

УДК 631.453+631.67.03(470.313)

## ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИКЛОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОЛАНДШАФТАХ

© 2009 Н.Е. Кошелева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва; e-mail: nataalk@mail.ru

Реализована модель динамического баланса Cu, Zn, Pb, Cd в агроландшафтах Мещерской низменности, описывающая функциональные связи между атмосферой, гидросферой, почвой и растениями. Определены особенности накопления металлов в компонентах ландшафта при различных сценариях полива загрязненными водами.

Ключевые слова: математическая модель, динамика, баланс, тяжелые металлы, агроландшафты, орошение

### ВВЕДЕНИЕ

Ведение сельского хозяйства в промышленно развитых районах сопряжено с экологическим риском, обусловленным опасностью накопления тяжелых металлов (ТМ) в почвах и растениях. Для получения достоверной информации о современном состоянии агроэкосистем и опасности их загрязнения ТМ целесообразно использовать математические модели биогеохимических циклов ТМ, отражающие закономерности их миграции и аккумуляции в широком диапазоне условий и факторов внешней среды [5]. Эти модели описывают динамику эколого-геохимических показателей в агроландшафте, определяя связь между скоростями изменения миграционных потоков ТМ в пространстве и темпами изменения состояния компонентов ландшафта во времени.

Цель данной работы – реализация динамической модели циклов ТМ для агроландшафтов левобережья Окского бассейна. Идентификация параметров и входных функций модели проводилась по данным полевых экспериментов на агрополигоне «Мещера», в которых исследовалось воздействие загрязненных Cu, Zn, Pb, Cd поливных вод на состояние дерново-подзолистых супесчаных почв и качество сельскохозяйственных культур в севообороте [3, 6, 7]. Экологический риск в этом случае особенно велик из-за того, что находящиеся в водном растворе токсичные соединения ТМ очень подвижны и легкодоступны для растений. В ходе полевых опытов производился регулярный полив многолетних трав и корнеплодов водой, загрязненной Zn, Cd, Cu, Pb в концентрациях, превышающих ПДК в 1, 2, 4, 8 и 15 раз, удобрения не применялись.

### СТРУКТУРА МОДЕЛИ

Основу модели составляют балансовые уравнения, дополненные эмпирическими зависимостями

для описания приходных и расходных составляющих [4, 5]. Основные процессы, определяющие многолетнюю динамику содержания ТМ в корнеобитаемом слое почвы, – это их поступление из атмосферы в виде жидких осадков, снега и твердых выпадений, а также с загрязненными поливными водами, аккумуляция в почве, транслокация в растения и отток в нижележащие горизонты. Процессы и факторы, определяющие баланс ТМ, отражает потоковая диаграмма модели (рис. 1).

Уравнение динамики запасов металла  $S(t)$  в пахотном слое почвы мощностью  $m$  (м) за многолетний период имеет вид:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{Q(t) - I(t) - P(t)}{m \cdot \rho}, \quad (1)$$

