

УДК 546.47 631.41 633.36/37
DOI: 10.25684/NBG.scbook.148.2019.02

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ, ПОДВИЖНОСТИ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ДОСТУПНОСТИ Zn, ВНЕСЕННОГО В КАЧЕСТВЕ МИКРОЭЛЕМЕНТА В СИСТЕМЕ «ПОЧВА – ПОЧВЕННЫЙ РАСТВОР - СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСТЕНИЯ»

Вячеслав Сергеевич Анисимов, Лидия Николаевна Анисимова,
Людмила Митрофановна Фригидова, Юрий Николаевич Корнеев,
Руслан Алексеевич Фригидов, Андрей Иванович Санжаров,
Дмитрий Владимирович Дикарев, Илья Владимирович Кочетков

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
249030, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Россия,
e-mail: vsanisimov@list.ru

Аннотация. *Целью* работы являлась оценка параметров эффективной диффузии и конвективного переноса (массопереноса) ионов цинка в корни кормовых бобов (*Vicia faba* L.) сорта Янтарные, а также изучение в динамике процессов прироста биомассы растений, изменения концентрации Zn в надземных частях и корнях, выноса металла с биомассой. *Методы.* Определены свойства исследуемой дерново-подзолистой супесчаной почвы с помощью общепринятых методов, проведены модельные опыты по изучению диффузии Zn, а также водно-балансовые вегетационные эксперименты с кормовыми бобами. В течение вегетационного периода методом центрифугирования извлекались квазиравновесные почвенные растворы. *Результаты.* Получены данные по динамике концентрации Zn в надземных частях и корнях кормовых бобов и выноса металла с надземной биомассой. Определены количественные параметры и формальные зависимости процесса корневого поглощения Zn растениями от времени. Установлена их взаимосвязь с динамикой содержания легкодоступных растениям водорастворимых форм Zn в почвах. Определены значения показателей миграции - скорости поступления влаги $v(H_2O)$, коэффициента эффективной диффузии цинка ($D_{эф}$), скорости массового потока (переноса) растворенных в воде ионов цинка ($v(Zn)$) в корни растений с конвективным потоком влаги в зависимости от возраста кормовых бобов. *Заключение.* Установлено, что практически весь Zn, поглощаемый растениями, поступает через корневую систему в результате процессов массопереноса с конвективным потоком влаги (диффузионный механизм поступления Zn в корни растений играет второстепенную роль). Полученные показатели могут быть использованы для моделирования процессов корневого поглощения ТМ растениями.

Ключевые слова: кормовые бобы; цинк; надземная биомасса; корни; удельная поверхность; транспирация; концентрация; вынос с урожаям; эффективная диффузия; конвективный поток; массоперенос.

Введение

Цинк является микроэлементом, необходимым для жизнедеятельности растений [10]. Являясь жизненно важным элементом в малых количествах, при накоплении в высоких концентрациях Zn может оказывать токсическое действие на организм. Большинство высших растений (включая все сельскохозяйственные культуры) проявляют высокую толерантность к Zn в широком диапазоне его повышенных концентраций в почвах. Толерантность при этом обусловлена функционированием различных механизмов, обуславливающих барьерный (исключительный) или безбарьерный (аккумулятивный) типы поглощения элемента [1, 9].

В многочисленных работах отмечается, что поглощение Zn корнями растений может быть как активным процессом, так и пассивным в зависимости от его концентрации в субстрате [10,14,15]. Данная работа посвящена важным с точки зрения физиологии растений, агрономии и токсикологии аспектам поведения Zn в

агроэкосистемах: оценке миграции металла в системе почва – почвенный раствор – растение. Отдельно рассмотрены вопросы, связанные с вкладом в этот процесс массового переноса растворенных в воде ионов цинка в корни растений с конвективным потоком влаги.

Объекты и методы исследования

Поведение Zn в системе почва - растение изучали в вегетационных опытах с почвенной культурой [5] при влажности почвы 60% от полной влагоемкости (ПВ)). Объектом исследования служили кормовые бобы (*Vicia faba* L.) сорта Янтарные, выращиваемые на дерново-подзолистой супесчаной окультуренной почве (П^Д_с), отобранной из пахотного горизонта в Жуковском районе Калужской области [1, 2].

Физические и химические показатели исследуемой почвы, определенные общепринятыми методами: рН_{KCl} 5,05±0,01; рН_{водн} 6,04±0,01; содержание гумуса 1,67±0,03%; гидролитическая кислотность (Н_г) 1,89±0,02 мг-экв/100 г; сумма обменных оснований (S) 5,3±0,1 мг-экв/100 г; обменный К₂O (по Масловой) 77,7±1,3 мг/кг; подвижный P₂O₅ (по Кирсанову) 126,9±1,9 мг/кг; подвижный Fe (по Тамму) 1,54±0,16 г/кг; массовая доля валового Zn 30,7±2,7 мг/кг. Гранулометрический состав почв: доля фракций: <0.01мм -18,4 %; <0.001мм - 5,9 %.

