

УДК 546.47:631.445.24:633.353:631.421

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ Zn В СИСТЕМЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТАЯ ПОЧВА–КОРМОВЫЕ БОБЫ В УСЛОВИЯХ ВЕГЕТАЦИОННОГО ОПЫТА

© 2019 г. В. С. Анисимов^{1,*}, Л. Н. Анисимова¹, Л. М. Фригидова¹,
Ю. Н. Корнеев¹, Р. А. Фригидов¹, А. И. Санжаров¹, Д. В. Дикарев¹, И. В. Кочетков¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
249030 Калужская обл., Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Россия*

**E-mail: vsanisimov@list.ru*

Поступила в редакцию 08.11.2017 г.

После доработки 15.08.2018 г.

Принята к публикации 10.12.2018 г.

В вегетационном опыте получены экспериментальные данные о динамике накопления Zn в надземных частях и корнях кормовых бобов и выноса металла 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. Предложены показатели – скорость поступления влаги (v_{H_2O}) и скорость массового потока (переноса) растворенных в воде ионов цинка (v_{Zn}) в корни растений с конвективным потоком влаги в зависимости от возраста кормовых бобов, которые можно использовать для моделирования процессов корневого поглощения тяжелых металлов растениями.

Ключевые слова: миграционная способность, цинк, система дерново-подзолистая почва–кормовые бобы, вегетационный опыт.

DOI: 10.1134/S0002188119030037

ВВЕДЕНИЕ

Из широкого спектра поллютантов Zn заслуживает особого внимания, т.к. относится к веществам 1-го класса опасности [1]. Соединения этого металла являются одними из наиболее распространенных веществ, загрязняющих окружающую среду. Повышенные концентрации Zn в почвах сельскохозяйственных угодий могут формироваться в зонах воздействия промышленных предприятий и транспортных магистралей [2–4]. Zn также является необходимым для растений микроэлементом, поскольку принимает участие в углеводном и белковом обмене, окислительных процессах, оказывает влияние на формирование генеративных органов. При дефиците Zn нарушается фосфорный обмен, прекращается образование семян, отмечено недостаточное развитие листьев, возникает хлороз. Zn влияет на проницаемость мембран, стабилизирует клеточные компоненты [5, 6]. Являясь жизненно важным элементом в малых количествах, при накоплении в высоких концентрациях Zn может оказывать токсическое действие на организм [2, 7].

Содержание Zn в поверхностном горизонте почв мира изменяется в пределах 17–150 мг/кг [2]. Нормальное среднее содержание Zn в почвах России варьирует от 20 до 90 мг/кг [8] и зависит от гранулометрического состава последних (в почвах легкого гранулометрического состава оно меньше, чем в тяжелых). Подвижность металла в почвах сильно зависит от кислотности [2, 9, 10]. Zn является одним из наиболее биологически доступных элементов: содержание подвижной фракции в почве, экстрагируемой разбавленными минеральными кислотами, может достигать 20–60%.

Среднее содержание Zn в сухой биомассе растений составляет в среднем 0.3 мкмоль/г (20 ppm) [6]. В целом Zn распределяется между различными органами растений следующим образом: корни > листья > стебли > ствол (стебель) [2]. Однако при дефиците металла в субстрате можно наблюдать и обратную закономерность [11].

В многочисленных работах отмечено, что поглощение Zn корнями растений может быть как активным процессом, так и пассивным в зависимости от его концентрации в субстрате [2, 12]. Поскольку Zn является необходимым для питания

растений микроэлементом, уровень его фитотоксичных концентраций в тканях растений достаточно высок – 100–500 мг/кг [2, 13]. Большинство высших растений (включая все сельскохозяйственные культуры) проявляет высокую толерантность к Zn в широком диапазоне его повышенных концентраций в почвах. Толерантность при этом обусловлена функционированием различных механизмов, определяющих барьерный (исключительный) или безбарьерный (аккумулятивный) типы поглощения элемента [14–18]. Поскольку Zn является необходимым микроэлементом, то растения при дефиците его содержания в почве поглощают Zn по безбарьерному типу: транслокационное отношение Zn (TO_{Zn}) = $([Zn]_{\text{надз. биом}} : [Zn]_{\text{корни}}) \geq 1$, коэффициент накопления Zn ($KH_{Zn \text{ надз. биом}} = ([Zn]_{\text{надз. биом}} : [Zn]_{\text{почва}}) \neq \text{const}$). С увеличением концентрации металла в почве модель поведения (или ответная реакция) растений изменяется. Вместо безбарьерного типа отмечены последовательно следующие типы поведения: барьерный индикативный ($TO_{Zn} \leq 1$, $KH_{Zn \text{ надз. биом}} \approx \text{const}$), собственно барьерный (исключительный) ($TO_{Zn} \ll 1$, $KH_{Zn \text{ надз. биом}} \neq \text{const}$) и безбарьерный нерегулируемый, сопровождающийся гибелью растений [17, 18]. Последний тип ответной реакции растений авторы настоящей статьи отмечали не всегда (в частности, он не зафиксирован в опытах с водными культурами сельскохозяйственных растений при фитотоксичных концентрациях Zn в питательных растворах) [19].

Необходимо отметить, что поскольку до сих пор механизмы процессов поглощения и транслокации растениями тяжелых металлов (ТМ), включая Zn, установлены не полностью, требуется проведение дальнейших исследований по изучению закономерностей сложного процесса корневого поглощения ТМ. В частности, целесообразно изучение как динамики накопления металлов растениями в течение периода вегетации, так и быстрого поглощения их корнями (в течение нескольких минут). Использование перечисленных методов позволяет оценить скорость поступления ТМ в разные органы растений, сделать прогноз их накопления в хозяйственно-ценных частях растений и оценить роль процессов активного и пассивного поглощения ТМ корнями. Исследования динамики поглощения Zn ячменем (*Hordeum vulgare* L.) и пшеницей (*Triticum aestivum* L.) показали [20, 21], что первоначально высокая скорость поглощения металла корнями постепенно снижается и принимает некоторую постоянную величину (линейная фаза

аккумуляции металла). Исследования поглощения $^{65}\text{Zn}^{2+}$ растением-гипераккумулятором цинка *Noccaea* (ранее *Thlaspi*) *caerulescens* в динамике показали, что зависимости концентрации Zn в растениях от времени имеют вид аккумулятивных кривых без предела насыщения. При этом величины максимальной скорости потока Zn в клетки корней гипераккумулялирующих растений вида *N. caerulescens* были в 4.5 раза больше, чем у негипераккумулялирующих растений вида *Thlaspi arvense* [22]. Аналогичную закономерность наблюдали при сравнении моделей поглощения Zn гипер- и негипераккумулялирующими металл экотипами растений очитка Ханса (*Sedum alfredii* Hance): концентрация Zn в побегах гипераккумулялирующего экотипа более чем в 20 раз превышала соответствующий показатель негипераккумулялирующего экотипа [23, 24]. Результаты исследования кинетики быстрого корневого поглощения Zn растениями *S. alfredii* показали, что максимальная величина скорости поступления металла в корни растений, относящихся к гипераккумулялирующему экотипу, была в 3.5 раза больше, чем в растениях, относящихся к негипераккумулялирующему экотипу, что предполагало более высокую плотность белков-переносчиков металла в плазматических мембранах поглощающих клеток корней [25]. Приведенные выше примеры показали, что выявление растений-гипераккумуляторов и особенно наличие гипераккумулялирующих и негипераккумулялирующих экотипов растений одного вида (или близкородственных растений, способных к скрещиванию) является мощным инструментом в раскрытии механизмов корневого поглощения, транслокации и детоксикации ТМ в растениях.