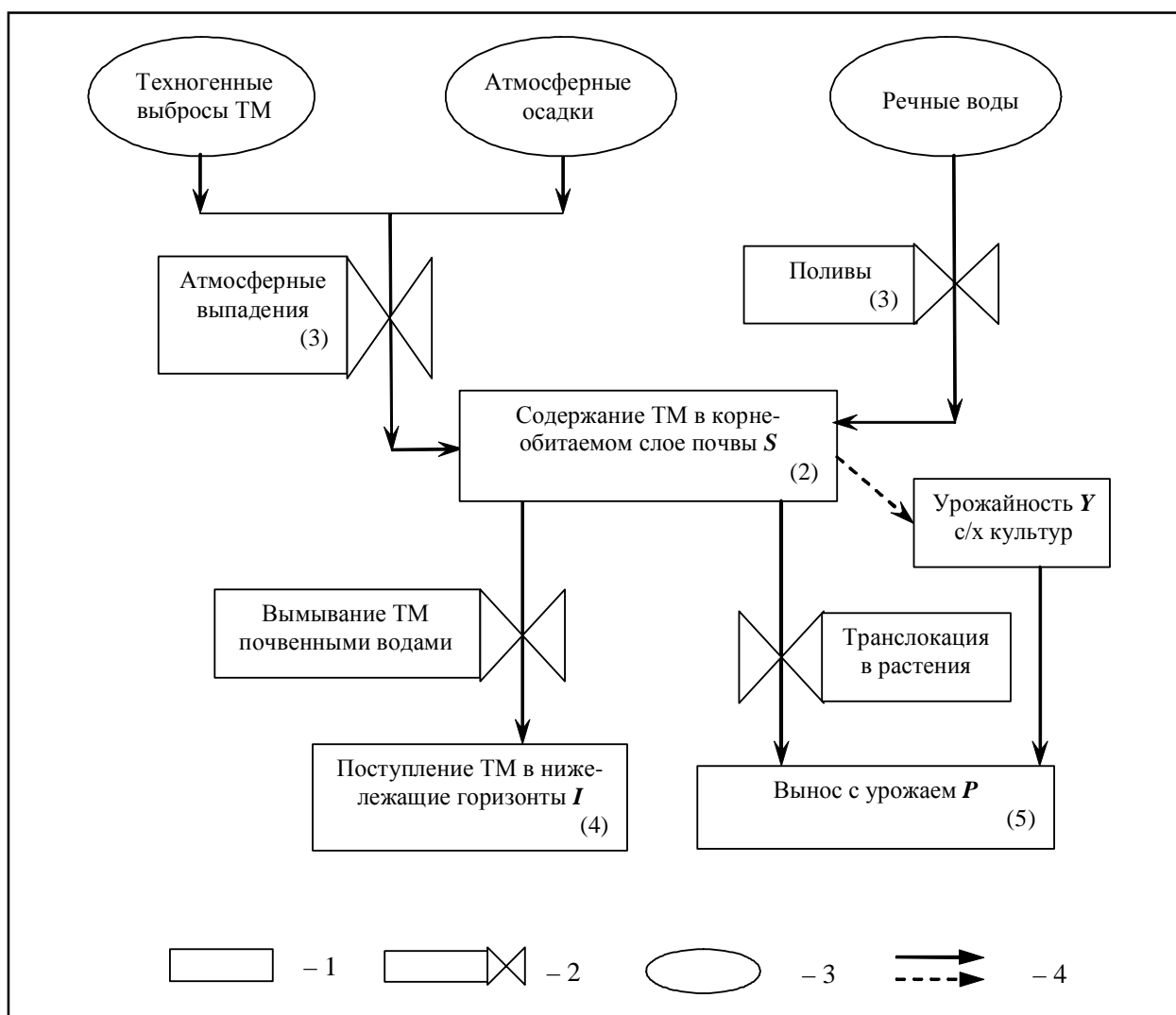
где  $\rho$  – плотность почвы (кг/м<sup>3</sup>),  $t$  – время (годы),  $Q(t)$  – поступление металла с атмосферными осадками, пылью и поливной водой (мг/м<sup>2</sup>·год);  $I(t)$  – выщелачивание металла из пахотного слоя;  $P(t)$  – вынос с растительной продукцией. Для практических вычислений уравнение (1) аппроксимируется конечными разностями:

$$S(t+1) = S(t) + \frac{(Q - I - P) \cdot \Delta t}{m \cdot \rho}, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – временной шаг (один год). Реализация модели предполагает измерения начального содержания  $S(t=0)$  металлов в почве и оценку первой части уравнения (1). Расходные составляющие баланса определяются в два этапа. В первом приближении они рассчитываются в зависимости от  $S(t)$ , а после вычисления  $S(t+1)$  по формуле (2) уточняются: рассчитываются вновь при значении аргумента, равного  $(S(t) + S(t+1))/2$ .

Источниками ТМ в почвах агроландшафтов Мещерской низменности являются атмосферные выпадения техногенного происхождения и поступление с поливной водой:

$$Q(t) = (h \cdot C_1 + V \cdot C_2) \cdot 10^{-4} / \rho + Ts \cdot C_3, \quad (3)$$



**Рис. 1.** Структура динамической модели баланса тяжелых металлов в агроландшафтах при использовании загрязненных поливных вод: 1 - переменные состояния; 2 - процессы; 3 - источники ТМ; 4 - потоки вещества и информации

где  $h$  и  $V$  - слой атмосферных осадков и оросительная норма (м/год);  $T_s$  - объем твердых выпадений (кг/га · год);  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  - содержание ТМ в осадках, поливной воде и пыли (мг/кг).

