

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ КАДМИЕМ АГРОЦЕНОЗА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2020 г. В. А. Четырбоцкий^{1,*}, А. Н. Четырбоцкий²

¹Акционерное общество “Апатит”, Центр инновации
119333 Москва, Ленинский просп., 55/1, стр. 1, Россия

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
690022 Владивосток, просп. 100 лет Владивостоку, 159, Россия

*E-mail: Chetyrbotsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.03.2019 г.

После доработки 18.04.2019 г.

Принята к публикации 13.01.2020 г.

Рассмотрены вопросы динамики накопления кадмия в почве и растениях сельскохозяйственного назначения, который относится к группе особо токсичных тяжелых металлов. Для их решения построена математическая модель этой динамики и установлена их адекватность экспериментальному материалу. В рамках модели показано, что динамика выноса кадмия определялась величинами биомассы растения и содержания Cd в ризосфере. На основании модели разработана методика оценки длительности периодов времени безопасного режима внесения в почву Cd-содержащих удобрений, который определяется моментом превышения предельно допустимой концентрации (ПДК). В качестве примера дана оценка времени загрязнения почв ряда экономически развитых стран. Приведена интерпретация полученных результатов.

Ключевые слова: кадмий, вегетационный период, математическая модель, вычислительные имитационные эксперименты.

DOI: 10.31857/S0002188120040031

ВВЕДЕНИЕ

Кадмий (Cd) входит в группу токсичных тяжелых металлов (ТМ), особенностью которого является накопление в почве и аккумуляция в растениях. По трофической цепочке он накапливается в организмах животных и человека, что создает техногенную угрозу жизни народонаселения [1]. Интенсивные выбросы промышленности, транспорта и использование различных химических средств (в том числе и удобрений) привели к накоплению ТМ на значительных территориях, что отрицательно влияет на почву, растения и другие живые организмы, и, как следствие, возрастает фоновый уровень содержания тяжелых металлов в биосфере [2].

Поступление Cd в почву определяют ее температурный режим и режим влажности, наличие в ней неорганических и органических веществ. Например, при снижении кислотности почвы с pH 7.0 до 5.5 содержание металла в корне райграса возрастает в 4 раза. Кроме того, способность растений к поглощению Cd во многом зависит от их видовых особенностей [3, 4]. В частности, среди культурных видов злаков в гораздо большей сте-

пени его поглощают рис, рожь и ячмень, и в меньшей степени – кукуруза и пшеница [5, 6].

Для снижения содержания доступного Cd в почве и растениях имеются специальные регламенты и контролируемые государством нормы. Они определяют предельно допустимые концентрации (ПДК) элементов в почве и растениях. В России, Европейском Союзе (ЕС) и других экономически развитых странах обсуждается его допустимое содержание в фосфорных минеральных удобрениях, т.к. Cd имеет тенденцию к преимущественному накоплению в фосфоритах. Номенклатура доз изменяется в зависимости от содержания кадмия: до 20 (слабо загрязненные), от 40 до 60 (средне загрязненные) и от 60 и более (сильно загрязненные) мг Cd/кг P₂O₅ [7, 8].

Для внедрения этих правил и норм требуются сведения о реакции системы почва–удобрение–растение в ответе на внесение удобрений с различным содержанием Cd. Интерес представляет его содержание в почве и растениях после окончания вегетационного периода [9]. Такие сведения могут оказаться доступными в 2-х случаях: 1 – когда уже имеется репрезентативный экспе-

риментальный материал, 2 – при наличии некоторого аппарата/механизма, посредством которого можно получить интересующий прогноз состояния этой системы при соответствующем на нее воздействии [10].

Интенсивность возделывания сельскохозяйственных культур обуславливает применение разнообразных минеральных удобрений, что может привести (и приводит) к фрагментарности и недостаточности экспериментального материала (случай 1). Поэтому актуальной является задача построения аппарата, при помощи которого реализуется случай 2. Для его построения требуется математическая модель совместной динамики биомассы и содержания в ней этих элементов питания.

В практике математического моделирования обычно постулируется логистический характер распределения биомассы растения и содержания в ней элементов питания. Однако при ее использовании как аппроксимации эмпирического распределения принимается допущение: удельный рост некоторой характеристики объекта определяется ее приростом и величиной самой характеристики, ограничивающей этот прирост. Так вот, если для содержания в растении элементов его питания принимается логистическое распределение, то получается следующее: находясь уже в самом растении, они сами себя и ограничивают. Но ведь это функция непосредственно растения и ризосферы, а не элементов питания, содержащихся в самом растении. Кроме того, их источник находится в ризосфере, а не в растении.