Оценку величины коэффициента эффективной диффузии Zn проводили на основе модельного лабораторного опыта по изучению вертикальной миграции с применением радионуклида ⁶⁵Zn, в контролируемых условиях ($t = 25 \pm 1$ °C) при влажности исследуемой дерново-подзолистой супесчаной почвы 60% ПВ. Для этого почву, просеянную через сито с диаметром отверстий 1 мм, помещали в цилиндрические полипропиленовые колонки высотой 100 мм и диаметром 35 мм, закрытые снизу фильтрующим материалом (толщина слоя почвы - 90 мм, $d_v = 1,20$ г/см³) и насыщали водой до ПВ согласно методике [5]. Далее, позволяли стечь гравитационной влаге и высушивали на воздухе в горизонтальном положении при $t_{\text{комн.}}$ до $W = 60\%$ ПВ (неоднократные попытки высушить образцы почвы до $W = 60\%$ ПВ не удалось ввиду образования горизонтальных трещин и распада единого почвенного монолита внутри колонки на отдельные фрагменты). После достижения образцами почвы внутри колонок заданной влажности (контроль по массе) их термостатировали над насыщенными парами воды при $t = 25$ °C для равномерного перераспределения влаги внутри почвенных образцов. Затем на поверхность почвы равномерно вносили 1 мл водного раствора ⁶⁵Zn(NO₃)₂. Полипропиленовые колонки с почвой закрывали крышками с обеих сторон и инкубировали до ½ года в эксикаторе над водой при $t = 25 \pm 1$ °C, еженедельно вращая колонки на 90° по горизонтальной оси. После инкубирования почвенные образцы разделяли на слои 0.5 см, последовательно выдавливая почву сверху вниз из ПП-колонок с помощью поршня, высушивали и определяли удельную активность ⁶⁵Zn γ -спектрометрическим методом (спектрометр Гамма-1П с полупроводниковым детектором из особо чистого германия с относительной эффективностью регистрации 35%).

Для описания процессов, приведших к формированию установленных вертикальных профилей ⁶⁵Zn в почвенных колонках, была использована одномерная квазидиффузионная модель, временные и пространственные характеристики которой являются решением линейного однородного дифференциального уравнения относительно функции распределения объемной активности радионуклида $A_v(x, t)$ с начальным условием в виде δ -функции Дирака $A_v(x, 0) = Q \delta(x)$. В эксперименте количество Q радионуклида вносилось в верхнюю часть колонки с сорбентом (почвой), соответствующую значению координаты $x=0$. Поскольку за все время эксперимента в профиль образца почвы мигрировала лишь незначительная часть общей внесенной активности ⁶⁵Zn, то это

привело к следующей формулировке граничного условия для вышеуказанного уравнения в виде $A_v(0, t) = Q$. Решение уравнения диффузии для указанных выше условий имеет следующий вид:

$$A_v(x, t) = Q \exp(-x^2/4D_{\text{эф}} t) \quad (1)$$

Поскольку миграции радионуклида в почвенном слое в процессе диффузии осложняется рядом факторов, обусловленных как энергетической неоднородностью основной среды распространения ионов металла – порового раствора, испытывающего сильное воздействие со стороны твердой фазы, так и гидравлическими характеристиками самого гетерогенного многофазного сорбента (почвы), зависящими от соотношения воздухозаполненных и влагозаполненных пор, учесть вклад которых весьма сложно, то широко применяется допущение, согласно которому этот процесс может быть описан как и диффузия в некоторой модельной однородной среде с использованием эффективной величины $D_{\text{эф}}$ (коэффициента эффективной диффузии ^{65}Zn), $\text{см}^2 \times \text{с}^{-1}$.

Оценка величины $D_{\text{эф}}$ проводилась методом линейного регрессионного анализа экспериментальных данных с помощью модельной функции (1). Для преобразования её в удобный для регрессионного анализа вид, была введена новая переменная r , связанная с координатой и временем $r = x^2/(4t)$. После логарифмирования (1) получаем:

$$\ln(A_v(r)) = \ln(Q) + B r, \quad (2)$$

где $B = -1/D_{\text{эф}}$. Из (2) следует, что экспериментальные значения величины $\ln(A_v(r))$ линейно зависят от r . Тангенс угла наклона регрессионной прямой равен обратному значению коэффициента квазидиффузии $D_{\text{эф}}$, а свободный член регрессии $\ln(Q)$, ордината для $r = 0$, равен значению общей активности (количеству радионуклида на единицу площади), которая формирует вертикальный профиль объемной активности ^{65}Zn колонки. Фактически, это количество радионуклида в «подвижной» форме. Важно отметить, что для оценки тангенса угла наклона $B = -1/D_{\text{эф}}$ уравнения (2), не следует использовать значение $A_v(r, t)$ самого верхнего слоя, поскольку объемная активность ^{65}Zn в нём равна средней величине от объемных активностей радионуклида в «подвижной» и «фиксированной» формах.

Растения выращивали в пластиковых вегетационных сосудах объемом 5 дм³. Перед посевом растений (9 шт./сосуд) в почву вносили Zn (в виде водного раствора нитрата) при тщательном перемешивании и разминании образующихся почвенных комочков в количестве 50 мг/кг. Общая концентрация цинка в почве при этом составила 80.7 мг/кг. Затем аналогичным образом добавляли питательные элементы в виде водных растворов солей (NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , K_2SO_4) из расчета N_{200} , P_{100} и K_{100} . После внесения растворов солей почву в сосудах инкубировали в течение 30 суток. Выбор дозы Zn обусловлен соответствием ее ранее установленной оптимальной концентрации металла в исследуемой почве [2], при которой наблюдались максимальные значения морфометрических показателей растений, урожайности, и достаточно высокие концентрации Zn в разных частях растений и квазиравновесных почвенных растворах, позволяющие надежно детектировать в них металл. Контролем служил вариант с NPK, но без растений («черный пар»).

Отдельные показатели регистрировали в динамике. Для этого из части сосудов через 7, 14, 21, 30, 45 и 70 сут. после посева снимался урожай надземной биомассы, извлекались почвенные растворы, а почва в сосудах размывалась. В корнях определялись: содержание Zn, а также масса, общая и рабочая удельные поверхности по методу И.И. Колосова [7].

Ежедневно проводился контроль массы сосудов с вегетирующими растениями и без них, долив их дистиллированной водой до влажности, соответствующей 55% ПВ. Формирующийся суточный дефицит массы почвы в последних был обусловлен физическим испарением, а различия в массе сосудов с вегетирующими растениями за

сутки, были связаны с эвапотранспирацией. Дефицит влаги в сосудах с растениями, обусловленный совместным протеканием процессов десукции и транспирации рассчитывался по разности между дефицитом влаги, обусловленным эвапотранспирацией (в вариантах с растениями) и физическим испарением (в вариантах исследуемых почв без растений). Опыты проводили в 3-кратной повторности.