Кроме того, особый интерес к растениям, поглощающим ТМ (включая Zn) по безбарьерному типу (т.е. растений-гипераккумуляторов), в последние годы обусловлен бурным развитием технологий фиторемедиации загрязненных ТМ территорий. На сегодняшний день известно о более чем 450 видах растений-гипераккумуляторов ТМ, принадлежащих к 45 семействам [26, 27]. Большинство из них являются гипераккумуляторами Ni и лишь 15 видов растений из 6-ти семейств относятся к гипераккумуляторам Zn, способным накапливать этот элемент в надземной фитомассе в концентрациях, превышающих 10 000 мг/кг (в пересчете на сухую массу) [16, 28, 29]. Среди таких растений наибольшую известность приобрели *Noccaea* (ранее *Thlaspi*) *caerulescens* (ярутка сизоватая), *Arabidopsis halleri* (резуховидка Галлера), *Sedum alfredii* Hance (очиток Ханса). Они способны накапливать в тканях до 40000 мг Zn/кг сухой

массы [2, 13, 23, 24, 30–32]. Однако большинство из них растет медленно и производит небольшое количество биомассы ежегодно. Поэтому современные технологии фиторемедиации включают в себя внесение в почву низкомолекулярных биodeградируемых веществ-комплексобразователей, инокуляцию семян растений, используемых для фитоэкстракции ТМ, ризобактериями (например, *Pseudomonas putida*), повышающими доступность растениям ТМ техногенного происхождения, а также использование трансгенных растений, обладающих большой биомассой и приобретенной способностью к гипераккумуляции ТМ [33]. В качестве таких растений можно использовать, например, подсолнечник, райграс, вейник, кукурузу, кормовые бобы и др.

В целом в системе почва–растение фитотоксичность Zn контролируется не только способностью растений ограничивать поступление ТМ, но и эдафическими свойствами почв (величиной рН, емкостью катионного обмена, содержанием органического вещества и др.). В значительной степени устойчивость сельскохозяйственных культур к Zn определяется их видовыми особенностями.

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. В качестве тест-культуры были выбраны кормовые бобы, являющиеся высокопродуктивной продовольственной и фуражной культурой, широко распространенной в мире. Бобы являются удобным объектом в качестве тест-культуры, поскольку характеризуются высокими уровнями накопления ряда ТМ (включая Zn), быстрым приростом биомассы надземных органов и корней.

Цель работы – изучение в динамике процессов прироста биомассы кормовых бобов, изменения концентрации Zn в надземных органах и корнях растений, выноса металла надземной биомассой в условиях оптимального (для развития растений) содержания его в почве, а также оценка параметров процесса конвективного переноса (массопереноса) ионов цинка в корни растений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Поведение Zn в системе почва–растение изучали в вегетационных опытах в контролируемых условиях в весенне-летний период 2016 г. Сред-

несуточная температура в теплице в ходе эксперимента составляла $21.8 \pm 2.5^\circ\text{C}$, среднесуточная относительная влажность – $53.7 \pm 10.2\%$, влажность почвы – 55% ПВ. Объектом исследования служили кормовые бобы (*Vicia faba* L.) сорта Янтарные (лабораторная всхожесть семян – 90%, сила роста – 77%), выращиваемые на дерново-подзолистой супесчаной окультуренной почве (П^Д), отобранной из пахотного горизонта в Жуковском р-не Калужской обл. [17, 18].

Физические и химические показатели почв определяли общепринятыми методами [34, 35]: рН_{KCl} (рН_{H₂O}) – потенциометрическим методом в суспензии почвы в 1 М растворе KCl (дистиллированной воде) при соотношении твердой и жидкой фаз 1 : 2.5, гранулометрический состав почв – пипеточным методом Качинского, содержание гумуса – по методу Тюрина, гидролитическую кислотность – по Каппену, сумму поглощенных оснований – по Каппену–Гильковицу, содержание подвижных форм P₂O₅ – по Кирсанову в модификации ЦИНАО. Обменный калий определяли по методу Масловой, обменные кальций и магний из почв извлекали с помощью 1 М CH₃COONH₄ (рН 7.0) до отрицательной реакции на ионы Ca²⁺ (табл. 1).

Растения выращивали в пластиковых сосудах объемом 5.5 дм³, содержащих 5 кг (в пересчете на абсолютно-сухую массу) дерново-подзолистой почвы (6 кг воздушно-сухой почвы). Объем дерново-подзолистой почвы в вегетационных сосудах составлял ≈ 4 дм³. Соответственно, плотность сложения почв в сосудах была равна 1.25 кг/дм³.

В почву были высажены пророщенные семена в количестве 9 шт./сосуд. Перед посевом в почву добавляли питательные элементы в виде водных растворов солей (N_{aa}, KН₂РO₄, K_c) из расчета N₂₀₀, P₁₀₀ и K₁₀₀. Zn (водный раствор нитрата) вносили в количестве 50 мг/кг. Соответственно, при массовой концентрации Zn в этой почве 80.7 мг/кг объемная концентрация металла составила 101 мг/дм³. Выбор доз Zn соответствовал оптимальным концентрациям металла в почвах, при которых, как было установлено ранее [36], наблюдали максимальные морфометрические показатели растений (высоту, биомассу, площадь листьев), урожайность, а также достаточно высокие концентрации Zn в разных органах растений и в квазиравновесных почвенных растворах, что позволило надежно детектировать в них металл. После внесения растворов солей в почву сосуды инкубировали в течение 30 сут при $t = 20\text{--}25^\circ\text{C}$, допуская при этом 2 цикла увлажнения–иссушения. Кон-

тролем 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 снимали урожай надземной биомассы, извлекали почвенные растворы, а почву в сосудах размывали с помощью водопроводной воды с жесткостью ≥ 5 мг-экв (Ca + Mg)/дм³, после чего извлекали корни растений, последовательно быстро ополаскивали 3 раза в стаканах с водопроводной водой для удаления оставшихся почвенных частиц. Далее определяли их биомассу, общую и рабочую удельные поверхности по методу Колосова [37, 38]. Часть корней после отмывания от почвенных частиц дополнительно быстро ополаскивали в стаканах с деионизированной водой, высушивали и после сухого озоления с последующим кислотным растворением зольного остатка определяли содержание Zn оптическим эмиссионным методом на приборе ИСП-ОЭС Liberty II фирмы “Varian” [39].

Кроме того, ежедневно в одно и то же время проводили учет массы сосудов с почвой и вегетирующими растениями и долив их дистиллированной водой до влажности, соответствующей 55% ПВ. Также ежедневно контролировали по массе и доливали водой сосуды с черным паром. Формирующийся суточный дефицит массы в последних был обусловлен физическим испарением, а различия в массе сосудов с вегетирующими растениями за 1 сут были связаны с эвапотранспирацией. Дефицит влаги в сосудах с растениями, обусловленный совместными процессами десукции и транспирации, рассчитывали по разности между величинами дефицита влаги, обусловленного эвапотранспирацией (в вариантах с растениями) и физического испарения (в вариантах исследованных почв без растений). Опыты проводили в трехкратной повторности.

Влажность и температуру воздуха в тепличных условиях контролировали с помощью автономного регистратора температуры и относительной влажности Логгер100-ТВ фирмы “ОВЕН” (зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений) с заданным интервалом времени 30 мин в течение всего опыта.