Согласно сказанному, актуальной представляется задача построения модели динамики элементов питания растений, оценка ее коэффициентов и оценка адекватности модели. Актуальна также задача проведения на основании моделей вычислительных экспериментов для оценки периода времени, при котором содержание тяжелого металла (ТМ) Cd в растении не превышает установленной нормы ПДК.

Цель работы – разработка методологии оценки длительности периодов времени безопасного (т.е. до момента превышения ПДК) режима внесения в почву содержащих Cd удобрений. Для ее выполнения построена модель совместной динамики биомассы растения и содержания Cd в его тканях, оценка коэффициентов и адекватности моделей, выполнение вычислительных имитационных экспериментов поступления Cd из ризосферы в растение совместно с удобрениями с различной степенью его содержания (загрязнения).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Все расчеты и вычислительные эксперименты выполняли на основании экспериментальных распределений, которые характеризуют влияние элементов питания растений (K, P, N, Ca, Mg, Cd) на рост яровой пшеницы сорта Ленинградская-97 на дерново-подзолистой почве. Структурированные цифровые распределения были сформированы на основании работ [11–14].

Объект изучения представлен распределениями биомассы надземной части растения и содержания в этой части элементов минерального питания. Методы обработки этого материала основаны на приемах математического моделирования и технологии решения задач нелинейного оценивания параметров средствами системы MATLAB.

В работе использовали экспериментальные распределения биомассы и соответствующие ей распределения выносов химических соединений элементов (K, P, N, Ca, Mg, Cd). Они были сформированы при экспериментальных исследованиях на яровой пшенице [15]. Методика их проведения состояла в следующем. На окультуренной дерново-подзолистой средне суглинистой почве выращивали яровую пшеницу сорта Ленинградская-97 (вегетационный период в зависимости от районов возделывания и погодных условий меняется от 85 до 110 сут [16]). Почва имела нейтральную реакцию среды, высокое содержание обменного калия и подвижного фосфора, низкое – содержание гумуса (1.5%), характеризовалась высокой насыщенностью основаниями и не нуждалась в известковании. При закладке опыта содержание кислорастворимых соединений Cd в почве было равно 0.5 мг/кг. Для повышения валового содержания ТМ и возможности оценки влияния большей концентрации на общий ценоз замкнутой системы в нее искусственно был внесен раствор сульфата кадмия из расчета 1 мг Cd/кг дерново-подзолистой почвы. В экспериментах рассматривали отклик системы на внесение различного количества калия, который применили в виде сульфата калия (K_2SO_4 , 46% д.в. в дозах от K_{20} до K_{220}). Для обеспечения комплексного питания растений применяли азотные удобрения (сульфат аммония, 21% д.в. в дозе N_{150}) и фосфорные удобрения (P_c , 26% д.в. в дозе P_{100}).

В опытах использовали сосуды Кирсанова, где масса почвы составила 5.5 кг при ее влажности 50% (из чего следует, что сухая масса равнялась 2.25 кг) [17, 18]. Посев пшеницы производили проросшими семенами по 25 растений на сосуд. После прореживания в каждом сосуде было оставлено по 20 растений. Влажность почвы под-

Таблица 1. Регрессионные уравнения содержания Cd в системе растение–почва [22]

| Почва | Ячмень | Вика |
|--|--------------------|----------------------|
| Дерново-подзолистая слабокультуренная | $Y = 3.29 - 0.74X$ | $Y = -0.049 + 1.85X$ |
| Дерново-подзолистая среднекультуренная | $Y = 5.17 + 0.74X$ | $Y = 5.21 + 1.2X$ |
| Чернозем типичный | $Y = 3.87 + 1.04X$ | $Y = -0.34 + 1.5X$ |

держивали на оптимальном уровне (70% ПВ) за счет контролируемого полива, температуры – за счет специально отапливаемых тепличных помещений. Всего было 8 вариантов, где на каждый из них приходилось 9 временных точек отбора образцов растений пшеницы на 10, 14, 19, 24, 29, 37, 47, 57, 67-е сутки после посева. Отчет времени отбора начали с момента первых всходов. В опытах определяли сухую надземную массу растений, а также вынос этой частью растений как основных элементов питания (макроэлементов), так и микро- и мезоэлементов (включая такой элемент-антагонист как кадмий) по стандартной методике [19].

Модель динамики биомассы надземной части растений и динамики выноса элементов его питания. В практике изучения агроценозов широкое применение получили регрессионные уравнения [20, 21], где зависимой переменной выступает содержание ТМ в растении, а предикторами – их подвижные соединения в почве. В частности, для Cd в [22] приведены такие уравнения (табл. 1).

Проблемы использования этих уравнений для прогноза зависимости выноса Cd от его содержания в почве вызваны масштабом времени их корректного применения. Действительно, согласно им, внесение в почву удобрений сразу приводит к изменениям его содержания в растении, что уместно только для всего вегетационного периода. В связи с этим актуальна задача построения моделей, где реализован механизм динамики выноса для более адекватной оценки процессов в биогеоценозе.