Выщелачивание  $I(t)$  вниз по почвенному профилю оценивается по данным лизиметрических опытов в зависимости от концентрации ТМ в корнеобитаемом слое почвы:

$$I(t) = f_1(S). \quad (4)$$

Вынос металлов с растительной продукцией  $P(t)$  (мг/га) рассчитывается по урожайности возделываемой культуры  $Y$  (кг/га) и концентрации  $C_p$  в ней элемента (мг/кг):

$$P(t) = Y \cdot C_p. \quad (5)$$

Для конкретной культуры  $C_p$  определяется содержанием металла в почве  $C_p = f_2(S)$ . При орошении и фиксированных агрохимических свойствах почвы урожайность культуры  $Y$  также зависит от уровня содержания ТМ в почве: при невысоких концентрациях ТМ в почве урожайность

максимальна, с ростом содержания ТМ в почве она снижается в соответствии с кривой, построенной по экспериментальным данным. Некоторое количество ТМ выносится из почвы сорными растениями.

### ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И ВХОДНЫХ ФУНКЦИЙ МОДЕЛИ

Информационное обеспечение модели для агроландшафтов Мещерской низменности включает статистическое описание атмосферной составляющей баланса ТМ, эмпирические функции поступления металлов с поливными водами, их поглощения сельскохозяйственными культурами, урожайности и выноса металлов из пахотного слоя с нисходящим током почвенных вод.

Метеоданные за 1993-2005 гг. позволяют установить техногенную геохимическую специализацию района, преобладающие формы отдельных

металлов в составе аэротехногенного потока и их межгодовую изменчивость (табл. 1). Интенсивность атмосферных выпадений указывает на то, что район испытывает значительную техногенную нагрузку от предприятий электроэнергетики, нефтеперерабатывающей промышленности, производства строительных материалов, а также от автотранспорта [8]. Ежегодный привнос ТМ с поливными водами зависит от концентрации в них ТМ (фон, 1, 2, 4, 8, 15 ПДК) и оросительной нормы. Его межгодовая изменчивость определяется не только метеоусловиями, но продолжительностью вегетационного периода у каждой культуры.

Транслокацию Pb, Cd, Zn, Cu из почвы в растения описывают нелинейные эмпирические функции, обобщающие данные мелкоделяночных опытов с горохо-овсяной и вико-овсяной смесями, многолетними травами, морковью, редисом (рис. 2). Влияние загрязнения почв ТМ на урожайность оценивается по величине суммарного показателя  $Z_c$  [2]. Построенные по экспериментальным данным функции урожайности равны константе  $Y_0$  при невысоких концентрациях ТМ

(фоновые условия) и убывающей (полиномиальной или логарифмической) функции второго порядка при превышении пороговых значений  $Z_c$  (табл. 2). Вынос ТМ сорными растениями принят равным 10,6 % от количества ТМ, поглощенных культурными растениями [3].

Интенсивность вымывания ТМ из пахотного слоя почвы  $I(t)$  задается по данным лизиметрических опытов [3, 7], которые обобщены в виде статистических зависимостей выноса ТМ с почвенными водами от их содержания  $S$  в пахотном слое почвы (табл. 3). Они характеризуются нелинейностью, которая проявляется в усилении выноса ТМ с ростом их содержания в почве при ослаблении связей ТМ с тонкодисперсными компонентами почвы.

### ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Независимые определения всех составляющих баланса в уравнении (1), а также содержания ТМ в начале и в конце каждого вегетационного периода позволили оценить точность экспериментальных данных в каждой повторности для

**Таблица 1.** Статистические параметры атмосферной составляющей баланса тяжелых металлов

Статья баланса	Поступление металлов с атмосферными осадками		Поступление металлов с сухими выпадениями	
	среднее, мг/м <sup>2</sup> -год	дисперсия	среднее, мг/м <sup>2</sup> -год	дисперсия
Cd	0,0419	0,0005	0,2931	0,0102
Cu	0,7782	0,3594	14,8668	149,6497
Pb	0,5002	0,0300	4,0335	1,5994
Zn	1,7735	0,5759	18,0615	123,5859

**Таблица 2.** Эмпирические зависимости для оценки урожайности сельскохозяйственных культур по суммарному показателю загрязнения почвы тяжелыми металлами

Культура	Фоновые условия		Условия загрязнения	Коэффициент регрессии $R$
	$Z_c$	$Y_0$	Уравнение связи $Y = f(S)$	
Горохо-овсяная смесь	$Z_c \geq 0$	$Y_0 = 0$	$Y = 0,882 S^2 - 2,83 S + 2,96$	0,912
Вико-овсяная смесь	$Z_c \geq 0$	$Y_0 = 0$	$Y = -0,131 S^2 - 0,227 S + 1,20$	0,643
Многолетние травы	$Z_c \geq 1,1$	$Y_0 = 0,9$	$Y = -1,49 S^2 + 2,39 S + 0,037$	0,787
Морковь	$Z_c \geq 1,1$	$Y_0 = 2,8$	$Y = -4,71 S^2 + 7,18 S + 0,663$	0,750
Редис	$Z_c \geq 0$	$Y_0 = 0$	$Y = -1,80 \ln(S) + 2,45$	0,733