Квазиравновесные почвенные растворы были получены с помощью центрифугирования в соответствии с методикой, описанной в работе [1]. Использовались центрифужные стаканы с вкладышами (куда помещалась влажная почва), изготовленные из тефлона (ПТФЭ). Вкладыши имеют перфорированное дно. Внешний вид всей конструкции приведен на рис. 1.

В извлеченных почвенных растворах определяли рН, содержание Zn, микро- и макроэлементов. Концентрацию Zn в анализируемых растворах определяли методом ICP-OES на приборе Liberty II фирмы "Varian".

Прирост надземной биомассы растений описывали с помощью логистической (S-образной) функции [3, 4]:

$$M(t) = \frac{M_{\max}}{1 + \frac{M_{\max}}{M_0} \times \exp(-\mu \times t)}, \quad (3)$$

где M_{\max} – максимальная возможная масса 1 растения, г, M_0 – начальная масса 1 растения (расчетная величина), г, μ – удельная скорость прироста биомассы растения, сут⁻¹, t – время, сут.



Рис. 1 - Внешний вид центрифужных стаканов из ПТФЭ и вкладышей с пористым дном
Fig. 1 - The appearance of the centrifuge buckets and PTFE liners with a porous bottom

Содержание Zn в растениях увеличивалось в ходе онтогенеза, приближаясь к максимальному значению $[Zn]_{\max, \text{раст}}$, характерному для каждой концентрации Zn в почве и вида растения. Подобная зависимость может быть описана уравнением:

$$[Zn]_{\text{раст}} = [Zn]_{\max, \text{раст}} \times [1 - \exp(-\beta \times t)], \quad (4)$$

где $[Zn]_{\text{раст}}$ – концентрация Zn в растении, мг/кг; β – константа накопления металла, сут⁻¹; t – время. Динамика выноса Zn с биомассой описывалась с помощью логистической функции:

$$W(t) = \frac{W_{\max}}{1 + \frac{W_{\max}}{W_0} \times \exp(-u \times t)}, \quad (5)$$

где W_{\max} – максимально возможный вынос Zn одним растением, мкг, W_0 – начальный вынос (расчетная величина), u – константа выноса Zn с биомассой, сут⁻¹, t – время, сут.

Значения параметров уравнений (3), (4) и (5): M_{\max} , M_0 , W_{\max} , W_0 , u , μ , $[Zn]_{\max, \text{раст}}$ и β подбирали с использованием модуля «Поиск решения» программы Excel. При этом применялся алгоритм последовательных итераций, использующий минимизацию ошибки $E = \sum [K_c(\text{расч}) - K_c(\text{измерен})]^2$.

Результаты и обсуждение

Для определения величины эффективного коэффициента квазидиффузии $D_{\text{эф}}$ цинка на основании данных по вертикальному распределению в почвенных колонках радиоактивной метки - ^{65}Zn (рис. 2 а), применялся, как уже упоминалось ранее, метод линейной интерполяции с помощью регрессионного уравнения (2). Визуализация данной процедуры для исследуемой почвы представлена на рис. 2 б.

На основе данных регрессии в переменных $r(x^2/(4t)) - \ln(A_v, \text{Бк/см}^3)$ для 2-х повторностей опыта определены $D_{\text{эф}}$ ^{65}Zn равные $3,93 \times 10^{-8}$ и $2,53 \times 10^{-8} \text{ см}^2 \times \text{с}^{-1}$ [$\bar{X} \pm s = (3,23 \pm 0,99) \times 10^{-8} \text{ см}^2 \times \text{с}^{-1}$]. Как уже отмечалось ранее, свободный член регрессионных прямых ($\ln Q$) (рис. 2 б) позволяет: оценить количество радионуклида в «подвижной» форме, принимающего участие в процессе вертикальной миграции и его долю от общего количества ^{65}Zn , поступившего в почву. Соответствующие значения $R^{65}\text{Zn}$ ($\text{Ratio of } [^{65}\text{Zn}]_{\text{подв.}} / [^{65}\text{Zn}]_{\text{общ.}}$) равнялось $45,5 \pm 17,5\%$. Высокая ошибка значения данного показателя обусловлена, во-первых, косвенным расчетным методом его определения и малым количеством повторностей.

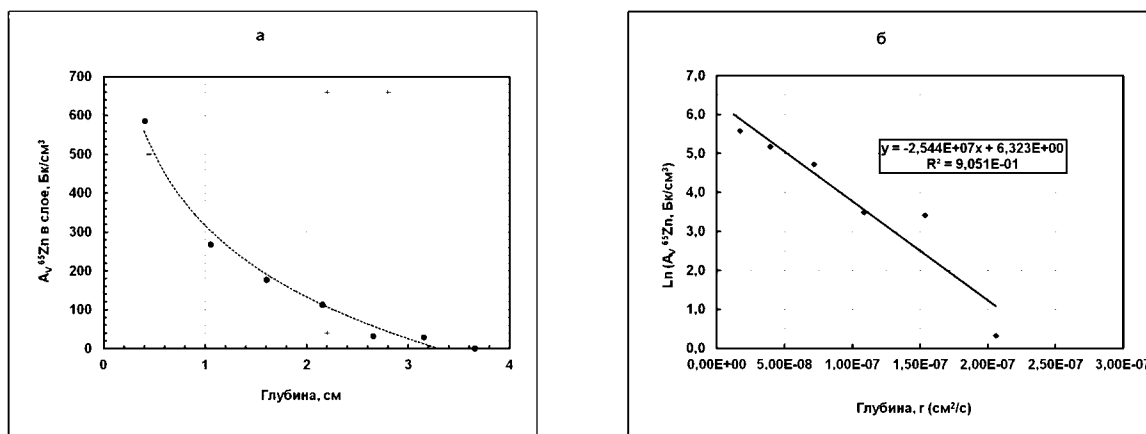


Рис. 2 - Распределение объемной активности (Бк/см³) ^{65}Zn по слоям дерново-подзолистой супесчаной почвы (П^д), (а); линейное преобразование распределения объемной активности радионуклида по слоям почв в соответствии с формулой (2), (б)

Fig. 2 - Distribution of volume activity (Bq/cm³) ^{65}Zn on layers of soddy-podzolic sandy loam soil, (a); a linear transformation of the distribution of volume activity of the radionuclide in the soil layers in accordance with the formula (2), (b)

Полагаем, что ^{65}Zn , находящийся в «фиксированной» форме является неподвижным и поэтому не представляет интереса с точки зрения сравнительно быстро протекающих процессов биогеохимической миграции элементов в системе «почва – почвенный раствор – растение», равных времени жизни растений.

