

моделей целесообразно для создания прогностических моделей сложных процессов и управления ими.

2. Построенные многофакторные полиномиальные модели тем более предпочтительны к применению в сельском хозяйстве, поскольку вбирают в себя информацию различной физической размерности и природы, в том числе основанную на опыте и интуиции эксперта, что позволяет строить базы знаний для синтеза интеллектуальных систем управления.

3. Высокая прогностическая способность логико-лингвистических моделей, базирующихся на экспертных знаниях, позволяет идентифицировать изменения состояния изучаемых явлений в динамике в выбранном факторном пространстве. Иными словами, такие модели служат инструментом и мониторинга, и эффективного прогноза на заданный период.

4. Предлагаемая методика существенно снижает трудоемкость и экономические затраты при построении моделей, но чаще является единственно возможной в условиях существенной неопределенности сельскохозяйственных производств.

Литература

1. Попов В. Д., Сухопаров А. И. Информационная и структурная модели управления технологиями в растениеводстве // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2010. № 3. С. 7–8.

2. Спесивцев А. В. Управление рисками чрезвычайных ситуаций на основе формализации экспертной информации. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 238 с.

МОДЕЛИ МИГРАЦИИ Cu, Zn, Cd В ПОЧВАХ ПРИ ОРОШЕНИИ ГОРОДСКИМИ СТОЧНЫМИ ВОДАМИ²

А. С. Фрид

Почвенный институт им. В. В. Докучаева

Сточными являются воды, которые отводятся после использования в бытовой и производственной деятельности человека. Городские сточные воды обычно содержат большое количество тяжелых металлов (ТМ) типа Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, а потому их использование для орошения и удобрения на сельскохозяйственных угодьях может приводить к накоплению в почвах ТМ. Обычно считается, что накопление происходит в основном в пахотном слое, но очень часто городские сточные воды используются на протяжении многих столетий, и загрязнение затрагивает более глубокие слои почвы.

Сведений о параметрах миграции Zn и Cd в почвах (коэффициентах диффузии) в научной литературе представлено немного, особенно относительно кадмия, информации по меди не содержится совсем. Разброс данных значений очень широк: для Zn от $1 \cdot 10^{-11}$ до $3 \cdot 10^{-7}$ см²/с (в почвенном растворе $5 \cdot 10^{-6}$); для Cd от $4 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ (расчет для порового раствора тех же почв дал от $1 \cdot 10^{-7}$

² Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (проект № 11-04-00651-а)

до $12 \cdot 10^{-7}$). Справочные данные для диффузии в водных растворах: Zn – $(10-20) \cdot 10^{-6}$ ($(4-20) \cdot 10^{-6}$ в диапазоне pH 7.2–9.2); Cu – $(7-8) \cdot 10^{-6}$; Cd – $(3-7) \cdot 10^{-6}$.

Опыт применения математических моделей миграции ТМ в почвах редко описывается в литературе. По-видимому, преобладает мнение, что ТМ почти не мигрируют в почве при загрязнении или их миграция незначительна с точки зрения оценки загрязнения. Автор считает, что значения параметров моделей миграции в конкретных полевых условиях (а не в лабораторных колонках) дают очень существенную информацию, от которой можно оттолкнуться для интерпретации реальных процессов в почве и окружающей среде. Наконец, важно иметь представление о том, как долго миграцией ТМ в почвах можно пренебрегать с точки зрения загрязнения окружающей территории и грунтовых вод, а дать ответ на указанный вопрос без динамических математических моделей весьма затруднительно.

Конечно, использование сравнительно простых математических моделей миграции требует некоторых упрощающих допущений, но они в большинстве случаев дают правильную качественную картину явления.

Цель работы заключается в оценке адекватности применения миграционных моделей к передвижению тяжелых металлов по профилю почв Египта при длительном орошении природными и городскими сточными водами (на примере меди, цинка и кадмия). В Египте, как известно, преобладает орошаемое земледелие с использованием речных и грунтовых вод. По причине их недостатка дополнительно используются сточные воды, в том числе городские.

Полевые экспериментальные исследования проводились Гома Ботхина Саад в районе г. Александрия. На аллювиальных почвах озерного происхождения (суглинки легкие песчаные) расположены две площадки: староорошаемая речными водами более 40 лет и орошаемая в течение 20 лет городскими сточными водами г. Александрия, прошедшими механическую и биологическую очистку (участок 1). Другие две площадки расположены в оазисе Ливийской пустыни на супесчаной желто-бурой пустынной почве: орошаемая грунтовыми водами до 30–40 лет и орошаемая городскими сточными водами г. Александрия в течение 20 лет (участок 2).

Отбор почвенных образцов производился как по горизонтам, так и по слоям. Так как на указанных площадках загрязнение явно проникало глубже пахотного слоя, для моделирования можно было использовать данные для всех изученных слоев почвы до 150 см. Исследования проводились в течение 3-х лет. Данные по содержанию Cu, Zn и Cd в слоях почвы усреднялись за три года. На обоих участках выращивалась кукуруза на зеленую массу. Валовое содержание ТМ в почве определялось полуколичественным методом спектрального анализа, фракционный состав – по А. Tessier и др.

Оценка адекватности моделей миграции ТМ в почвах опыта. С учетом обстоятельств проведения эксперимента были подобраны начальные и граничные условия для диффузионной и конвективно-диффузионной моделей, которые испытывались в процессе верификации. Упрощенно предполагалось, что параметры моделей миграции (в том числе исходное фоновое содержание ТМ) были в среднем постоянными как по профилям почв, так и в течение десятков

лет орошения. Диффузионная модель: постоянный поток вещества на поверхности полубесконечной среды (в данном случае – почвы), поступление вещества за поливной сезон отнесено к году в целом. Конвективно-диффузионная модель: массообмен вещества на поверхности полубесконечной среды.