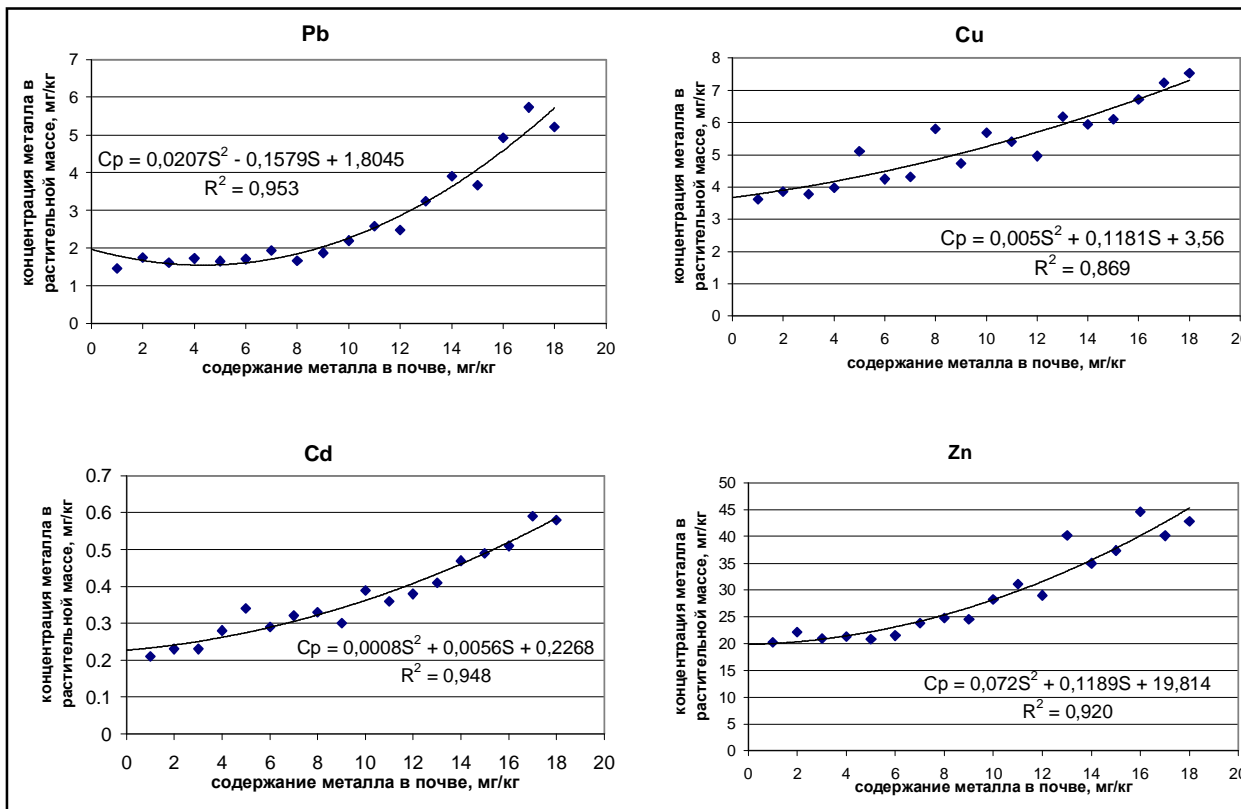


Рис. 2. Статистические связи между содержанием Т.М. в корнеплодах моркови (Ср) и в почве (S)