В течение вегетационного периода из почвенных сосудов сразу после уборки растений на 7-е, 14, 21, 30, 45 и 70-е сутки эксперимента извлекали квазиравновесные почвенные растворы методом центрифугирования. Динамика концентрации в них Zn представлена на рис. 3. Установлено, что уменьшение концентрации Zn в почвенном растворе в зависимости от времени можно удовлетворительно описать экспоненциальным уравнением: $[Zn]_{\text{почв.р-р}} = 10,424 \exp(-0,0495 \times t)$, $R^2 = 0,91$. Это связано

как с истощением запаса подвижных форм Zn в почве в результате непрерывного поглощения корнями растений, не компенсируемого десорбцией Zn из ППК в почвенный раствор, так и с процессами трансформации подвижных (доступных растениям) форм нахождения металла в малоподвижные («фиксации» Zn).

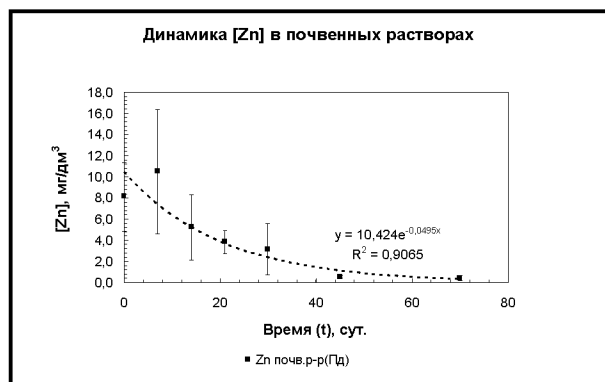


Рис. 3 - Динамика [Zn] в квазиравновесном почвенном растворе, извлеченном из дерново-подзолистой супесчаной почвы
Fig. 3 - Dynamics of [Zn] in a quasi-equilibrium soil solution extracted from soddy-podzolic sandy loam soil

Данные по приросту надземной массы и корней бобов аппроксимировали с помощью уравнения логистической кривой. Значения параметров логистической кривой M_{\max} (г) M_0 (г), μ

(сут⁻¹) для дерново-подзолистой почвы при оптимальном (для роста и развития растений) содержании в ней Zn составили для вегетативной массы, соответственно, 24,50; 1,20 и 0,075, а для корней – 7,26; 0,61 и 0,051.

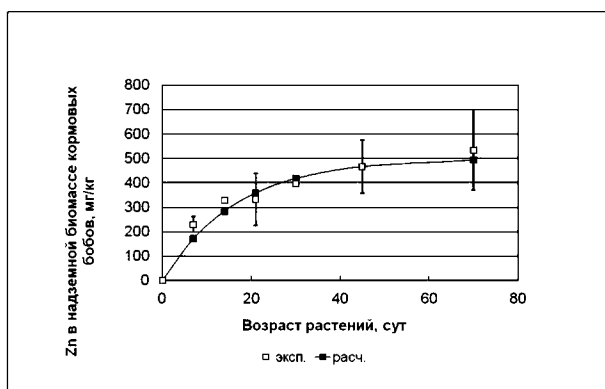


Рис. 4 - Динамика накопления Zn в кормовых бобах, мг/кг (в пересчете на сухую массу), до фазы созревания, выращенных на дерново-подзолистой супесчаной почве
Fig. 4 - Dynamics of accumulation of Zn in broad beans, mg/kg (in terms of dry weight), to the maturation phase, grown on soddy-podzolic sandy loam soil

Полученные данные по динамике накопления (концентрации) Zn в надземных частях кормовых бобов,

показывают, что зависимость изменения концентраций Zn в вегетативных органах кормовых бобов (мг/кг сухой массы) от времени носят асимптотический характер, приближаясь к максимальному значению $[Zn]_{\max, \text{раст}}$ (рис. 4). Значения параметров $[Zn]_{\max, \text{раст}}$ (мг/кг) и β (сут⁻¹), рассчитанные для дерново-подзолистой почвы с оптимальным содержанием в ней Zn, составили: 500 и 0,060. Постоянная времени β характеризует скорость изменения концентрации Zn в биомассе бобов. Данные по динамике накопления (концентрации) Zn в корнях кормовых бобов показывают, что четкой зависимости изменения концентраций в них Zn от времени не наблюдалось. Зависимость $[Zn]_{\text{корни}} = f(t)$ удалось удовлетворительно описать с помощью уравнения полинома 2-й степени: $[Zn]_{\text{раст}} = -0,57 \times t^2 + 47,67 \times t + 213,7$ ($R^2 = 0,74$).

Динамика выноса Zn и корнями в пересчете на 1 растение удовлетворительно описывалась логистическими кривыми с параметрами W_{\max} W_0 , u , значения которых составляли соответственно: 1100 мкг, 3,1 мкг и 0,181 сут⁻¹ для надземной биомассы; 434 мкг, 26,1 мкг и 0,11 сут⁻¹ – для корней.