Квазиравновесные почвенные растворы были получены с помощью центрифугирования. При этом авторы использовали центрифужные стаканы с вкладышами (куда помещали влажную почву), изготовленные из тефлона (ПТФЭ). Вкладыши имели перфорированное дно. Внешний вид всей конструкции представлен на рис. 1. Благодаря толстым стенкам и имеющемуся в нижней ча-

Таблица 1. Основные характеристики дерново-подзолистой супесчаной почвы

Показатель	Величина показателя
pH _{KCl}	5.05 ± 0.01
pH _{H₂O}	6.04 ± 0.01
Гумус, %	1.67 ± 0.03
Массовая доля фракции (мм) в почве, %	
1–0.25	35.1
0.25–0.05	15.6
0.05–0.01	30.9
0.01–0.005	5.2
0.005–0.001	7.3
<0.001	5.9
Физическая глина (<0.01 мм)	18.4
Илистая фракция (<2 мкм), %	8.8
H _T , мг-экв/100 г почвы	1.89 ± 0.02
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г почвы	5.3 ± 0.1
Обменный K ₂ O, мг/кг (по Масловой)	77.7 ± 1.3
Подвижный P ₂ O ₅ , мг/кг (по Кирсанову)	127 ± 2
Массовая доля валового Zn, мг/кг	30.7 ± 2.7
Внесено в почву Zn, мг/кг	50

сти стакана упорному ободку с помощью данного приспособления успешно “отжимали” почвенные растворы на центрифуге ЦЛС-3 (с типовым угловым ротором РУ8 × 90) при 5000 об./мин в течение 1 ч. При этом не отмечено видимых деформаций конструкции, обусловленных текучестью тефлона, вкладыши сравнительно легко извлекали из стаканов, на дне которых собирался почвенный раствор.

Влажность исходной почвы, взятой для извлечения почвенного раствора, составляла 55% ПВ (т.е. была равна влажности, оптимальной для произрастания сельскохозяйственных культур в вегетационном опыте).

В извлеченных почвенных растворах определяли pH, содержание Zn, микро- и макроэлементов. Концентрацию Zn в растениях и в почвах определяли в соответствии с методиками, изложенными в [35]: в частности, содержание подвижных и кислоторастворимых форм Zn – с помощью экстракции ацетатно-аммонийным буфером (ААБ) pH 4.8 и 1 М HCl, общее (валовое) количество – экстракцией 7 М HNO₃ при кипячении в присутствии H₂O₂ после уборки урожая, концентрацию Zn в растениях – после сухого озоления с последующим кислотным растворением



Рис. 1. Внешний вид центрифужных стаканов из ПТФЭ и вкладышей с пористым дном.

зольного остатка. 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 [40–43]:

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

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

Согласно литературным источникам [41, 44], содержание Zn (равно как и других двухвалентных катионов) в растениях увеличивается в ходе онтогенеза. При этом зависимость изменения концентраций Zn в вегетативных органах растений от времени носит асимптотический характер, приближаясь к максимуму $[Zn]_{\max \text{ раст}}$, характерному для каждой концентрации Zn в почве и вида растения [18, 32, 45, 46]. Подобная зависимость может быть описана уравнением:

$$[Zn]_{\text{раст}} = [Zn]_{\max, \text{раст}} [1 - \exp(-\beta t)], \quad (2)$$

где $[Zn]_{\text{раст}}$ – концентрация Zn в растении, мг/кг; β – константа скорости накопления металла, сут⁻¹; t – время.

Динамика выноса Zn с биомассой может быть описана с помощью логистической функции:

$$W(t) = \frac{W_{\max}}{1 + \frac{W_{\max}}{W_0} \exp(-ut)}, \quad (3)$$

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

Величины параметров уравнений (1), (2) и (3): M_{\max} , M_0 , W_{\max} , W_0 , u , μ , $[Zn]_{\max \text{ раст}}$ и β подбирали с использованием модуля “нелинейное оценивание” программы Statistica. При этом применяли алгоритм последовательных итераций, использующий минимизацию квадратичной ошибки $E = \sum [K_c(\text{расч}) - K_c(\text{измерен})]^2$ по методу Левенберга–Маркотта в качестве критерия подбора параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В течение вегетационного периода из почвенных сосудов сразу после уборки растений на 7, 14, 21, 30, 45 и 70-е сут эксперимента извлекали квазиравновесные почвенные растворы методом центрифугирования. Динамика концентрации в них Zn представлена на рис. 2.

Установлено, что уменьшение концентрации Zn в почвенном растворе в зависимости от времени можно удовлетворительно описать экспоненциальным уравнением:

$$[Zn]_{\text{почв р-р}} = 10.42 \exp(-0.0495t), \quad R^2 = 0.91.$$

Зависимость $Zn_{\text{почв,раствор}} = f(\sqrt{t})$ можно также описать с помощью регрессионного уравнения:

$$[Zn]_{\text{почв р-р}} = 53.0 \exp(-0.596\sqrt{t}), \quad R^2 = 0.93,$$

исключив первую “выпадающую” точку, что свидетельствовало о сложных (недиффузионных) процессах, приводящих к эффекту истощения Zn в исследованной почве. К данному эффекту, безусловно, приводит и истощение запаса обменных и легкорастворимых форм Zn в почве в результате непрерывного поглощения корнями растений [8, 9, 47], не компенсируемого десорбцией Zn из почвенного поглощающего комплекса (ППК) в почвенный раствор. Вместе с тем полученные данные о выносе элемента из почвы надземной

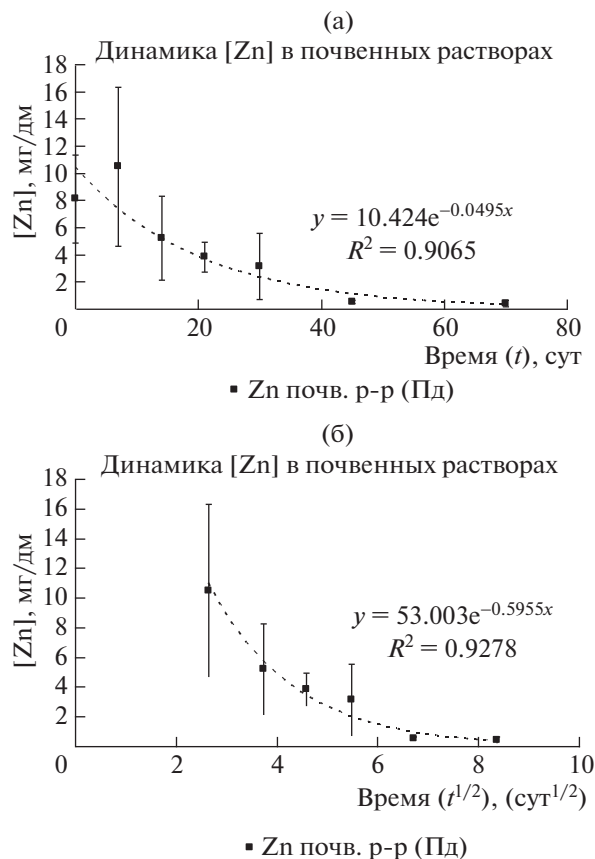


Рис. 2. Динамика $[C_{Zn}]$ в квазиравновесном почвенном растворе, извлеченном из дерново-подзолистой почвы.