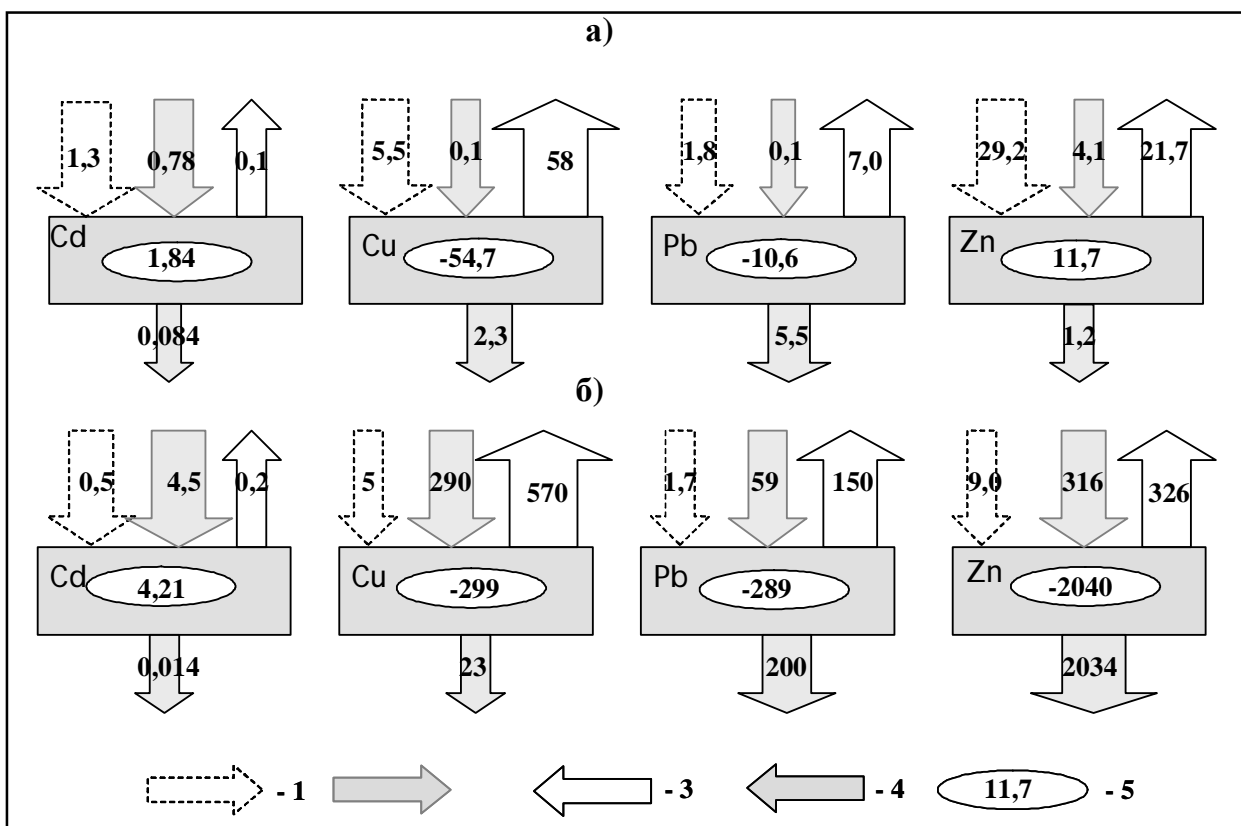


Рис. 3. Структура баланса Т.М. в почве, засеянной многолетними травами, в фоновых условиях (а) и при поливе загрязненными водами с содержанием Т.М., равным 4 ПДК (б): 1 - атмосферная составляющая; 2 - приход с поливными водами; 3 - поглощение растениями; 4 - отток в нижний горизонт; 5 - аккумуляция в почве