В ходе модельного вегетационного опыта с помощью уравнения:

$$T(t) = \frac{T_{\max}}{1 + \frac{T_{\max}}{T_0} \times \exp(-\gamma \times t)}, \quad (6)$$

где T_{\max} – максимально возможная транспирация влаги одним растением, мл $H_2O/(1 \text{ раст.} \times \text{сут})$, T_0 – начальная транспирация (расчетная величина), мл $H_2O/(1 \text{ раст.} \times \text{сут})$, γ – константа транспирации H_2O надземной биомассой растений, сут^{-1} , t – время, сут., была оценена скорость транспирации влаги кормовыми бобами (рис. 5). Значения параметров T_{\max} , T_0 , $\gamma \text{ сут}^{-1}$, соответствующих логистических кривых для дерново-подзолистой почвы были равны: 24,1; 0,53 мл $H_2O/(1 \text{ раст.} \times \text{сут})$ и $0,150 \text{ сут}^{-1}$.

Данные по динамике общей ($S_{\text{уд.общ.}}$) и рабочей ($S_{\text{уд.раб.}}$) удельной поверхности корней кормовых бобов не удалось описать с помощью аппроксимирующих уравнений. Поэтому были приняты средние значения за период вегетации: $S_{\text{уд.общ.}} = 0,74 \pm 0,48 \text{ м}^2/\text{г}$ и $S_{\text{уд.раб.}} = 0,32 \pm 0,20 \text{ м}^2/\text{г}$.

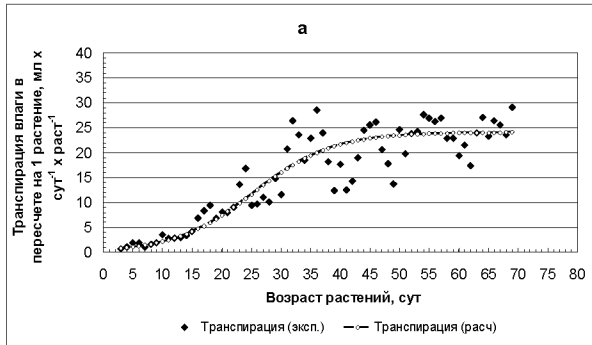


Рис. 5 - Динамика транспирации влаги надземными частями кормовых бобов выращенных на дерново-подзолистой супесчаной почве до фазы созревания: в пересчете на 1 растение, $\text{мл} \times \text{раст}^{-1} \times \text{сут}^{-1}$
Fig. 5 - Dynamics of moisture transpiration by above-ground parts of broad beans grown on soddy-podzolic sandy loam soil to the maturation phase: in terms of 1 plant, $\text{ml} \times \text{plant}^{-1} \times \text{day}^{-1}$

Определить тренд изменения значений транслокационных отношений $TO = [Zn]_{\text{надз.ч.}} / [Zn]_{\text{корни}}$ в течение периода вегетации растений не удалось. Усредненное значение TO равнялось $0,43 \pm 0,13$.

Скорость поступления влаги в растения $v(H_2O)$, обусловленная взаимосвязанными процессами десукции и транспирации изменялась в течение вегетационного периода (рис. 6а). Предполагалось, что: а) в процессе переноса влаги в корни растений задействована только рабочая поглощающая поверхность корней ($S_{\text{раб.}}$); б) массоперенос влаги в растения в результате процесса десукции равен массопереносу влаги из растения в результате транспирации. Полученные значения $v(H_2O)$ варьировали в диапазоне $(3,3 \div 29,2) \times 10^{-3}$ мкл $H_2O/(\text{см}^2 \times \text{с})$. Среднее значение $v(H_2O)$ составило за вегетационный период $19,3 \times 10^{-3}$ мкл $H_2O/(\text{см}^2 \times \text{с})$, (рис. 6а).

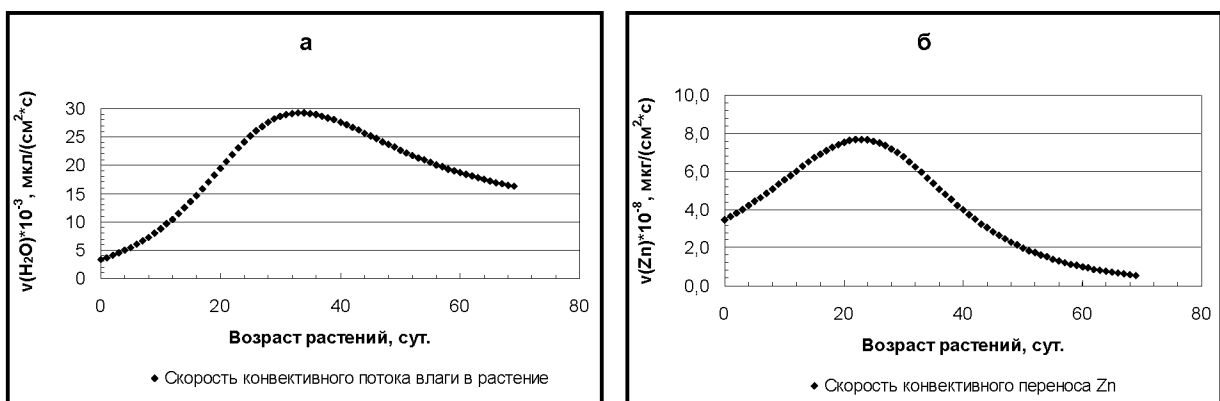


Рис. 6 - Динамика: а) скорости конвективного потока влаги $v(H_2O)$, $\text{мкл}/(\text{см}^2 \times \text{с})$ в корни кормовых бобов; б) скорости массового переноса цинка $v(Zn)$, $\text{мкг}/(\text{см}^2 \times \text{с})$ с конвективным потоком влаги
Fig. 6 - Dynamics: a) the rate of convective flow of moisture $v(H_2O)$, $\mu\text{l}/(\text{cm}^2 \times \text{sec})$ in the roots of forage beans; b) the rate of mass transfer of zinc $v(Zn)$, $\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \times \text{sec})$ with a convective flow of moisture