биомассой и корнями показали (рис. 3), что максимальный вынос Zn составлял 12.6 мг/сосуд, т.е. всего 3.1% от общего количества металла, содержащегося в почве. По-видимому, определяющими в данном случае были процессы, приводящие к фиксации Zn в почве в результате трансформации более подвижных и доступных растениям форм нахождения металла в малоподвижные и, соответственно, труднодоступные. Среднее содержание различных форм нахождения Zn, определенное в соответствии с методикой [35] после окончания вегетационного опыта в воздушно-сухих образцах исследованной почвы, составило: подвижных форм – 19.0 ± 1.1 мг/кг (23.5% от общего количества металла в почве), кислоторастворимых форм – $38.8 \pm 0.1\%$ (48% от общего количества Zn). Согласно теоретическим расчетам, если исходить из предположения, что весь внесенный Zn находится в подвижной форме, и с учетом количества подвижного и кислоторастворимого Zn в нативных почвах, относительное содержание соответствующих форм металла в почве

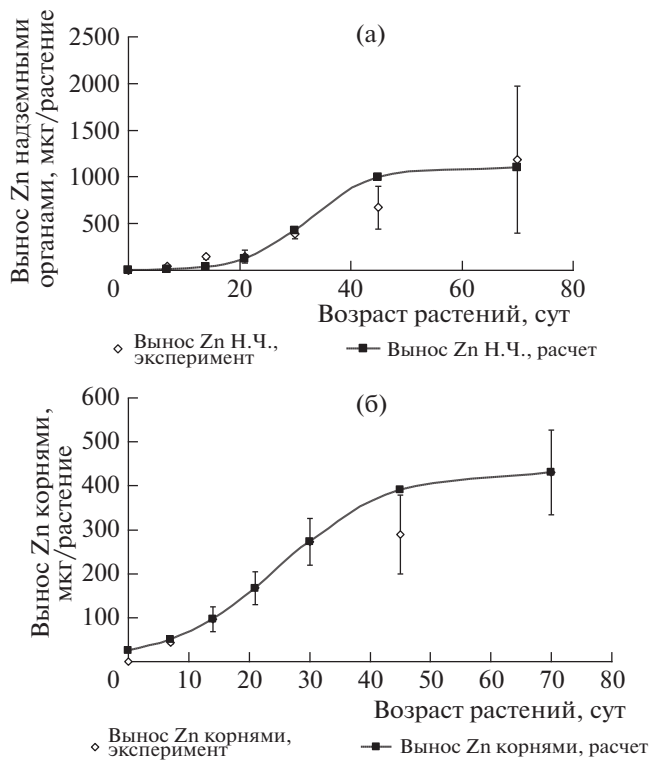


Рис. 3. Динамика выноса Zn разными органами растений кормовых бобов (мкг/растение), выращенных на дерново-подзолистой почве до фазы созревания: (а) – надземные органы, (б) – корни.

должно было быть значительно больше: 64% подвижной, 71% кислоторастворимой.

В течение вегетационного периода контролировали прирост надземной биомассы и корней растений вплоть до фазы созревания. Экспериментальные данные о приросте надземной массы бобов аппроксимировали с помощью уравнения логистической кривой (рис. 4а). Величины 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 соответственно 24.5, 1.2 и 0.075.

Экспериментальные данные о приросте массы корней также аппроксимировали с помощью уравнения логистической кривой (рис. 4б). Величины параметров M_{max} (г), M_0 (г), μ (сут^{-1}) соответствующих логистических кривых для дерново-подзолистой почвы были равны 7.26, 0.61 и 0.051.

Полученные данные о динамике накопления (концентрации) Zn в надземных органах кормовых бобов показали, что зависимость изменения концентраций Zn в вегетативных органах кормовых бобов (мг/кг сухой массы) от времени была

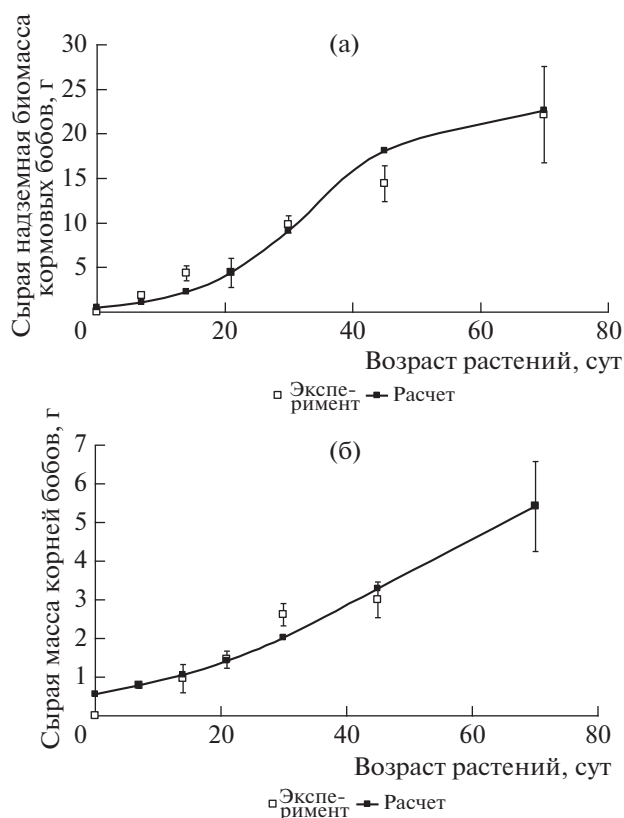


Рис. 4. Динамика изменения сырой надземной биомассы кормовых бобов (а) и корней (б) (в пересчете на одно растение), выращенных на дерново-подзолистой супесчаной почве до фазы созревания.

асимптотической, приближаясь к максимуму $[Zn]_{\max \text{ раст}}$, характерному для каждой концентрации Zn в почве (рис. 5а).

Величины 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 соответственно. Постоянная времени β характеризует скорость изменения концентрации Zn в биомассе бобов. Чем больше β , тем меньше скорость накопления металла в вегетативной массе растений. Данные о динамике накопления (концентрации) Zn в корнях кормовых бобов свидетельствовали об отсутствии четкой зависимости изменения концентраций в них Zn от времени. Для большей части исследованного временного интервала она оставалась постоянной на уровне 900–1000 мг/кг сухой массы корней, немного снижаясь в самом начале и в конце исследования (на 7-е и 70-е сут). В итоге зависимость $[Zn]_{\text{раст}} = f(t)$ удалось удовлетворительно описать с помощью уравнения полинома 2-й степени (рис. 5б):

$$[Zn]_{\text{раст}} = -0.57t^2 + 47.67t + 213.7, \quad R^2 = 0.74.$$

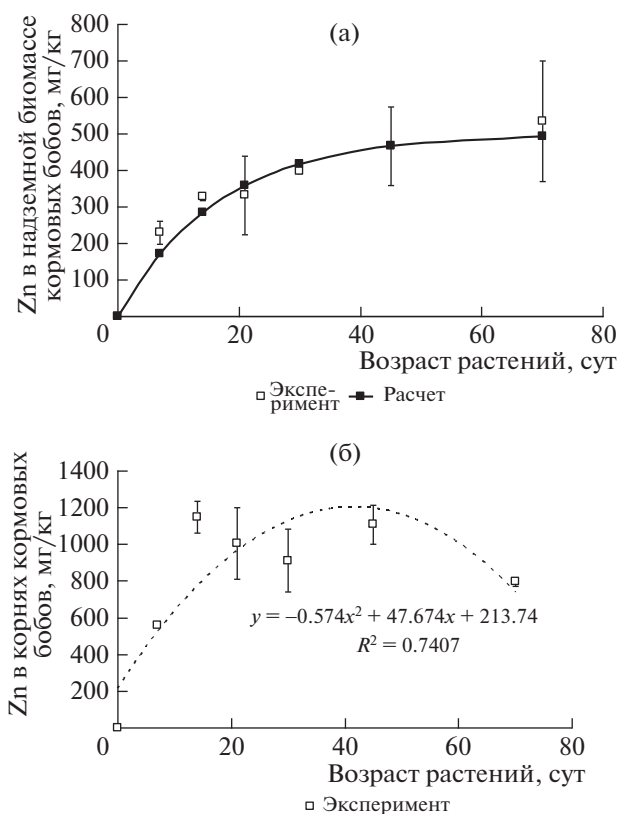


Рис. 5. Динамика накопления Zn в кормовых бобах, мг/кг (в пересчете на сухую массу), выращенных на дерново-подзолистой супесчаной почве до фазы созревания: (а) – надземные органы, (б) – корни.