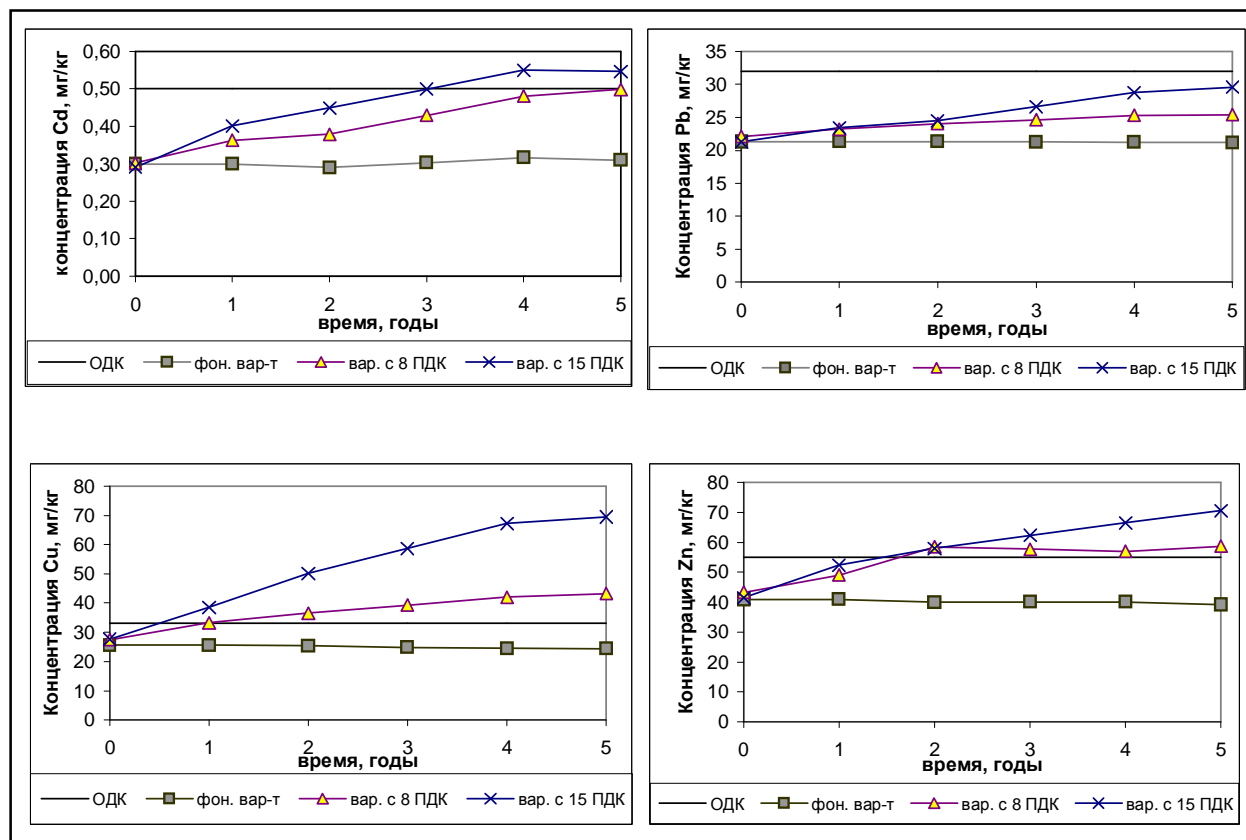


Рис. 4. Динамика концентраций ТМ в верхнем (0-20 см) слое дерново-подзолистых почв в фоновых условиях и при поливе загрязненными водами

Таблица 3. Статистические связи для оценки среднего выноса тяжелых металлов с внутрипочвенным стоком (мг/м<sup>2</sup> в год) по их содержанию в корнеобитаемом слое почвы

Металл	Уравнение связи $I=f(S)$	R
Cd	$I = 0,0721 \cdot e^{0,0122 \cdot S}$	0,988
Cu	$I = 0,152 \cdot e^{9 \cdot 10^{-5} \cdot S}$	0,979
Pb	$I = 0,890 \cdot e^{0,0003 \cdot S}$	0,980
Zn	$I = 0,752 \cdot e^{0,0002 \cdot S}$	0,986

всех вариантов опыта и провести верификацию модели (табл. 4). Величины невязок баланса не превысили 9-17% от общего содержания ТМ в почве при средних значениях 2,01% для Cd, 3,11% для Cu, 0,26% для Pb, 3,17% для Zn. Это свидетельствует о полноте учета составляющих баланса ТМ и удовлетворительной точности данных, использованных для оценки параметров и входных функций.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представление о структуре баланса ТМ в агроландшафтах в фоновых условиях и при использовании загрязненных поливных вод с концентрациями ТМ, равными 4 ПДК, дает рис. 3, на котором приводятся величины привноса, аккумуляции и выноса ТМ для многолетних трав.

Приходная часть баланса Cu и Pb в фоновых условиях на 94-98% обеспечивается поступлениями из атмосферы; для Zn этот вклад равен 84%, для Cd - 59%. В других вариантах опыта доминирует привнос ТМ с загрязненными поливными водами. Он определяется концентрацией ТМ в воде и в зависимости от варианта опыта составляет 95-99% от общего поступления металла в почву.

Соотношение расходных статей баланса ТМ в почве зависит от уровня загрязнения поливных вод. С его ростом происходит относительное уменьшение выноса Cd из почвы с урожаем и сорняками - от 71,2% на фоновой делянке до 24,6% на делянке с концентрациями ТМ в поливных водах 15 ПДК, выщелачивания - от 20% до 2% и усиление аккумуляции металла в почве - от 12% до 74%. Еще более контрастные изменения расходной части баланса наблюдаются у Pb и Cu: если в фоновых условиях вынос с урожаем и

**Таблица 4.** Результирующий баланс Pb в корнеобитаемом (0-20 см) слое дерново-подзолистой почвы, осредненный по вариантам опыта