Учитывая, что массовый поток (массоперенос) ионов Zn к поверхности корней с конвективным потоком влаги обеспечивается не всей, а только рабочей поверхностью корня, на основании представленных данных по динамике $[Zn]$ в квазиравновесном

почвенном растворе, массы и рабочей поверхности корней, а также количеству влаги, транспирируемой одним растением, можно рассчитать важную в практическом плане величину – массоперенос цинка к поверхности корней кормовых бобов (причем, в динамике). Рассчитанные значения скорости массопереноса цинка к поверхности корней кормовых бобов в динамике приведены на рис. 6б. Скорость массопереноса Zn к поверхности корней оказалась не постоянной. Она изменялась в течение вегетационного периода в диапазоне $(0,56 \div 7,68) \times 10^{-8}$ мкг Zn/(см²×с). Среднее значение $v(\text{Zn})$ для исследуемой дерново-подзолистой почвы в течение вегетационного периода было равно $4,16 \times 10^{-8}$ мкг Zn/(см²×с).

Используя установленные в настоящей работе параметры, можно рассчитать, например, с помощью конвективно-диффузионной модели корневого поглощения микроколичеств элементов Прохорова-Фрида [6, 8] скорость поглощения Zn единицей рабочей поверхности корня – j , мкг Zn/(см²×с):

$$j = \frac{aV}{2} \left[\frac{2k-V}{V} e^{\frac{(k-V)^2 kt}{D_{\text{эф}}}} \operatorname{erfc} \left(\frac{2k-V}{2} \sqrt{\frac{t}{D_{\text{эф}}}} \right) + 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{V}{2} \sqrt{\frac{t}{D_{\text{эф}}}} \right) \right], \quad (7)$$

где a – концентрация Zn в почве вдали от поверхности корня, V – скорость массопереноса металла с конвективным потоком влаги в почве, возникающем в результате десукции, $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии вещества в среде, t – время от начала поглощения, k – коэффициент корневого поглощения, зависящий от вида растения и его состояния. Согласно авторам предложенной модели [6, 8], в начальный момент времени ($t = 0$), скорость поглощения микроэлемента равна:

$$j_0 = a \times k. \quad (8)$$

Из последнего уравнения следует, что k является коэффициентом пропорциональности между скоростью поглощения микроэлемента в начале роста растения и содержанием его в почве. Т.е., параметр k представляет собой ни что иное, как коэффициент накопления металла растением ($K_{\text{н}}$) в начальный период времени. Применительно к необходимым растениям микроэлементам (включая Zn) его можно вычислить, например, из уравнения Михаэлиса-Ментен путем проведения специальных опытов по изучению кинетики быстрого поглощения ионов микроэлементов интактными корнями растений [12, 15]:

$$j = j_{\text{max}} \times a / (K_m + a) = k \times a, \quad (9)$$

где j_{max} – максимальная скорость поглощения микроэлемента корнями, K_m – константа Михаэлиса, характеризующая уровень реализации механизмов активного трансмембранного переноса микроэлементов.

В данной работе, однако, не ставилась задача количественной оценки корневого поглощения Zn тест-растениями с помощью конвективно-диффузионной модели (7). Задача была более узкой – практически оценить вклад массопереноса Zn в растения с конвективным потоком влаги. Для этого, исходя из полученных параметров процесса конвективного потока влаги в корни растений из почвы и значений концентрации Zn в почвенном растворе, был рассчитан общий вынос бобами металла из дерново-подзолистой почвы в динамике. Полученная зависимость представлена на рис. 7. Сопоставление этих результатов с фактически установленными в результате проведенных экспериментов значениями выноса Zn надземными частями и корнями растений (5), позволяет сделать вывод, что практически весь Zn, поглощаемый растениями, поступает через корневую систему в результате процессов массопереноса с конвективным потоком влаги. Незначительное занижение экспериментальных данных по сравнению с расчетными может быть связано с потерей металла при многоступенчатой процедуре размывания водой почвы в сосудах и последующей отмывки корней от почвенных частиц.

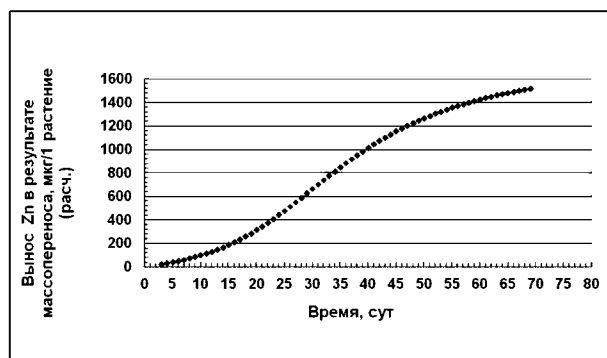


Рис. 7 - Динамика общего выноса Zn (корнями и надземными частями) кормовых бобов в результате массопереноса с конвективным потоком влаги при транспирации (расч.)
 Fig. 7 – Dynamics of total removal of Zn (roots +aboveground parts) of broad beans as a result of mass transfer with a convective flow of moisture during transpiration (calculations)

По-видимому, в условиях отсутствия дефицита металла в почве диффузионный механизм поступления Zn в корни растений играет незначительную роль. Объясняя данное явление, авторы исследования [10] совершенно справедливо утверждают, что потребность в любом питательном элементе, не обеспеченная перехватом корнями и массовым потоком, удовлетворяется за счет диффузии. Это утверждение, фактически, означает, что диффузионный механизм поступления катионов питательных элементов (включая микроэлементы) в условиях отсутствия дефицита питательного элемента, малозначим.

Заключение

В ходе вегетационных опытов с кормовыми бобами на дерново-подзолистой супесчаной почве с внесенным Zn было установлено, что концентрации металла в почвенном растворе со временем уменьшается экспоненциально.

