полынь обыкновенная	4	5,5	21,7	6,16	17,9	24,1	79,5	3,5	3,32	15,3	38	14,1
	тысячелистник	7,6	4,6	9,39	5,62	12,2	8,64	31,7	3,84	4,46	16,6	11	6,4
	одуванчик	4,3	5,8	22,4	10,3	13,5	18,9	44,3	3,05	28,6	10,9	24	12
	клевер луговой	4,4	6,5	24,9	6,09	12,3	12,1	41,9	5,23	6,77	9,28	17	10,2
	солодка	7,7	6,2	14,3	6,42	10,9	11,9	40,8	5,24	3,27	10,6	19	8,59
чернозем типичный	шалфей	4,2	4,5	10,5	14,8	19	141	57,4	3,61	15,4	6,77	15	8,42
	татарник	4	6,1	9,33	16,6	15,6	104	47,3	3,91	5,50	8,71	18	9,55
	цикорий	4,5	8,9	17,9	19,9	12,7	55,6	45,8	3,18	5,24	13,2	28	15,2
	полынь обыкновенная	3,9	11	16,9	14,9	18,9	62,4	80,3	5,85	6,87	17,3	21	12,4
	тысячелистник	9,8	9,1	14,3	21	55,5	145	98,2	4,03	7,04	15,9	25	10,8
	одуванчик	4,3	5,9	16,2	18,6	21,1	141	79,2	3,88	4,95	10,5	24	20,9
	клевер луговой	5,7	14	22,2	24,5	53,2	103	139	3	9,31	14,3	35	24,6
	солодка	5,9	7,8	21	9,4	36,7	21,1	45,7	8,14	8,58	6,9	15	7,38
почва темно-каштановая неполноразвитая	шалфей	3,4	11	13,6	38,4	22,7	29,1	77,7	5,25	4,62	13,2	15	31,4
	татарник	3,5	8,3	14,5	14,1	15,5	34,1	50,8	3,61	5,25	18,9	13	21,9
	цикорий	5,7	4,6	13,9	16,1	17,9	49,9	56,3	4,03	6,77	24,6	15	20,8
	полынь обыкновенная	11	8,4	9,07	10,8	51,4	15,6	44,6	4,8	5,99	19,7	13	16
	тысячелистник	10	6,2	5,24	11,6	85,7	13,3	37	4	8,88	15,8	11	12,2
	одуванчик	8,2	6,2	7,78	8,63	14,6	8,93	20,2	4,5	10,45	13,7	9	9,17
	клевер луговой	4,1	9,7	17,2	11,3	10,9	21,4	50,2	3,41	11	38,2	14	25,3

Таблица 2. Комплексный показатель

№	Растительные системы	Почвенные системы	Комплексный показатель
1	клевер луговой	чернозем типичный	193,3
2	тысячелистник	чернозем типичный	190,1
3	одуванчик	чернозем типичный	170
4	шалфей	чернозем типичный	157
5	татарник	чернозем типичный	120,4
6	шалфей	чернозем обыкновенный	119,1
7	полынь обыкновенная	чернозем типичный	112,8
8	шалфей	почва темно-каштановая неполноразвитая	105,1
9	полынь обыкновенная	чернозем обыкновенный	104,3
10	шалфей	чернозем южный	103,5
11	тысячелистник	почва темно-каштановая неполноразвитая	100,5
12	солодка	чернозем южный	97,14
13	цикорий	почва темно-каштановая неполноразвитая	90,51
14	клевер луговой	чернозем южный	90,29
15	цикорий	чернозем типичный	88,47
16	татарник	чернозем обыкновенный	87,94
17	одуванчик	чернозем южный	83,77
18	полынь обыкновенная	почва темно-каштановая неполноразвитая	81,01
19	клевер луговой	почва темно-каштановая неполноразвитая	80,36
20	татарник	чернозем южный	77,76
21	цикорий	чернозем обыкновенный	77,49
22	татарник	почва темно-каштановая неполноразвитая	76,69
23	одуванчик	чернозем обыкновенный	75,43
24	полынь обыкновенная	чернозем южный	75,39
25	тысячелистник	чернозем южный	73,72
26	солодка	чернозем типичный	73,04
27	клевер луговой	чернозем обыкновенный	61,41
28	солодка	чернозем обыкновенный	56,84
29	цикорий	чернозем южный	53,05
30	тысячелистник	чернозем обыкновенный	47,8
31	одуванчик	почва темно-каштановая неполноразвитая	38,7

Список использованной литературы:

1. Блохин Е.В. Экология почв Оренбургской области: почвенные ресурсы, мониторинг, агроэкологическое районирование. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997.
2. Ковальский В.В., Раецкая Ю.И., Грачева Т.И. Микроэлементы в растениях и кормах. – М.: Колос, 1971.
3. Ефремов И.В. Исследование нахождения подвижных форм тяжелых металлов и радионуклидов цезия-137, стронция-90 в почвенно-растительных комплексах степной зоны: в 3 т. / И.В. Ефремов, Н.Н. Рахимова, Е.Л. Янчук // Актуальные проблемы экологии: сб. науч. работ. – Томск, 2004. – №3. С. 455–456.
4. Молчанов А.М. Математические модели в экологии. Роль критических режимов // Математическое моделирование в биологии. М.: Наука, 1975. С.133-141.
5. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд. МГУ, 1985. 375 с.

Efremov I.V., Kuzmin O.N., Kushnareva O.P., Perekrestova E.N.
INTEGRAL CHARACTERISTICS OF MIGRATION FEATURES OF SOIL-PLANTS SYSTEMS

The article considers issues of appraisal of heavy metals migration of in soil-plant systems. The authors present the migration process of metals in soil-plant system as a stationary Markov's process. On the basis of this approach integral indicator allowing appreciating the soil-plant system on their migratory ability is theoretically justified. The results of the integrated appraisal of soil-plant systems are given in this work.

Key words: heavy metals, migration, modeling, soil-plant systems.

Сведения об авторах: Ефремов Игорь Владимирович, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности
Оренбургского государственного университета
460018, г.Оренбург, ГСП, пр.Победы, 13, тел.: 8(3532) 775994, e-mail: ephremov@mail.osu.ru

Кузьмин Олег Николаевич, начальник 10-го района ОАО «Московская теплосетевая компания»
115184, Москва, ул.Большая Татарская, д.46 строение 1, тел.: 8(495) 4425127

Кушнарева Ольга Павловна, старший преподаватель кафедры химии Оренбургского государственного
университета

Перекрестова Елена Николаевна, преподаватель кафедры химии Оренбургского государственного университета