При построении модели принимали такие допущения:

1 – удельный прирост в единицу времени биомассы $\{B_k, k = 1-8\}$ определяется ее естественным приростом, внутривидовой конкуренцией и текущим содержанием в ризосфере элементов питания растения;

2 – удельный прирост содержаний элементов питания $\{C_{i,k}, i = 1-6, k = 1-8\}$ в растении пропорционален их текущим содержаниям в ризосфере (допускается влияние на этот прирост остальных элементов);

3 – коэффициенты уравнений не зависят от опытов,

4 – модель охватывает весь вегетационный период растения, где временной масштаб составляет 1 сут.

Согласно этим допущениям, запись модели совместной динамики биомассы растения и элементов его питания принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{dB_k}{dt} = \left[a_{0,1} - a_{0,2}B_k + \sum_{i=1}^6 (a_{i,1}C_{i,k,0} - a_{i,2}C_{i,k}) \right] B_k, \\ \frac{dC_{i,k}}{dt} = \sum_{j=1}^6 (b_{i,j}C_{j,k,0} - d_{i,j}C_{j,k}) B_k, \\ B_k(0) = B_{k,0} \quad \text{и} \quad C_{i,k}(0) = C_{i,k}^{(0)}, \end{cases} \quad (1)$$

где $i = 1-6$ и $k = 1-8$, $a_{0,1}$ – коэффициент естественного прироста, $a_{0,2}$ характеризует внутривидовую конкуренцию, $\{C_{i,k,0}, i = 1-6, k = 1-8\}$ – начальное содержание элементов питания в ризосфере, $\{a_{i,1}, a_{i,2}, i = 1-6\}$ характеризуют доступность элементов ризосферы и их динамику перехода из ризосферы в растение, $\{b_{i,j}, d_{i,j}, i, j = 1-6\}$ характеризует влияние элементов ризосферы на потребление растением элементов его питания, $\{B_{k,0}, k = 1-8\}$, $\{C_{i,k}^{(0)}, i = 1-6, k = 1-8\}$ – начальные показатели биомассы и содержаний в растении элементов питания.

Когда в ризосфере содержание элементов питания достаточно низкое или оно уже полностью израсходовано (выражение в круглых скобках равно нулю), кривая биомассы выходит на свой предельный уровень $a_{0,1}/a_{0,2}$.

Оценка параметров модели. Разностные схемы системы (1) линейны по коэффициентам. Поэтому для их нахождения можно применить метод наименьших квадратов (МНК). Подходящие для его применения разностные схемы принимают вид

$$\begin{aligned} \ln(B_k^{(t+1)}/B_k^{(t)}) &= a_{0,1} - a_{0,2}B_k^{(t)} + \\ &+ \sum_{i=1}^6 a_{i,1}C_{i,k,0} - \sum_{i=1}^6 a_{i,2}C_{i,k}^{(t)}, \end{aligned} \quad (2)$$

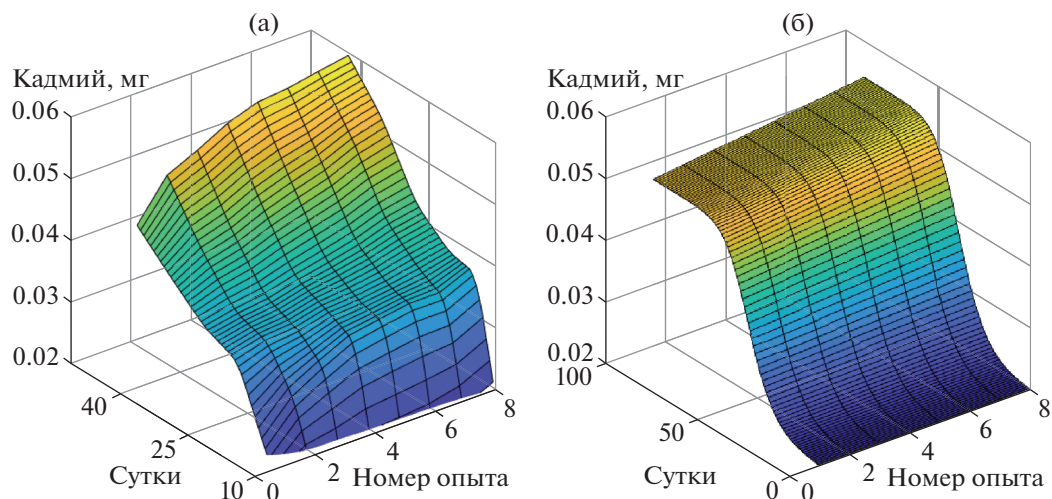


Рис. 1. Выборочные и модельные распределения биомассы и вынос Cd.

$$\frac{C_{i,k}^{(t+1)} - C_{i,k}^{(t)}}{B_k^{(t)}} = \sum_{j=1}^6 b_{i,j} C_{j,k,0} - \sum_{j=1}^6 d_{i,j} C_{j,k}, \quad (3)$$

где t – текущие сутки и суточный шаг по времени.