На основании данных по вертикальному распределению в почвенных колонках радиоактивной метки - ^{65}Zn рассчитана величина эффективного коэффициента квазидиффузии цинка $D_{эф}$: $(3,23 \pm 0,99) \times 10^{-8} \text{ см}^2 \times \text{с}^{-1}$. Оценена доля ^{65}Zn в «подвижной» форме, принимающего участие в процессе вертикальной миграции, от общего количества ^{65}Zn , поступившего в почву: $[\text{Zn}]_{\text{подв.}} / [\text{Zn}]_{\text{общ.}} = 45,5 \pm 17,5\%$. Полученные данные по динамике прироста надземной биомассы и корней кормовых бобов вплоть до фазы созревания и выноса Zn разными частями исследуемых растений описывается логистической функцией с 3-мя параметрами. Установлено, что зависимость изменения концентраций Zn в вегетативных органах кормовых бобов от времени имеет асимптотический характер с $[\text{Zn}]_{i, \text{max, раст}} = 500 \text{ мг/кг}$, $\beta = 0,060 \text{ сут}^{-1}$. $[\text{Zn}]_{\text{корни}}$ оставалась постоянной, незначительно варьируя в течение эксперимента в пределах $900 \div 1000 \text{ мг/кг}$ сухой массы. Рассчитанные на основании экспериментальных данных, значения скорости поступления влаги, $v(\text{H}_2\text{O})$ в корни бобов составили $(3,3 \div 29,2) \times 10^{-3} \text{ мкл H}_2\text{O}/(\text{см}^2 \times \text{с})$. Среднее значение $v(\text{H}_2\text{O})$ за вегетационный период равнялось $19,3 \times 10^{-3} \text{ мкл H}_2\text{O}/(\text{см}^2 \times \text{с})$. Скорость массопереноса Zn к поверхности корней также изменялась в течение вегетационного периода в диапазоне $(0,56 \div 7,68) \times 10^{-8} \text{ мкг Zn}/(\text{см}^2 \times \text{с})$. Среднее значение $v(\text{Zn})$ для исследуемой дерново-подзолистой почвы было равно $4,16 \times 10^{-8} \text{ мкг Zn}/(\text{см}^2 \times \text{с})$.

Сопоставление фактически установленных значений выноса Zn надземными частями и корнями растений со значениями, рассчитанными на основании балансового подхода с учетом потоков влаги и ионов металла через поверхность корней, позволило сделать вывод о том, что практически весь Zn, поглощаемый растениями, поступает через корневую систему в результате процессов массопереноса с конвективным потоком влаги. По-видимому, в условиях отсутствия дефицита металла в почве диффузионный механизм поступления Zn в корни растений играет второстепенную роль.

Благодарности

Авторы приносят глубокую признательность за помощь в цифровой обработке материала сотруднику лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения ФГБНУ ВНИИРАЭ, старшему научному сотруднику Иванову Валерию Ивановичу

Работа выполнена в рамках Госзадания № **0627-2019-0002** «Исследовать закономерности миграции радионуклидов (РН) и тяжелых металлов (ТМ) в агроландшафтах. Разработать научно-методологические и методические подходы для оценки последствий техногенного загрязнения агроландшафтов с использованием экспериментальных данных и баз данных по параметрам миграции РН и ТМ в разных почвенно-климатических зонах»

Acknowledgements

The authors express their deep gratitude to **Ivanov Valery**, the scientific worker of RIRAE mathematical modeling laboratory for the help in the experimental data digital processing

The work is done in the framework of the state assignment No **0627-2019-0002** “To investigate patterns of migration of radionuclides (RN) and heavy metals (HM) in agricultural landscapes. To develop scientific, methodological and methodical approaches to assess the effects of anthropogenic pollution of agricultural landscapes using experimental data and databases on the parameters of migration of RN and HM in different soil and climatic zones”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Корнеев Ю.Н., Фригидов Р.А., Санжаров А.И., Дикарев Д.В., Кочетков И.В.* Исследование миграционной способности Zn в системе дерново-подзолистая почва – кормовые бобы в условиях вегетационного опыта // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 72-84
2. *Анисимов В.С., Санжарова Н.И., Анисимова Л.Н., Гераськин С.А. Дикарев Д.В., Фригидова Л.М., Фригидов Р.А., Белова Н.В.* Оценка миграционной способности и фитотоксичности Zn в системе почва-растение // *Агрохимия*. 2013. № 1. С.64-74.
3. *Витковская С.Е., Дричко В.Ф., Хофман О.В.* Оценка скорости нарастания биомассы сельскохозяйственных культур // *Доклады РАСХН*. 2014. №1. С. 50-53.
4. *Дричко В.Ф., Изосимова А.А.* Влияние возрастающих доз извести на урожай и скорость роста растений рапса и овса // *Агрохимия*. 2005, № 8. С. 19-23.
5. *Журбицкий З.И.* Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 264 с.
6. *Прохоров В.М.* Математическая модель поглощения элементами растениями из почвы // *Агрохимия*, 1970. № 7. С. 126-136
7. *Третьяков Н.Н.* Практикум по физиологии растений. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
8. *Фрид А.С.* Математическая модель как метод изучения корневого поглощения веществ растениями // *Агрохимия*, 1974. № 3. С. 122-131
9. *Baker A.J.M.* Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals // *J. Plant Nutr.* 1981. V. 3. P. 643-654. <http://dx.doi.org/10.1080/01904168109362867>