Сельскохозяйственная культура	Вариант опыта	Концентрация Pb в почве, мг/кг		Общее поступление Pb, мг/кг	Суммарный вынос Pb, мг/кг	Невязка баланса, мг/кг
		на начало вегетационного периода $S(t)$	на конец вегетационного периода $S(t+1)$			
Горохо-овсяная смесь	фон	6,2767	6,2967	0,0171	0,0156	0,0184
	1 ПДК	20,0367	20,1967	0,1595	0,0291	0,0296
	2ПДК	28,0767	28,3767	0,3023	0,0560	0,0536
	4 ПДК	33,6100	34,2000	0,5881	0,0782	0,0802
	8 ПДК	41,7633	42,9233	1,1595	0,1111	0,1116
	15 ПДК	48,1233	50,2833	2,1595	0,2206	0,2211
Вико-овсяная смесь	фон	6,2967	6,3100	0,0217	0,0188	0,0104
	1 ПДК	20,1967	18,6567	0,1546	0,0388	-1,6558
	2ПДК	28,3767	31,3267	0,2879	0,0694	2,7315
	4 ПДК	34,2000	34,1033	0,5546	0,0992	-0,5521
	8 ПДК	42,9233	43,6833	1,0879	0,1317	-0,1962
	15 ПДК	50,2833	51,3433	2,0213	0,26097	-0,7003
Многолетние травы	фон	6,3100	6,2367	0,0133	0,0127	-0,0739
	1 ПДК	18,6567	19,4133	0,1272	0,0306	0,6601
	2ПДК	31,3267	31,9467	0,2415	0,0625	0,4410
	4 ПДК	34,1033	31,8667	0,4701	0,0678	-2,6389
	8 ПДК	43,6833	44,3200	0,9272	0,1186	-0,1719
	15 ПДК	51,3433	53,4367	1,7272	0,1956	0,5617
Морковь	фон	6,3100	6,2367	0,0133	0,0300	-0,0567
	1 ПДК	18,6567	19,4133	0,1272	0,0401	0,6696
	2ПДК	31,3267	31,9467	0,2415	0,0686	0,447
	4 ПДК	34,1033	31,8667	0,4701	0,0785	-2,6283
	8 ПДК	43,6833	44,3200	0,9272	0,1393	-0,1512
	15 ПДК	51,3433	53,4367	1,7272	0,2264	0,5925
Редис	фон	6,2367	6,1967	0,0220	0,0358	-0,0262
	1 ПДК	19,4133	19,2633	0,0979	0,0530	-0,1950
	2ПДК	31,9467	31,9067	0,1741	0,0800	-0,1342
	4 ПДК	31,8667	31,9467	0,3265	0,0806	-0,1659
	8 ПДК	44,3200	560,2830	0,6313	1,4518	-0,3950
	15 ПДК	53,4367	54,2800	1,1646	0,2802	-0,0411

сорняками для них равен 92,6% и 98,7% соответственно, то при концентрациях ТМ в поливных водах 15 ПДК он составляет всего 9,3 и 0,6%. Вынос Pb с внутрипочвенным стоком колеблется от 7,4% до 32%, а Cu - от 0,06% до 5,7%. Накопление в почве усиливается при повышении концентрации металлов в поливной воде и достигает у Pb 81%, а у Cu - 99,3% при концентрациях ТМ в поливных водах, равных 15 ПДК. Для Zn характерна большая подвижность в агроландшафте, он интенсивно мигрирует с внутрипочвенными водами. Выщелачивание Zn из почвы в некоторых вариантах опыта достигает 80%, его аккумуляция в почве наблюдается лишь при высоких концентрациях ТМ в поливных водах, равных 8 и 15 ПДК. Относительная подвижность металлов, которая сопровождается уменьшением их аккумуляции в почвах, характеризуется рядом:  $Zn > Cd > Pb > Cu$ .

Транслокацию в растения при низких концен-

трациях ТМ в почве отражает последовательность  $Cu > Zn > Pb > Cd$ ; при максимальных концентрациях в поливной воде металлы расположены в обратном порядке. Это обусловлено фитотоксичностью высоких концентраций Cd и Pb, которые подавляют поглощение корнями необходимых растениям микроэлементов – Zn, Cu и др. [1]. Сравнение уровней накопления ТМ различными сельскохозяйственными культурами показало, что наибольшей транслокационной способностью по отношению ко всем ТМ обладали корнеплоды – редис и морковь, а наименьшей – горохо-овсяная смесь.