Если в (2) ограничиться только первыми двумя членами его правой части, то вычисленные МНК доверительные интервалы коэффициентов принимают величины: $a_{0,1} = (1.546 \pm 0.101) \times 10^{-1} \text{ сут}^{-1}$ и $a_{0,2} = (-0.033 \pm 0.002) \times 10^{-1} (\text{сут г})^{-1}$.

Биомасса следует логистическому уравнению

$$B_k(t) = \frac{a_{0,1} B_{k,0}}{(a_{0,1} - a_{0,2} B_{k,0}) \exp(-a_{0,1} t) + a_{0,2} B_{k,0}}. \quad (4)$$

Тогда к окончанию вегетационного периода (при больших t) биомасса растения близка к своей максимальной величине $B^* = a_{0,1}/a_{0,2}$.

На рис. 1 представлены распределения: а – сглаженное выборочное распределение, б – модельное распределение для всего вегетационного периода роста пшеницы Ленинградская-97 на дерново-подзолистой почве (как правило, 90 сут [23]). Актуальность построения модели распределения для всего вегетационного периода обусловлена важностью задач прогноза урожая. Для этого случая искомыми являются начальная величина биомассы $B_{k,0}$, $a_{0,1}$ и $a_{0,2}$. Их оценка следует решению задачи поиска минимума функционала, который выступает мерой отклонений выборочных и модельных распределений. Ее решение определяет такие доверительные интервалы: $B_{k,0} = 0.265 \pm 0.034 \text{ г}$, $a_{0,1} = 0.132 \pm 0.024 \text{ сут}^{-1}$ и $a_{0,2} = (-0.054 \pm 0.008) \times 10^{-1} (\text{сут г})^{-1}$.

Анализ выборочного распределения биомассы (рис. 1а) указывает независимость биомассы от схемы опытов. Действительно, для них практически совпадают первые и конечные уровни. Форма кривых отвечает логистической или сигмоидальной форме (4), особенность которых состоит в наличии точки перегиба и выходе этих кривых на плато. Распределения показывают высокое подобие модельных и выборочных кривых. Корреляция случаев (а) и (б) составляет 0.995, корреляция (в) и (г) – 0.994. При ее расчете использовали только те строки модельного массива, которые приходятся на сутки проведения выборочных экспериментов.

Если в (3) ограничиться членами только в одной круглой скобке правой части (которые отвечают только Cd), то оценка МНК приводит к таким доверительным интервалам: $b_{6,6} = (6.358 \pm 0.532) \times 10^{-5} (\text{сут мг})^{-1}$ и $d_{6,6} = (-1.027 \pm 0.039) \times 10^{-3} (\text{сут мг})^{-1}$. Тогда корреляция между выборочным и модельным распределениями составляет 0.942. Для этого случая решение второго уравнения (1) принимает вид

$$C_{6,k}(t) = C_{6,k}^{(0)} \exp\left(-d_{6,6} \int_0^t B dt\right) + \frac{b_{6,6} C_{6,k,0}}{d_{6,6}} \left[1 - \exp\left(-d_{6,6} \int_0^t B dt\right)\right], \quad (5)$$

где первое слагаемое отражает влияние начального распределения, а второе – механизм динамики выноса элементов. Соотношение (5) допускает предметную интерпретацию. Действительно, поскольку биомасса растения – монотонно возрас-

тающая функция, то при большом t показатель экспоненты стремится к $-\infty$, а сама экспонента – малое число. Тогда вынос элементов определяется их содержанием в ризосфере $C_{6,k,0}$ и соотношением между показателями доступности элементов питания из ризосферы и темпа их утилизации.

Для модели распределения Cd в течение его вегетационного периода следует определить коэффициенты $C_{6,k,0}$, $b_{6,6}$ и $d_{6,6}$. Их оценки следуют решению задачи поиска минимума меры отклонений экспериментальных и модельных распределений. Ее решение определяет доверительные интервалы: $C_6^{(0)} = 0.02 \pm 0.002$ мг, $b_{6,6} = (2.319 \pm \pm 0.251) \times 10^{-5}$ (сут мг) $^{-1}$ и $d_{6,6} = (-4.149 \pm 0.052) \times \times 10^{-3}$ (сут мг) $^{-1}$. Анализ выборочных и модельных распределений показывает их высокую степень подобия. Так, корреляция случаев (а) и (б) составляет 0.995, корреляция (в) и (г) – 0.994.