10. *Barber S.A.* Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach (second edition). New York: John Wiley & Sons, 1995. 384 p.
11. *Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants. CRC Press. London. 2011. 505 p.
12. *Lasat M.M., Baker A.J.M. and Kochian L.V.* Physiological characterization of root Zn^{2+} absorption and translocation to shoots in Zn hyperaccumulator and nonaccumulator species of *Thlaspi*. // *Plant Physiol.* 1996. V. 112. P. 1715–1722. doi: <https://doi.org/10.1104/pp.112.4.1715>
13. *Pandey R.* Mineral Nutrition of Plants. In: B. Bahadur et al. (eds.), *Plant Biology and Biotechnology: Volume I: Plant Diversity, Organization, Function and Improvement*, Springer India 2015. P. 499-538. doi: 10.1007/978-81-322-2286-6_20
14. *Santa Maria G.E., Cogliatti D.H.* Bidirectional Zn-fluxes and compartmentation in wheat seedling roots // *J. Plant Physiol.* 1988. V. 132. P. 312-315. doi.org/10.1016/S0176-1617(88)80112-3
15. *Veltrup W.* Characteristics of zinc uptake by barley roots // *Physiol. Plant.* 1978. V. 42. P. 190-194. doi.org/10.1111/j.1399-3054.1978.tb02546.x

REFERENCES

1. *Anisimov V. S., Anisimova L. N., Frigidova L. M., Korneev Yu. N., Frigidov R. A., Sanzharov A. I., Dikarev D. V., Kochetkov I. V.* The study of Zn migration ability in the system soddy-podzolic soil - broad beans in the conditions of pot experiment. *Agrochemistry.* 2019. 3: 72-84 [in Russian]
2. *Anisimov V. S., Sanzharova N. I. Anisimova L. N., Geras'kin S. A., Dikarev D. V., Frigidova L. M., Frigidov R. A., Belova N. V.* The assessment of the migration ability and phytotoxicity of Zn in the system soil-plant. *Agrochemistry.* 2013. 1: 64 – 74 [in Russian]
3. *Vitkovskaya S. E., Drichko V. F., Hoffman O. V.* Estimation of the rate of increase of agricultural crops biomass. *Reports of RAAS.* 2014. 1: 50-53 [in Russian].
4. *Drichko V. F., Izosimova A. A.* Effect of increasing doses of lime on yield and growth rate of rapeseed and oats. *Agrochemistry.* 2005. 8: 19-23 [in Russian]
5. *Zhurbitsky Z. I.* *Theory and practice of vegetation method.* Moscow: Science, 1968. 264 p. [in Russian]
6. *Prokhorov V. M.* Mathematical model of absorption of elements by plants from soil. *Agrochemistry.* 1970. 7: 126 – 136 [in Russian]
7. *Tretyakov N. N.* *Workshop on plant physiology.* Moscow: Agropromizdat, 1990. 271 p.
8. *Frid A. S.* Mathematical model as a method of studying root uptake of substances by plants. *Agrochemistry.* 1974. 3: 122 – 131 [in Russian]
9. *Baker A.J.M.* Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant Nutr.* 1981. 3: 643-654. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01904168109362867>
10. *Barber S.A.* Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach (Second Edition). New York: John Wiley & Sons, 1995. 384 p.
11. *Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants. London; CRC Press, 2011. 505 p.
12. *Lasat M.M., Baker A.J.M. and Kochian L.V.* Physiological characterization of root Zn^{2+} absorption and translocation to shoots in Zn hyperaccumulator and nonaccumulator species of *Thlaspi*. *Plant Physiol.* 1996. 112: 1715–1722. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.112.4.1715>

13. Pandey R. Mineral Nutrition of Plants. In: B. Bahadur et al. (eds.), *Plant Biology and Biotechnology: Volume I: Plant Diversity, Organization, Function and Improvement*, Springer India 2015. P. 499-538. DOI: 10.1007/978-81-322-2286-6_20

14. Santa Maria G.E., Cogliatti D.H. Bidirectional Zn-fluxes and compartmentation in wheat seedling roots. *J. Plant Physiol.* 1988. 132: 312-315. doi.org/10.1016/S0176-1617(88)80112-3

15. Veltrup W. Characteristics of zinc uptake by barley roots. *Physiol. Plant.* 1978. 42(2): 190-194. doi.org/10.1111/j.1399-3054.1978.tb02546.x

Anisimov V.S., Anisimova L.N., Frigidova L.M., Korneev Yu.N., Frigidov R.A., Sanzharov A.I., Dikarev D.V., Kochetkov I.V. The study of the dynamics, mobility and bioavailability of zink, deposited as a trace element in the system “soil – soil solution – crop plants” // Works of the State Nikit. Botan. Gard. – 2019. – Vol. 148. – P. 22-33.

Abstract. *The aim* of the work was to assess the parameters of effective diffusion and convective transport (mass transfer) of zinc ions in the roots of broad beans (*Vicia faba* L.) varieties ‘Yantarnye’, as well as to study the dynamics of the processes of biomass growth of plants, changes in the concentration of Zn in the aboveground parts and roots, removal of the metal with biomass. **Methods.** The properties of the investigated soddy-podzolic sandy loam soil with the help of conventional methods are determined, model experiments on the study of diffusion of Zn, as well as water-balance vegetation experiments with broad beans are carried out. During the growing season, quasi-equilibrium soil solutions were extracted by centrifugation. **Results.** Data on the dynamics of Zn concentration in aboveground parts and roots of broad beans and metal removal with aboveground biomass were obtained. Quantitative parameters and formal dependences of the process of root uptake of Zn by plants on time are determined. Their interrelation with dynamics of the content of water-soluble forms of Zn easily accessible to plants in soils is established. The values of migration indicators - the rate of moisture uptake $v(H_2O)$, the effective diffusion coefficient of zinc (D_{et}), the rate of mass flow (transfer) of dissolved zinc ions ($v(Zn)$) into the roots of plants with a convective flow of moisture depending on the age of broad beans, were determined. **Conclusion.** It was found that almost all Zn absorbed by plants enters through the root system as a result of mass transfer processes with a convective flow of moisture (diffusion mechanism of Zn entering the roots of plants plays a secondary role). The obtained parameters can be used to model the processes of root uptake of HM by plants.

Keywords: broad beans; zinc; above-ground biomass; roots; specific surface area; concentration; removal with crop; transpiration; effective diffusion; convective flow; mass transfer