Динамика выноса Zn с биомассой в пересчете на одно растение представлена на рис. 3. Для надземных органов величины параметров логистических кривых (W_{\max} , W_0 , u) для дерново-подзолистой почвы при дозе цинка Zn_{50} составили 1100 мкг, 3.1 мкг и 0.181 сут^{-1} (рис. 3а); для корней – 434 мкг, 26.1 мкг и 0.11 сут^{-1} соответственно (рис. 3б).

В ходе модельного вегетационного опыта были оценены количественные параметры конвективного потока влаги из почвы в корни растений и сопряженного с ним массопереноса ионов цинка. Для этого проводили постоянный контроль по нескольким показателям. Во-первых, осуществляли ежесуточный анализ данных о потере массы в сосудах с растениями, связанной с совместными процессами десукции и транспирации, обусловленными эвапотранспирацией (в вариантах с растениями) и физическим испарением (в вариантах исследованной почвы без растений). На основании полученных данных была оценена скорость транспирации влаги кормовыми бобами. Полученные опытные данные удалось удовлетво-

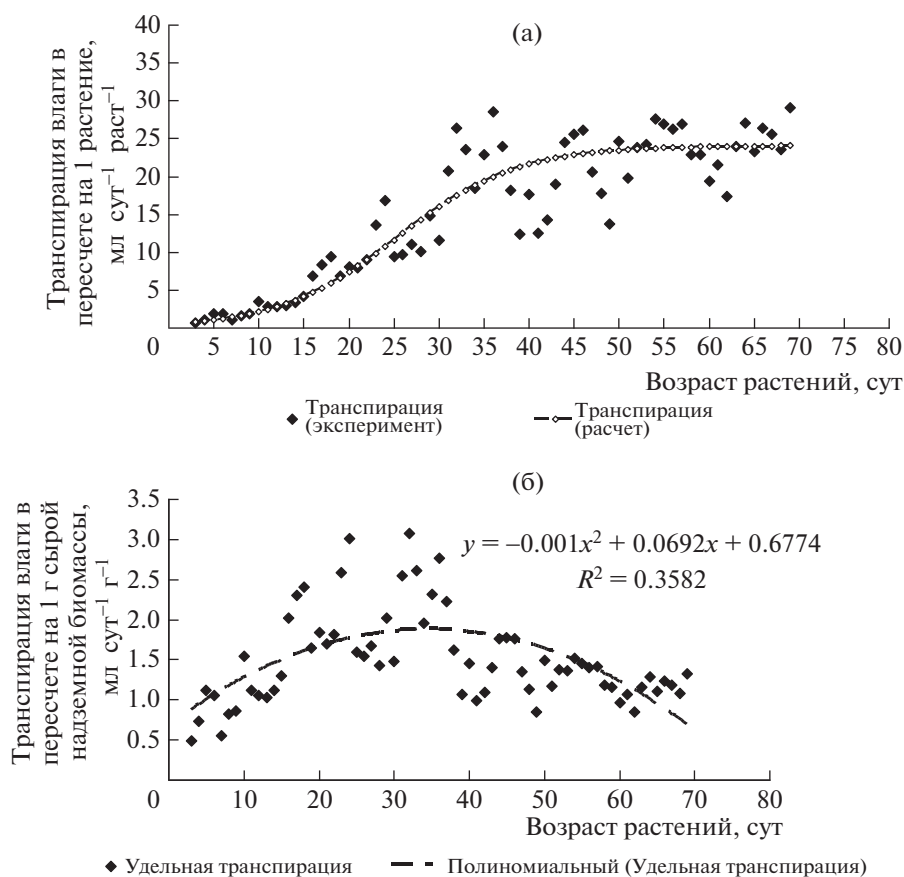


Рис. 6. Динамика транспирации влаги надземными органами кормовых бобов, выращенных на дерново-подзолистой супесчаной почве до фазы созревания: в пересчете на одно растение, мл/растение/сут (а), в пересчете на 1 г сырой надземной биомассы, мл/г/сут (б).

нительно аппроксимировать с помощью логистической функции (рис. 6а):

$$T(t) = \frac{T_{\max}}{1 + \frac{T_{\max}}{T_0} \exp(-\gamma t)}, \quad (4)$$

где T_{\max} – максимально возможная транспирация влаги одним растением, мл H_2O /растение; T_0 – начальная транспирация (расчетная величина), мл H_2O /растение; γ – константа транспирации H_2O надземной биомассой растений, сут^{-1} ; t – время, сут.

Величины параметров T_{\max} (мл H_2O /растение), T_0 (мл H_2O /растение), γ (сут^{-1}) соответствующих логистических кривых для дерново-подзолистой почвы были равны 24.1, 0.53 и 0.150.

Затем исследовали динамику общей ($S_{\text{уд общ}}$) и рабочей ($S_{\text{уд раб}}$) удельной поверхности корней кормовых бобов, выращенных на исследованной дерново-подзолистой почве (рис. 7). Удовлетворительно описать их с помощью специально по-

добранных аппроксимирующих уравнений не удалось, поэтому в дальнейших расчетах были приняты средние величины:

$$S_{\text{уд общ}} = 0.74 \pm 0.48 \text{ м}^2/\text{г}$$

и $S_{\text{уд раб}} = 0.32 \pm 0.20 \text{ м}^2/\text{г}.$

Следует отметить, что наибольшие общая и рабочая удельные поверхности корней кормовых бобов были отмечены на 21-е сут с момента появления всходов. По-видимому, в этот период происходит оптимальное развитие физиологических механизмов поглощения влаги и питательных веществ растениями. В дальнейшем, несмотря на то, что общий вынос воды и элементов питания корнями растений из почвы увеличивается за счет роста надземной и корневой биомассы, интенсивность этого процесса снижалась. Поэтому длительность краткосрочных вегетационных опытов с кормовыми бобами в качестве тест-культуры целесообразно ограничить 20–25 сут.

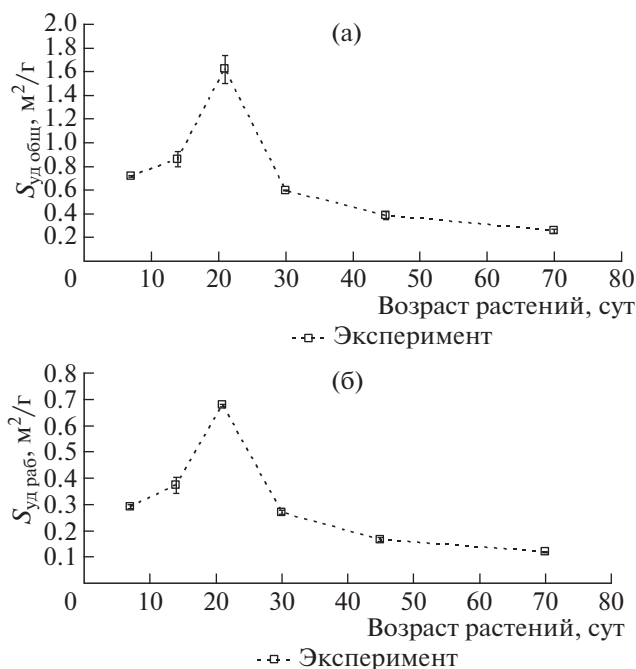


Рис. 7. Динамика величин общей и рабочей удельной поверхности корней кормовых бобов, выращенных на дерново-подзолистой почве.