Вычислительные эксперименты. Постановка вычислительных экспериментов ставится следующим образом. При оптимальной для роста растения температуре и влажности сосуд радиуса 10 см заполнен окультуренной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвой массой 5.5 кг [12, 15]. В его почве нет вредных примесей ТМ, т.е. при $t = 0$ $C_{i,k,0} = 0$. Принимается, что каждый год доза внесения P_2O_5 в посев составляет до 120 кг/га [18, 24]. Тогда для одного сосуда эта норма в среднем составляет 377 мг. Нормы загрязнения фосфорных удобрений определяются как слабо загрязненные (20 мг Cd/кг P_2O_5), средне загрязненные (40 мг Cd/кг P_2O_5) и сильно загрязненные (60 мг Cd/кг P_2O_5). В этом случае они равны 0.008, 0.016 мг и 0.024 мг Cd соответственно. Посев и сбор урожая выполняли раз в год без технических обработок (мелиорации, обработки удобрениями, классической, минимальной, нулевой обработками и т.п.). В почве ТМ закрепляются в верхнем почвенном слое гумусовыми веществами, глинистыми минералами, карбонатами и минералами с переменным зарядом [25]. В почве Cd сразу связывается в нерастворимые соли, либо адсорбируется на корнях растений. Выветривание, вымывание, а также испарение с поверхности почвы для ТМ практически отсутствуют. Такая имитация достигается наличием сосуда, где потери Cd имитируют природные процессы. Поэтому эта постановка эксперимента обеспечивает наиболее достоверную оценку содержания и действия кадмия (имитация изолированного лабораторного эксперимента) на биогеоценоз.

Вычислительный эксперимент поставлен таким образом: организуют цикл вычислений для определения года, когда содержание Cd в ризосфере окажется равным или превысит заданный уровень ПДК. Согласно модели (1), растение в течение отдельного года потребляет часть внесенного в почву Cd. Максимальное число итераций задано равным 600 годам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов приведены на рис. 2. Случаи (а), (г) и (ж) характеризуют динамику аккумуляции Cd в ризосфере за период проведения экспериментов (600 лет); (б), (д) и (з) – динамику выноса Cd в конце вегетационного периода растений для каждого года эксперимента; (в), (е) и (и) – распределение Cd за вегетационный период в последний год эксперимента (за сезон 599–600 гг.). Форма кривых на рис. 2 показывает, что аккумуляция Cd в растении и ризосфере имеет нелинейный характер, который насчитывает 3 этапа: его линейная зависимость, постепенное снижение скорости накопления Cd в форме изгиба и стремление к постоянному уровню (плато), которое можно объяснить эффектом “насыщения”. Его интерпретация состоит в наличии такого момента, когда в растении “емкость” содержания элементов достигает предела и тем самым уравнивает поступление элементов извне (внесение удобрений).

Таким образом, рост содержания Cd в почве и растениях прекращается и держится на постоянном уровне. Чем выше концентрация исходного элемента, тем быстрее наступает данный эффект. Такой результат подтверждается рядом авторитетных источников [3, 5, 20, 26].

Согласно расчетам для слабо загрязненных удобрений, содержание Cd в ризосфере достигнет ПДК России и Казахстана за 271 год, а для средне загрязненных и сильно загрязненных – за 89 и 55 лет соответственно. Токсичность растений в последнем варианте уже на первых итерациях на несколько порядков превосходит остальные. Такие изменения при применении удобрений с повышенным содержанием Cd будут губительным образом оказывать влияние для человека и животных, употребляющих данный продукт.

Для средне загрязненных удобрений вынос Cd к концу 599 года оказался в 2 раза больше предыдущего, а для сильно загрязненных удобрений повышение концентрации будет продолжать существенно загрязнять почву, поэтому уже на ранних стадиях необходимо будет прекратить всякое внесение удобрений и сконцентрировать все уси-