Для перехода к модельным расчетам измеренное валовое содержание ТМ (мг/кг) пересчитывалось в мг/см³ с учетом плотности каждого слоя почвы, вычиталось фоновое содержание и рассчитывался интервал значений содержания, равный $\pm 10\%$ от измеренного (с учетом возможной ошибки измерения). Далее задавались различные сочетания значений параметров моделей, рассчитывалось содержание ТМ по глубине почв для заданной длительности орошения; если они укладывались в указанный 10%-ный интервал для всех слоев, то заданные значения параметров считались возможными. Такой подход позволил оценить интервал значений для каждого параметра. Вопрос об адекватности моделей миграции рассматривался и с других позиций: сравнивались поступление ТМ с оросительной водой за весь период орошения, накопление ТМ в почве сверх фона по результатам измерений и то же накопление, рассчитанное по найденным значениям параметров моделей.

Некоторые значения параметров моделей представлены в таблице 1. Первое, что обращает на себя внимание, – очень большое расхождение между ожидаемым поступлением ТМ в почву с оросительными водами и накопившимся их содержанием в профиле почвы (последнее значительно больше, кроме вариантов для меди при поливе речной и грунтовой водой). Ошибками в определении фонового содержания ТМ в почвах данный факт не объясняется. Можно высказать два предположения: 1) при орошении речными и грунтовыми водами были и другие неизвестные источники поступления Zn и Cd в почвы (например, поливы другими более загрязненными водами); 2) при орошении городскими сточными водами в годы, предшествовавшие исследованиям, концентрация ТМ в них была значительно выше.

Проблему адекватности использованных моделей миграции можно оценить в двух аспектах. 1) Возможность подбора параметров моделей для описания измеренных распределений ТМ в профилях почв с учетом заданной ошибки измерения $\pm 10\%$. Во всех случаях, кроме Cd, параметры **обеих** моделей миграции удалось подобрать. Для Cd распределения концентрации в почвах при орошении чистыми водами были элювиального, а не аккумулятивного типа, поэтому в указанных случаях диффузионная модель была непригодна. Это объясняется значительно более быстрой миграцией Cd с потоком влаги – значение параметра V было на порядок выше, чем для меди и цинка. В результате Cd интенсивно вымывался глубже 150 см. 2) В других случаях баланс между найденным в профиле и рассчитанным по моделям содержанием неплохо соблюдался, что тоже свидетельствует в пользу адекватности использованных моделей миграции, несмотря на принятые в них упрощения.

Таблица 1. Параметры моделей.

D и D_k – коэффициенты диффузии и конвективной диффузии; V – скорость конвективного переноса элемента. Нижний индекс d относится к диффузионной модели, k – к конвективно-диффузионной

Почва	Диффузионная модель		Конвективно-диффузионная модель			Найдено в почве сверх фона	Вошло в почву с оросительной водой
	$D \cdot 10^6$, см ² /с	вошло в почву по модели, мг/см ²	$D_k \cdot 10^6$, см ² /с	$V \cdot 10^9$, см/с	вошло в почву по модели, мг/см ²		
Медь							
Аллювиальная, речная вода, 50 лет	0.5–1.9	0.31	0.05–6.0	4–8	0.70	0.46 _д 0.46 _к	0.62
То же, сточные воды, 20 лет	2.7–3.2	1.6	1.46–3.5	4–9	1.9	1.7 _д 2.5 _к	0.32
Пустынная, грунтовая вода, 40 лет	2.6–4.7	0.68	0.8–4.7	–10...+10	0.73	0.83 _д 0.96 _к	0.53
То же, сточные воды, 20 лет	3.0–3.6	2.2	2–3	–2...+10	2.3	2.2 _д 1.8 _к	0.40
Цинк							
Аллювиальная, речная вода, 50 лет	0.43–0.55	0.66	0.08–0.30	3–7	0.62	0.58 _д 0.89 _к	0.078
То же, сточные воды, 20 лет	2.0–2.6	4.4	0.7–1.0	4–6	3.2	4.3 _д 3.6 _к	0.28
Пустынная, грунтовая вода, 40 лет	0.42–0.60	1.1	0.09–0.23	4.0–6.5	0.63	1.1 _д 1.0 _к	0.15
То же, сточные воды, 20 лет	2.0–2.4	5.1	0.8–1.1	3.0–5.5	3.7	5.0 _д 4.5 _к	0.34
Кадмий							
Аллювиальная, речная вода, 50 лет	–	–	0.275	74	0.91–1.6	0.13–0.04 _к	0.0012
То же, сточные воды, 20 лет	9.7–10.5	0.15	1.5–7.0	40–50	0.14	0.19 _д 0.24 _к	0.011
Пустынная, грунтовая вода, 40 лет	–	–	0.45–0.61	100–110	1.35–1.1	0.08–0.13 _к	0.0011
То же, сточные воды, 20 лет	50–52	0.24–0.19	8–40	60–100	0.30–0.28	0.13 _д 0.26 _к	0.014

Интересно сопоставить найденные значения параметров моделей миграции с указанными выше литературными данными. Для Cu максимальные значения D и D_k приближаются к таковым в водном растворе, что свидетельствует о слабой сорбции Cu в обеих почвах (особенно в пустынной) при орошении сточными водами. В случае с Zn такое было характерно только для D при орошении сточными водами. Для Cd значения D и D_k при орошении сточными водами даже превышают значения для водных растворов, что можно объяснить существенным влиянием на размытие фронта конвективного потока. Во всех случаях можно констатировать высокое содержание солей в почвах и оросительных водах. Это приводит к тому, что катионные формы ТМ почти не сорбируются почвой и скорость их миграции должна значительно повышаться.