Следующим этапом исследования стала оценка динамики транслокационных отношений (TO) = $[Zn]_{надз. ч.} / [Zn]_{корни}$ с возрастом кормовых бобов.

Определить тренд изменения TO в течение периода вегетации растений не удалось, в том числе и из-за высокой вариабельности показателя $[Zn]_{корни}$, обусловленной разными факторами, не последнее место среди которых занимали особенности многостадийной методики отмывки корней от почвенных частиц с использованием

сначала природной, сравнительно жесткой воды, а затем — деионизированной. Полученные данные о величине TO практически не изменялись в течение всего периода вегетации растений и составляли в среднем 0.43 ± 0.13 (рис. 8).

И наконец, последним этапом исследования динамики перехода, транслокации и накопления Zn в разных органах тест-культуры стала оценка процесса конвективного поступления влаги в корни растений в результате десукции и связанного с ней массопереноса Zn. Показано, что скорость поступления влаги в растения (v_{H_2O}) является величиной, изменяющейся со временем (рис. 9а). При этом предполагали, что в процессе переноса влаги в корни растений задействована только рабочая поглощающая поверхность корней ($S_{раб}$), массоперенос влаги в растения в результате процесса десукции равен массопереносу влаги из растения в результате транспирации. Полученные величины v_{H_2O} составили $(3.3–29.2) \times 10^{-3}$ мкл $H_2O/cm^2/c$. Средняя величина v_{H_2O} составила за вегетационный период 19.3×10^{-3} мкл $H_2O/cm^2/c$.

Учитывая, что массовый поток (массоперенос) ионов Zn к поверхности корней с конвективным потоком влаги обусловлен процессами транспирации и десукции, а поглощение ионов металла осуществляется не всей, а только рабочей поверхностью корня, на основании представленных данных о динамике $[Zn]$ в квазиравновесном почвенном растворе, массы и рабочей поверхности корней, а также количестве влаги, транспирируемой одним растением, можно рассчитать важную в практическом плане величину — массоперенос цинка к поверхности корней кормовых

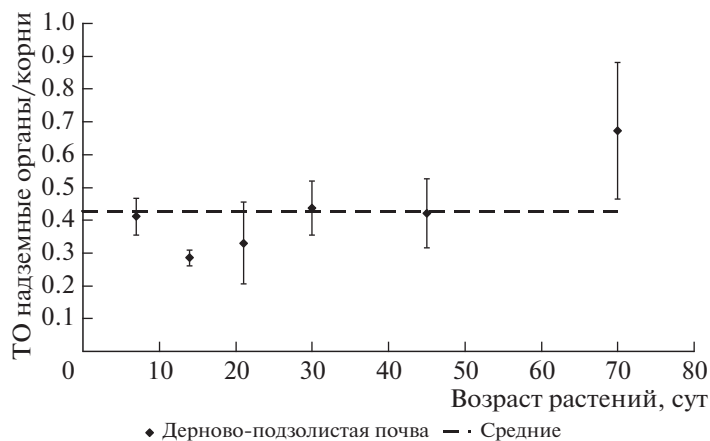


Рис. 8. Величины транслокационных отношений для кормовых бобов ($TO = [Zn]_{надзем. органы} : [Zn]_{корни}$), полученные в ходе вегетационного опыта.

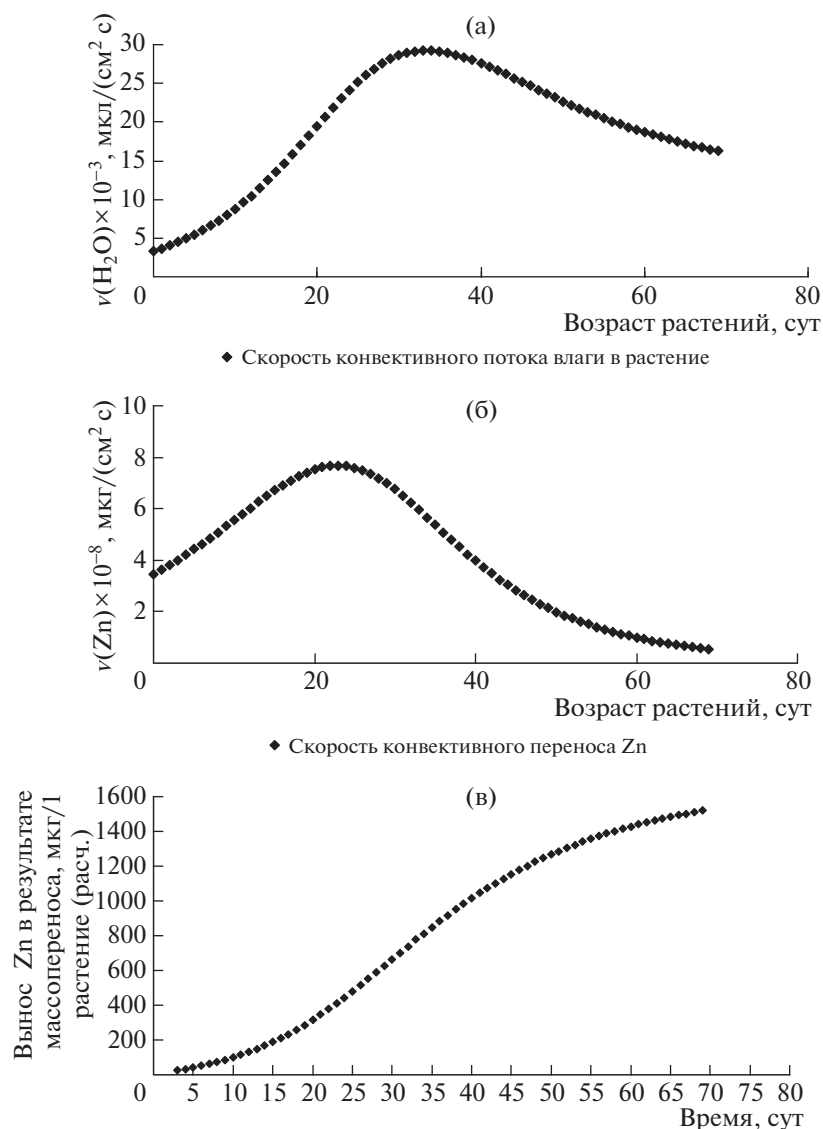


Рис. 9. Динамика: (а) – скорости конвективного потока влаги (v_{H_2O}) в корни кормовых бобов, мкг/см²/с; (б) – скорости массового переноса цинка (v_{Zn}) с конвективным потоком влаги, мкг/см²/с; (в) – общего выноса Zn корнями и надземными органами кормовых бобов в результате массопереноса с конвективным потоком влаги при транспирации (расчетная величина).

бобов в динамике. Естественно, при этом необходимо предположить, что потоки влаги в результате процессов десукции и транспирации равны. Рассчитанные величины скорости массопереноса цинка к поверхности корней кормовых бобов в динамике приведены на рис. 9б.

Скорость массопереноса Zn к поверхности корней оказалась не постоянной. Она изменялась в течение вегетационного периода в диапазоне $(0.56-7.68) \times 10^{-8}$ мкг Zn/см²/с. Средняя величина v_{Zn} для исследованной дерново-подзолистой почвы, суточный размах изменений влажности, который в вегетационных сосудах составлял в те-

чение вегетационного периода 32–55% ПВ, было равно 4.16×10^{-8} мкг Zn/см²/с.