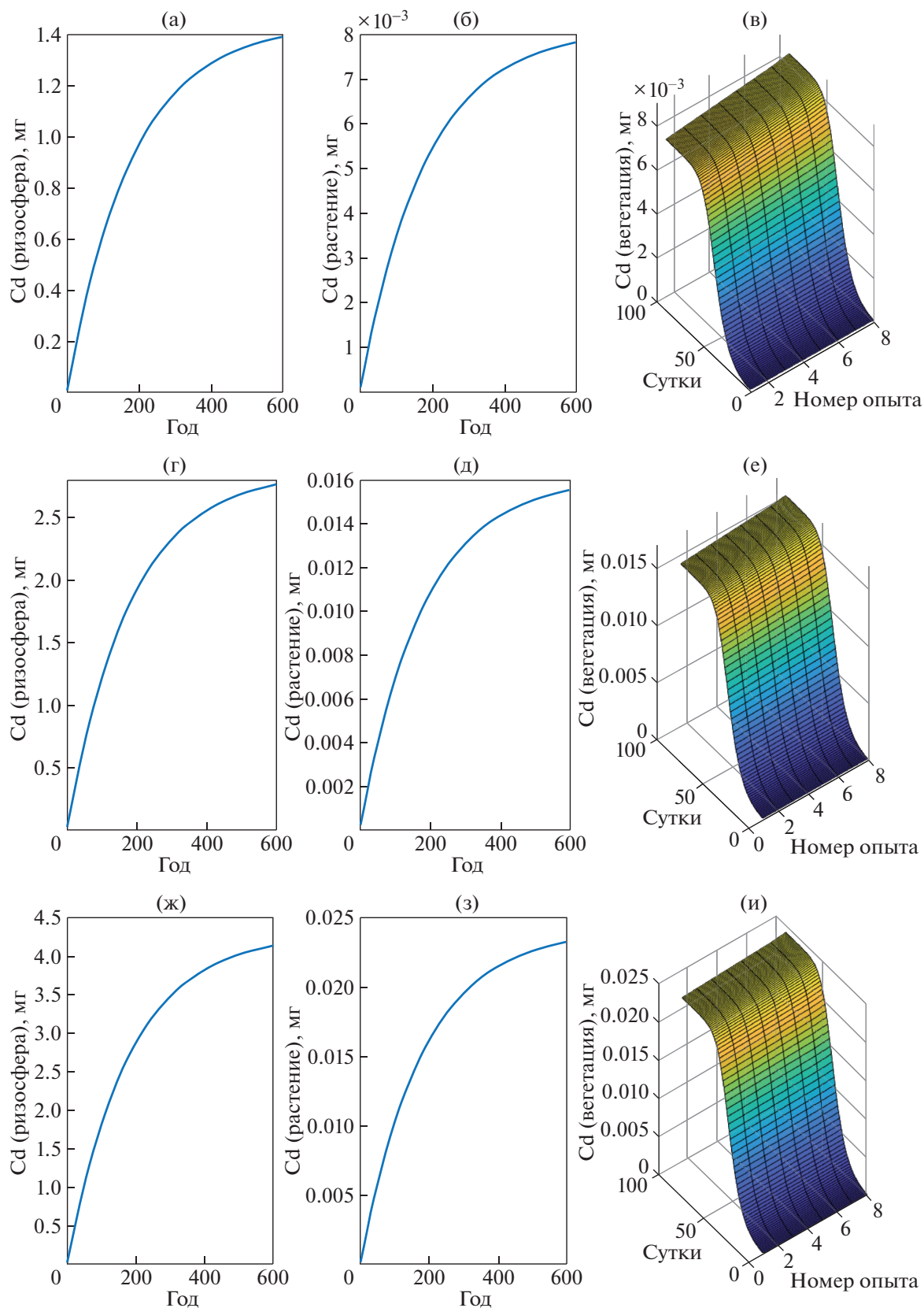


Рис. 2. Распределение Cd в экспериментах: (а–в) – слабо загрязненные удобрения, (г–е) – средне загрязненных удобрений, (ж–и) – сильно загрязненные удобрения.

Таблица 2. ПДК содержания кадмия в почве различных стран, мг/кг сухой массы

| Страна | ПДК | Источник данных | Результаты экспериментов (время), лет | | |
|----------------------------|-----|-----------------|---------------------------------------|-----|-----|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Австрия | 5 | [27] | – | – | – |
| Бразилия | 1.3 | [27] | – | – | 205 |
| Великобритания Германия | 3 | [27] | – | – | – |
| ЕС | | [27] | | | |
| Китай | 1 | [28] | – | 275 | 133 |
| Польша | | [27] | | | |
| Финляндия | | [26] | | | |
| Канада | 1.4 | [29] | – | – | 237 |
| Нидерланды | 0.8 | [30] | – | 177 | 98 |
| Казахстан | 0.5 | [31] | 271 | 89 | 55 |
| Россия | | [32] | | | |
| США | 1.6 | [27] | – | – | 327 |

Примечание. В графе 1 – слабо загрязненные, 2 – средне загрязненные, 3 – сильно загрязненные удобрения.

лия на применении мероприятий, направленных на ремедиацию почв. Содержание Cd в растениях к концу рассматриваемого периода времени на несколько порядков больше, чем в остальных сценариях, что говорит о значительном повышении токсичности растений.