Динамика концентраций ТМ в почве свидетельствует о том, что при регулярном поливе загрязненной водой происходит быстрое увеличение содержания Cd, Cu и Zn в корнеобитаемом слое до уровней, близких к ориентировочно допустимым концентрациям (ОДК) (рис. 4). Следствием этого является ухудшение качества растени-

еводческой продукции уже в первый год эксперимента. Особенно интенсивно накапливается и прочно закрепляется в почве медь, ее вынос с внутрипочвенным стоком практически отсутствует, а поглощение растениями в вариантах опыта с 4-15 ПДК составляет всего 1-4% от ее прихода. Особенно значительные превышения ПДК в растениеводческой продукции - в 10 и более раз - отмечены по Cd и Pb, загрязнение Zn было не столь высоким - в 2,5 раза в первые два года опыта и в 4 раза в последующие годы.

Выявленные особенности динамики ТМ в компонентах агроландшафта указывают на повышенную опасность загрязнения почв Cu и Cd, которые активно аккумулируются в почве, урожай - Cd и Pb и грунтовых вод - Zn и Pb, мигрирующих с внутрипочвенным стоком.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о том, что динамические модели биогеохимических циклов ТМ являются эффективным инструментом оптимального управления агроландшафтами. Они дают количественную оценку экологического риска загрязнения почв и растений при различных уровнях и видах техногенной нагрузки. Многовариантные расчеты по модели позволяют выбрать и обосновать наиболее эффективные направления борьбы с загрязнением, которые включают: уменьшение поступления ТМ в агроландшафты за счет более полной очистки сточных вод и техногенных выбросов в атмосферу; снижение подвижности ТМ в почве путем их перевода в труднорастворимые соединения и прочносвязанные формы; подбор сельскохозяйственных и технических культур, активно накапливающих ТМ [4].

Разработанная модель обеспечивает теоретическую основу для обобщения и использования многочисленных опытных данных об отдельных взаимосвязях в системе «атмосфера–при-

родные воды–почва–растение». Для этого целесообразно создать региональные базы данных, в которых бы накапливалась экспериментальная информация, получаемая в полевых, микрополевых и вегетационных опытах с различными почвами и сельскохозяйственными культурами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Битюцкий Н.П.* Необходимые микроэлементы растений. СПб: Изд-во ДЕАН. 2005.
2. Геохимия окружающей среды *Саен Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* М.: Недра, 1990.
3. *Жигулина Е.В.* Агрэкологическое обоснование способов реабилитации дерново-подзолистых почв, загрязненных тяжелыми металлами (на примере Рязанской обл.). Автореф. дис. канд. с.-х. наук. Рязань, 2006.
4. *Коселева Н.Е.* Моделирование биогеохимических циклов тяжелых металлов в агроландшафтах на основе балансового подхода // Геохимия ландшафтов и география почв / Под ред. Н.С. Касимова и М.И. Герасимовой. Смоленск: Ойкумена, 2002.
5. *Коселева Н.Е.* Математическое моделирование ландшафтно-геохимических процессов // География, общество, окружающая среда. Т. II: Функционирование и современное состояние ландшафтов. М.: Изд. дом Городец, 2004.
6. *Мажайский Ю.А., Коселева Н.Е., Дорохина О.Е.* Баланс тяжелых металлов в агроэкосистемах Мещерской низменности при использовании загрязненных поливных вод // Агрохимия, 2008, № 12.
7. *Матюхин Р.И.* Экологическое обоснование комплексных приемов реабилитации дерново-подзолистых почв, загрязненных тяжелыми металлами (на примере левобережья р. Оки). Автореф. дис. канд. биол. наук. Рязань, 2005.
8. Сохранение и повышение продуктивности мелиорируемых земель центра Нечерноземной зоны России и Беларуси / Под ред. *Мажайского Ю.А., Лихацевича А.П.* Рязань; Ряз. гос. сельхоз. акад., 2005.

## EXPERIENCE OF MODELING OF HEAVY METALS CYCLING IN THE AGROLANDSCAPES

© 2009 N.E. Kosheleva

Moscow State University, Moscow; e-mail: natak@mail.ru

The dynamic model of Cu, Zn, Pb, Cd budget in the agricultural landscapes of the Meshchera lowland has been developed. It describes the functional relationships between atmosphere, hydrosphere, soil and vegetation. The patterns of metal accumulation in the landscape compartments under the different scenarios of irrigation by contaminated waters were determined.

Key words: *mathematical model, dynamics, budget, heavy metals, agriculture, irrigation*