Исходя из полученных параметров процесса конвективного потока влаги в корни растений из почвы и величин концентрации Zn в почвенном растворе, был рассчитан общий вынос металла кормовыми бобами из дерново-подзолистой почвы в динамике (рис. 9в). Сопоставление этих данных с фактически установленными в результате проведенных экспериментов величинами выноса Zn надземными органами и корнями растений (рис. 3) позволило сделать вывод, что практически весь Zn, поглощенный растениями, поступал через корневую систему в результате процессов

массопереноса с конвективным потоком влаги. Незначительное занижение экспериментальных данных по сравнению с расчетными могло быть связано с потерей металла при многоступенчатой процедуре размывания водой почвы в сосудах и последующей отмывки корней от почвенных частиц. По-видимому, в условиях отсутствия дефицита металла в почве диффузионный механизм поступления Zn в корни растений играет незначительную роль. Полученные результаты отличаются от данных работы [12] о поведении ионов K^+ (важного элемента питания) в системе почва–почвенный раствор–растение, для которого отмечено преобладание диффузионного механизма поступления в корни растений по сравнению с массопереносом с конвективным потоком влаги. В то же время для таких элементов, как Mg и Ca, доля массопереноса в корни растений составляла 100%. Объясняя данное явление, авторы работы [12] совершенно справедливо утверждали, 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 вегетационных опытах с кормовыми бобами на дерново-подзолистой супесчаной почве, в которую дополнительно вносили Zn в виде водорастворимой соли в оптимальном для растений количестве, установлено уменьшение концентрации Zn в почвенном растворе в зависимости от времени. Этот процесс можно удовлетворительно описать с помощью экспоненциальной зависимости. При этом получены доказательства наличия недиффузионного механизма закрепления (фиксации) Zn в минеральной дерново-подзолистой почве. По-видимому, отмеченный эффект зависел от 2-х одновременно идущих процессов: 1 – истощения запаса обменных и легкорастворимых форм Zn в почве в результате непрерывного поглощения корнями растений, не компенсируемого десорбцией Zn из ППК в почвенный раствор и 2 – фиксации Zn в почве в результате трансформации более подвижных и доступных растениям форм металла в малоподвижные и, соответственно, труднодоступные растениям. При этом преимущество имел последний процесс.

При исследовании динамики перехода, транслкации, накопления и расчете интегрального показателя – выноса Zn разными органами иссле-

дованных растений были определены параметры прироста надземной биомассы и корней кормовых бобов, изменения концентрации и выноса Zn разными органами растений, а также транслкационные отношения $TO = [Zn]_{\text{надз. орг}} : [Zn]_{\text{корн}}$. Была также исследована динамика общей ($S_{\text{уд общ}}$) и рабочей ($S_{\text{уд раб}}$) удельной поверхности корней кормовых бобов.

Прирост надземной биомассы и корней кормовых бобов вплоть до фазы созревания хорошо описывается логистической функцией с 3-мя параметрами: M_{max} (г), M_0 (г), μ (сут^{-1}). Эти параметры отражали особенности динамики накопления биомассы данным видом растений и для надземной биомассы и корней составили соответственно 24.50, 1.20, 0.075 и 7.26, 0.61, 0.051. Зависимости изменения концентраций Zn в вегетативных органах кормовых бобов от времени были асимптотическими, приближаясь к максимуму $[Zn]_{i, \text{max раст}}$ зависевшему от концентрации Zn_i в почве. В данном случае величина $[Zn]_{\text{max раст}}$ была равна 500 мг/кг. Вторым параметром, с помощью которого описывается зависимость изменения концентраций Zn в вегетативных органах бобов от времени, является величина β , характеризующая скорость изменения концентрации Zn в биомассе бобов. Установленная величина β составила 0.060 сут^{-1} . В то же время четкой зависимости концентраций Zn в корнях кормовых бобов, выращенных на дерново-подзолистой почве, от времени не выявлено ($[Zn]_{\text{корни}}$ оставалась постоянной, незначительно варьируя в течение эксперимента в пределах 900–1000 мг/кг сухой массы). В итоге зависимость $[Zn]_{\text{раст}} = f(t)$ удалось удовлетворительно описать с помощью регрессионного уравнения полинома 2-й степени ($R^2 = 0.74$).

Динамику выноса Zn надземной биомассой и корнями (в пересчете на одно растение) из дерново-подзолистой почвы при дозе Zn_{50} также удалось удовлетворительно описать с помощью логистического уравнения с 3-мя параметрами: $W_{\text{max}} = 1100$ мкг, $W_0 = 3.1$ мкг, $u = 0.181 \text{ сут}^{-1}$. Для корней соответствующие величины составили 434 мкг, 26.1 мкг и 0.11 сут^{-1} .

Удовлетворительно описать изменение общей ($S_{\text{уд общ}}$) и рабочей ($S_{\text{уд раб}}$) удельных поверхностей корней с помощью специально подобранных аппроксимирующих уравнений не удалось. Поэтому пришлось ограничиться средними показателями: $S_{\text{уд общ}} = 0.74 \pm 0.48 \text{ м}^2/\text{г}$ и $S_{\text{уд раб}} = 0.32 \pm 0.20 \text{ м}^2/\text{г}$.

Определить тренд изменения величин транслкационных отношений $TO = [Zn]_{\text{надзем. органы}} : [Zn]_{\text{корни}}$ в течение периода вегетации растений также не удалось. Полученные величины TO

практически не изменялись и составляли в среднем 0.43 ± 0.13 .

На заключительном этапе исследования были оценены параметры процесса массопереноса Zn в корни растений с конвективным потоком влаги в результате десукции. Рассчитанные на основании экспериментальных данных величины скорости поступления влаги (v_{H_2O}) в корни кормовых бобов составили $(3.3-29.2) \times 10^{-3}$ мкл $H_2O/cm^2/c$. Средняя величина v_{H_2O} за вегетационный период была равна 19.3×10^{-3} мкл $H_2O/cm^2/c$. Скорость массопереноса Zn к поверхности корней также изменялась в течение вегетационного периода в диапазоне $(0.56-7.68) \times 10^{-8}$ мкг Zn/ cm^2/c . Средняя величина v_{Zn} для исследованной дерново-подзолистой почвы, суточный размах изменений влажности, который в вегетационных сосудах составлял в течение вегетационного периода 32–55% ПВ, была равна 4.16×10^{-8} мкг Zn/ cm^2/c .