Следуя проведенным экспериментам, далее рассмотрен случай прогноза превышения ПДК в отдельных экономически развитых странах. Согласно табл. 2, для слабо загрязненных удобрений не наблюдается превышение допустимых норм в рамках заданных итераций (600 лет). Вариация элементов для средне загрязненных удобрений весьма значительна, а для сильно загрязненных удобрений не отмечено превышения только у исключительного ряда стран с высокими уровнями ПДК. Следует отметить, что в некоторых странах, таких как Австрия, Великобритания, Германия, ПДК значительно превышены по сравнению с другими странами, тогда как самые низкие пределы отмечены в Казахстане и России.

Понятно, что полученные результаты позволяют достаточно грубо оценить сценарии безопасной эксплуатации земель сельскохозяйственного направления. Если речь идет о проводимых экспериментах в сосудах, то вероятна ошибка измерений, связанная с большим различием процессов, которые происходят в реальных условиях в полях и вегетационных опытах в сосудах. К тому же испытания проводили всего за один период вегетации. В таком случае достоверность результатов может быть получена только на основании большой совокупности данных, полу-

ченных в полевых условиях с динамикой роста и развития растений, выноса элементов как минимум в несколько десятков лет.

На основании проведения подобных вычислительных экспериментов становится возможным оценить антропогенное влияние на среду в зависимости от определенного промежутка времени, при существенном снижении затрат на проведения полевых экспериментов. Стоимость таких работ варьирует от 500 тыс. до нескольких млн руб. за один полевой опыт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывало адекватность разработанной математической модели экспериментальному материалу. Действительно, если мерой адекватности выступает корреляция между модельными и экспериментальными распределениями, то их величины превышали 0.940.

В рамках модели показана достоверность положения о том, что количественно динамика выноса Cd в надземную часть растения определяется биомассой этой части и его текущим распределением в ризосфере. Динамика биомассы этой части растений следует логистическому уравнению.

На основании модели разработана методология оценки длительностей периодов безопасного режима внесения в почву содержащих Cd удобрений, где длительность периода определяется моментом превышения ПДК величиной содержа-

ния Cd. Методология опробована на оценке ПДК для почв экономически развитых стран.

Эта оценка показала, что удобрения с низким содержанием Cd (до 20 мг Cd/кг P₂O₅) практически не влияли на состояние почвы и растений, тогда как средне (от 40 до 60 мг Cd/кг P₂O₅) и сильно загрязненные (>60 мг Cd/кг P₂O₅) оказывали существенное влияние на биогеоценоз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников В.А., Аветисян А.А. Оценка содержания тяжелых металлов (свинец и кадмий) в семенах перспективных кормовых растений // Вестн. КрасГАУ, биол. науки. 2014. № 4. С. 10–14.
2. Соколов О.А., Черников В.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Кн. 1. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1999. 164 с.
3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
4. Neng-Chang C., Huai-Man C. Chemical behavior of cadmium in wheat rhizosphere // Pedosphere. 1992. V. 2. P. 363.
5. Казнина Н.М., Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Батова Ю.В. Влияние кадмия на некоторые физиологические показатели растений ячменя в зависимости от их возраста // Тр. Карел. НЦ РАН. 2010. № 2. С. 27–31.
6. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Устойчивость растений к кадмию (на примере семейства злаков): учеб. пособ. Петрозаводск: Ин-т биол. Карел. НЦ РАН, 2012. 55 с.
7. Oosterhuis F.H., Brouwer F.M., Wijnants H.J. A possible EU wide charge on cadmium in phosphate fertilisers: economic and environmental implications // Final report to the European Commission. Rep. E-00/02. April. 2000.
8. Proposal for a regulation of the European parliament and of the council laying down rules on the making available on the market of CE marked fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009. <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/10102/2016/EN/SWD-2016-64-F1-EN-MAIN-PART-2.PDF>
9. Ефремова М.А., Митрофанов В.В. Исследование динамики накопления кадмия овсом в опытах с водной и почвенной культурами // Изв. СПбГАУ. 2018. № 50. С. 62–68.
10. Bessonov N., Volpert V. On a problem of plant growth // Patterns and waves / Eds. Abramian A., Vakulenko S., Volpert V. St. Peterburg, 2003. P. 323–337.
11. Ефремова М.А., Губин А.Н., Сладкова Н.А. Занилов А.Х. Взаимодействие фосфора и тяжелых металлов (цинка и кадмия) в системе торфяная низинная почва–растение // Сб. научн. тр. “Гумус и почвообразование”. СПб.–Пушкин: СПбГАУ, 2009. С. 67–71.
12. Ефремова М.А., Сладкова Н.А., Вяльшина А.С. Динамика накопления кадмия и калия растениями пшеницы на дерново-подзолистой и торфяной низинной почвах // Агрохимия. 2013. № 11. С. 86–96.
13. Ефремова М.А., Сладкова Н.А., Дубовицкая В.И. Динамика накопления кадмия растениями пшеницы из торфяной низинной почвы // Изв. СПбГАУ. 2011. № 25. С. 34–39.
14. Сладкова Н.А. Распределение цинка и кадмия в системе торфяная почва–растение под влиянием фосфорных и калийных удобрений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2016. 22 с.
15. Сладкова Н.А. Распределение цинка и кадмия в системе торфяная почва–растение под влиянием фосфорных и калийных удобрений: Дис. ...канд. биол. наук. СПб., 2016. 187 с.
16. Растениеводство / Под ред. Посыпанова Л.А. М.: Колос, 1997. 447 с.
17. Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А. Почвоведение с основами геологии: учеб.-к. М.: РГАУ–МСХА, 2012. 362 с.
18. Кидин В.В., Торшин С.П. Агрохимия. М.: Проспект, 2015. 591 с.
19. Дричко В.Ф., Изосимова А.А. Методика определения удельных скоростей роста растений и выноса ими химических элементов из почвы. СПб.: АФИ, 2011. 24 с.
20. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 396 с.
21. Kersebaum K., Richter J. Modelling nitrogen dynamics in a plant–soil system with a simple model for advisory purposes // Fertil. Res. 1991. V. 27. № 2–3. P. 273–281.
22. Черных Н.А., Ладонин В.Ф. Нормирование загрязнение почв тяжелыми металлами // Агрохимия. 1995. № 6. С. 71–80.
23. Четырбоцкий В.А. Математическое моделирование динамики минерального питания растений в системе удобрение–почва–растение (на примере азота, фосфора и кадмия) // Тр. конф. “Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные концепции и перспективы”, 27–31 мая, 2019 г., Москва. М.: Изд-во МГУ, 2019. С. 408–411.
24. Минеев В.Г. Агрохимия. М.: Изд-во МГУ, 2006. 714 с.
25. Violante A., Cozzolino V., Peremolov L., Caporale A.G., Pigna M. Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments // J. Soil. Sci. Plant Nutr. 2010. № 10(3). P. 268–292.
26. Водяницкий Ю.Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами. М.: Изд-во МГУ, 2017. 192 с.
27. Gonçalves A.C., Nacke H., Schwantes D., Coelho G.F. Heavy metal contamination in Brazilian agricultural soils due to application of fertilizers // Environmental risk assessment of soil contamination. Hernandez-Soriano: IntechOpen, 2014. № 3. <https://doi.org/10.5772/57268>
28. Tiankui Li, Yi Liu, Sijie Lin, Yangze Liu, Yunfeng Xie. Soil pollution management in China: A Brief introduction // Sustainability. 2019. V. 11. № 556. P. 15.

29. Canadian council of ministers of the environment. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Cadmium (1999). // Canad. Environ. Qual. Guidel. 1999. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment
30. Никитина А.В., Жаткина Т.С., Курбатова А.И. Некоторые аспекты нормирования загрязняющих веществ в почве // Вестн. РУДН. Сер. экология и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 5. С. 84–88.
31. Нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ, вредных организмов и других биологических веществ, загрязняющих почву, утвержденные совместным приказом Министерства здравоохранения Республики Казахстан от 30 января 2004 г. № 99 и Министерства охраны окружающей среды Респ. Казахстан от 27 января 2004 г. Астана, 2004. № 21-П.
32. Постановление “О введении в действие гигиенических нормативов ГН”. РФ. М., 2006. 2.1.7.2041-06 от 23 января 2006 г.

Estimation of Cadmium Contamination of Agroecosystem by Mathematical Modeling Methods

V. A. Chetyrbotskiy^{a,#} and A. N. Chetyrbotskiy^b

^a Joint stock company “Apatit”, Innovation Center
Leninsky prosp. 55/1, p. 1, Moscow 119333, Russia

^b Far Eastern Geological Institute FEB RAS
prosp. 100 years of Vladivostok 159, Vladivostok 690022, Russia

[#]E-mail: Chetyrbotskiy@yandex.ru

The article deals with the dynamics of cadmium accumulation in soil and agricultural plants, which belongs to the group of particularly toxic heavy metals. To solve them, a mathematical model of this dynamics is constructed and their adequacy to the experimental material is established. The model shows that the dynamics of cadmium removal was determined by the values of plant biomass and Cd content in the rhizosphere. Based on the model, a method has been developed for estimating the duration of the safe mode of applying Cd-containing fertilizers to the soil, which is determined by the moment when the maximum permissible concentration (MPC) is exceeded. As an example, the estimation of the time of soil pollution in a number of economically developed countries is given. The interpretation of the results obtained is given.

Key words: cadmium, vegetation period, mathematical model, computational simulation experiments.