Сопоставление фактически установленных показателей выноса Zn надземными органами и корнями растений с рассчитанными, исходя из параметров процесса конвективного потока влаги в корни растений из почвы и величин концентрации Zn в почвенном растворе, позволило сделать вывод, что практически весь Zn, поглощенный растениями, поступал через корневую систему в результате процессов массопереноса с конвективным потоком влаги. По-видимому, в условиях отсутствия дефицита металла в почве диффузионный процесс поступления Zn в корни растений был незначительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения.
- Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. L.: CRC Press, 2011. 505 p.
- Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, ЛО, 1987. 142 с.
- Ильин В.Б. Оценка существующих экологических нормативов содержания тяжелых металлов в почве // Агрехимия. 2000. № 9. С. 74–79.
- Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение / Под ред. Сысо А.И. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
- Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 336 с.
- Гуральчук Ж.З. Механизмы устойчивости растений к тяжелым металлам // Физиол. и биохим. культ. раст. 1994. Т. 26. С. 107–117.
- Цинк и кадмий в окружающей среде / Под ред. Добровольского В.В. М.: Наука, 1992. 200 с.
- Зырин Н.Г., Перих В.И., Тихомиров Ф.А. Формы соединения цинка в почвах и поступление его в растения // Агрехимия. 1976. № 5. С. 124–132.
- Wong J.W.C., Li K.L., Zhou L.X., Selvam A. The sorption of Cd and Zn by different soils in the presence of dissolved organic matter from sludge // Geoderma. V. 137. Is. 3–4. 2007. P. 310–317. <https://doi.org/doi/10.1016/j.geoderma.2006.08.026>
- Гармаш Н.Ю. Устойчивость пшеницы и конских бобов к тяжелым металлам // Изв. СО АН СССР. Сер. Биол. науки. 1985. Т. 1. № 6. С. 92–97.
- Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
- Pandey R. Mineral nutrition of plants // Plant Biol. Biotechnol. V. I. Plant diversity, organization, function and improvement / Eds. Bahadur B. et al. India: Springer, 2015. P. 499–538. doi 10.1007/978-81-322-2286-6_20
- Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений и поиски рудных месторождений: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М.: Изд-во МГУ, 1983. 49 с.
- 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>
- Rascio N., Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? // Plant Sci. 2011. V. 180. Is. 2. P. 169–181. doi 10.1016/j.plantsci.2010.08.016
- 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 // Агрехимия. 2013. № 1. С. 64–74.
- Фригидов Р.А., Анисимов В.С., Фригидова Л.М., Гераськин С.А., Анисимова Л.Н., Корнеев Ю.Н., Санжарова Н.И. Влияние концентрации Zn в почвах на динамику накопления биомассы и металла растениями ячменя // Агрехимия. 2014. № 12. С. 42–54.
- Арышева С.П., Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Фригидов Р.А., Корнеев Ю.Н., Санжаров А.И., Андреева Н.В. Исследование поглощения Zn и Pb в системе водная вытяжка из почвы–растения // Пробл. агрохим. и экол. 2018. № 1. С. 42–48.
- 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.
- Veltrup W. Characteristics of zinc uptake by barley roots // Physiol. Plant. 1978. V. 42. P. 190–194.
- 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.
- Ni W.Z., Yang X.E., Long X.X. Comparative studies on zinc tolerance and accumulation between two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance in Southeast China // J. Plant Nutr. 2004. V. 27. P. 627–635.
- Yang X.E., Long X.X., Ni W.Z. Zinc tolerance and hyperaccumulation in a new ecotype of *Sedum alfredii* Hance // Acta Phytoecol. Sin. 2001. V. 25. P. 670–677.

25. Li T.Q., Yang X.E., He Z.L., Yang J.Y. Root morphology and Zn²⁺ uptake kinetics of the Zn hyperaccumulator of *Sedum alfredii* Hance // J. Intergrat. Plant Biol. 2005. V. 47. P. 927–934.
26. Baker A.J.M., McGrath S.P., Reeves R.D., Smith J.A.C. Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology resource for phytoremediation of metal-polluted soils // Phytoremed. Contamin. Soil Water / Eds. Terry N., Banuelos Q. Boca Raton, FL: Lewis publishers, 2000. P. 85–107.
27. Verbruggen N., Hermans C., and Schat H. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants // New Phytol. 2009. V. 181. P. 759–776. doi 10.1111/j.1469-8137.2008.02748.x
28. Krämer U. Metal hyperaccumulation in plants // Ann. Rev. Plant Biol. 2010. V. 61. P. 517–534. doi 10.1146/annurev-arplant-042809-112156
29. Lin Y.-F. An evolutionary perspective on differential regulation of zinc and cadmium homeostasis genes in *Arabidopsis thaliana* and *Noccaea caerulescens*: PhD Thesis. Wageningen, NL: Wageningen University, 2014. 220 p.
30. Bert V., Macnair M.R., Delaguerie P., Saumitou-Laprade P., Petit D. Zinc tolerance and accumulation in metal-tolerant and non-metal-tolerant populations of *Arabidopsis halleri* (Brassicaceae) // New Phytol. 2000. V. 146. P. 225–233.
31. Brown S.L., Chaney R.L., Angle J.S., Baker A.J.M. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and metal tolerant *Silene vulgaris* grown on sludge-amended soils // Environ. Sci. Technol. 1995. V. 29. P. 1581–1585.
32. Yang X.E., Li T.Q., Long X.X., Xiong Y.H., He Z.L., Stoffella P.J. Dynamics of zinc uptake and accumulation in the hyperaccumulating and non-hyperaccumulating ecotypes of *Sedum alfredii* Hance // Plant Soil. 2006. V. 284. Iss. 1–2. P. 109–119. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-0033-0>
33. Environmental remediation technologies for metal-contaminated soils / Eds. Hasegawa H., Rahman I.M.M., Rahman M.A. Japan: Springer, 2016. 254 p. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55759-3_9
34. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
35. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
36. Анисимов В.С., Санжарова Н.И., Анисимова Л.Н., Фригидова Л.М., Круглов С.В., Дикарев Д.В., Фригидов Р.А., Губарева О.С. Использование морфометрических и биохимических показателей растений кормовых бобов для оценки фитотоксических концентраций Zn в различных почвах // Агрохимия. 2011. № 5. С. 65–75.
37. Колосов И.И. Поглонительная деятельность корневых систем растений. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 385 с.
38. Практикум по физиологии растений / Под ред. Третьякова Н.Н. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
39. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. М., 1998. (изд-е 2005 г). 28 с.
40. Куперман Ф.М. Морфофизиология растений. М.: Высш. шк., 1984. 240 с.
41. Рашкович Н.Л. Моделирование показателей минерального питания растений методом регрессионного анализа // Агрохимия. 1995. № 6. С. 97–106.
42. Дричко В.Ф., Изосимова А.А. Влияние возрастающих доз извести на урожай и скорость роста растительного рапса и овса // Агрохимия. 2005. № 8. С. 19–23.
43. Витковская С.Е., Дричко В.Ф., Хофман О.В. Оценка скорости нарастания биомассы сельскохозяйственных культур // Докл. РАСХН. 2014. № 1. С. 50–53.
44. Бардышев М.А. Минеральное питание картофеля. Минск: Наука и техника, 1984.
45. Whiting S.N., Broadley M.R., White P.J. Applying a solute transfer model to phytoextraction: Zinc acquisition by *Thlaspi caerulescens* // Plant Soil. 2003. V. 249. Iss. 1. P. 45–56. <https://doi.org/10.1023/A:1022542725880>
46. Molina M., Escudey M., Chang A.C., Chen W., Arancibia-Miranda N. Trace element uptake dynamics for maize (*Zea mays* L.) grown under field conditions // Plant Soil. 2013. V. 370. Iss. 1–2. P. 471–483. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1628-x>
47. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / Под ред. Зырина Н.Г., Садовниковой Л.К. М.: Изд-во МГУ, 1985. 208 с.

Investigation of Zinc Migration Capacity in the System of Sod-Podzolic Soil–Fodder Beans in Pot Experiment

V. S. Anisimov^{a,#}, L. N. Anisimova^a, L. M. Frigidova^a, Yu. N. Korneev^a, R. A. Frigidov^a, A. I. Sanzharov^a, D. V. Dikarev^a, and I. V. Kochetkov^a

^a Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology
Kievskoe sh., 109 km, Obninsk, Kaluga region 249032, Russia

#E-mail: vsanisimov@list.ru

Experimental data on the accumulation dynamics of Zn in the shoots and roots of fodder beans and uptake of the metal by shoot biomass were obtained in the pot experiment. The quantitative parameters and formal time dependence of Zn absorption process by roots were determined. Their interrelation with the dynamics of the content of water-soluble readily plant accessible soil Zn forms was established. The input rate of moisture (v_{H_2O}) and the mass flow rate (transfer) of water-dissolved zinc ions (v_{Zn}) to the plant roots with a convective flow of moisture depending on fodder beans growth stage have been suggested as the indicators that can be used for simulation the processes of heavy metals root absorption by plants.

Key words: zinc, migration capacity, sod-podzolic soil–fodder beans system, pot experiment.