

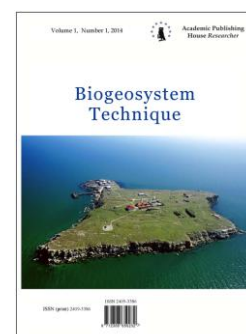
Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation
Biogeosystem Technique
Has been issued since 2014.
ISSN: 2409-3386
Vol. 4, Is. 2, pp. 153-163, 2015

DOI: 10.13187/bgt.2015.4.153

www.ejournal19.com



Articles and Statements

UDC 631.453 633.31/37 581.5

Evaluation of Migration Ability of Zn in the Soil-Plant System

¹Vjacheslav S. Anisimov

²Lidia N. Anisimova

³Ljudmila M. Frigidova

⁴Dmitry V. Dikarev

⁵Ruslan A. Frigidov

⁶Ilja V. Kochetkov

⁷Nanalia I. Sanzharova

¹⁻⁷Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Russian Federation
Kievskoe shosse, 109 km, Obninsk, Kaluzhskaya oblast', 249032

¹PhD (Biology), Head of Laboratory

E-mail: vsanisimov@list.ru

²PhD (Biology), senior researcher

E-mail: lanisimovan@list.ru

³PhD (Biology), senior researcher

E-mail: rus3386@gmail.com

⁴Researcher

E-mail: rus3386@gmail.com

⁵Researcher

E-mail: rus3386@gmail.com

⁶PhD (Biology), senior researcher

E-mail: ikochetkoff@gmail.com

⁷Dr (Biology), professor, corresponding member of Russian Academy of Science, Vice-Director of Institute

E-mail: natsan2004@mail.ru

Abstract

Zinc migration patterns in the soil–plant systems were studied in the pot experiment as dependent on soil type, as well as metal concentrations. The quantified values of Zn migration were determined with use of fodder beans (*Vicia faba* L.) as a test culture. Threshold concentrations of Zn were established in the sod-podzolic sandy loam, peat swamp low-lying soils and chernozem leached silty clay loam, which manifest itself in phytotoxicity. It is shown that edaphic factors play an important role in regulating the mobility of Zn in the soil - plant system as physiological characteristics of the plants. The different approaches to rationing of Zn in soils are also presented.

Keywords: zinc, fodder beans, forms of location, mobility, bioavailability, concentration ratio, phytotoxicity, rationing.

Введение

Повышение концентрации тяжёлых металлов (ТМ) в почвах в результате техногенного загрязнения ведет к негативным эффектам в аграрных экосистемах: потерям урожая, ухудшению качества сельскохозяйственной продукции, снижению микробиологической активности почв. В группу ТМ помимо токсичных металлов (Pb, Hg и др.), входят химические элементы (Cu, Mo, Zn и др.), которые в фоновых концентрациях необходимы для живых организмов. Высокие концентрации химических элементов могут оказывать негативное воздействие на микроорганизмы, растения, животных и представлять опасность для здоровья человека. Опасность, вызываемая загрязнением ТМ, усугубляется еще и слабым выведением их из почвы. Так, например, период полураспада почв от Zn составляет 70–510 лет [1].

Почва способна иммобилизовывать ТМ за счет сорбции их минеральными компонентами, специфическими и неспецифическими высокомолекулярными органическими соединениями, окклюдируются, соосаждения и прочих механизмов, проявляющихся в виде буферной (инактивирующей) способности почв по отношению к данным поллютантам. Принимая это во внимание, при определении ПДК тяжелых металлов необходимо учитывать влияние почвенных характеристик на подвижность поллютантов в почве и фитотоксичность. Благодаря различию свойств исследуемые почвы обладают неодинаковыми способностями сорбировать и удерживать ионы Zn^{2+} , препятствуя тем самым переходу металла в растения.

Целью работы являлась оценка подвижности, биологической доступности и фитотоксичности Zn в почвах разного генезиса, существенно различавшихся по физическим и химическим свойствам. Для выполнения поставленной цели были заложены комплексные вегетационные опыты, где в качестве тест-культуры использовались кормовые бобы (*Vicia faba* L.).

Материалы и методы

Поведение Zn в системе почва – растение изучали в вегетационных опытах в контролируемых тепличных условиях (температура 20–27 °С, относительная влажность воздуха 60–70 %, влажность почвы 60 % от полной влагоемкости ПВ). Объектом исследования служили кормовые бобы (*Vicia faba* L.) сорта Орлецкие (лабораторная всхожесть семян – 92,5 %, сила роста – 73 %), выращиваемые на трех типах почв: дерново-подзолистой супесчаной окультуренной (Жуковский район Калужской области), черноземе слабовыщелоченном тяжелосуглинистом (Курская область) и торфяной болотной низинной (Спас-Деменский район Калужской области). Физические и химические показатели почв (табл. 1) определяли общепринятыми методами [2, 3]: pH_{KCl} ($pH_{водн}$) – потенциометрическим методом в суспензии почвы в 1 М растворе KCl (дистиллированной воде) при соотношении твердой и жидкой фаз 1:2.5 (1:25 – для торфяной почвы), гранулометрический состав почв – пипеточным методом Н.А. Качинского [2], содержание гумуса – по методу Тюрина, гидролитическую кислотность – по Каппену, сумму поглощенных оснований – по Каппену-Гильковицу, содержание подвижных форм P_2O_5 – по Кирсанову и K_2O – по Масловой.

Перед посевом в почву добавляли питательные элементы в виде водных растворов солей (KH_2PO_4 , K_2CO_3) из расчета P_{100} и K_{100} . Zn (водный раствор нитрата) вносили в минеральные почвы в количествах, кратных массовой доле металла (мг/кг воздушно-сухой почвы) в контрольных вариантах, (табл. 1) из расчета: 25, 50, 100, 175, 250 и 500 мг/кг (дерново-подзолистая почва); 50, 100, 250, 500, 750 и 1000 мг/кг (чернозем слабовыщелоченный); 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 мг/кг (торфяная болотная низинная почва). Для органогенной почвы количество вносимого Zn дополнительно корректировали (в сторону повышения) с учетом объемной массы почвы.

В каждой почве вносимое количество азота корректировали по варианту с максимальной дозой Zn с помощью раствора N_{aa} . Растения выращивали в пластиковых сосудах объемом 5 л, содержащих по 5 кг высушенных на воздухе дерново-подзолистой почвы, чернозема слабовыщелоченного и 1.5 кг торфяной низинной почвы. Контролем служил вариант с NPK без внесения Zn. Опыт проводили в 6-кратной повторности.

Концентрацию Zn в растениях, содержание подвижных форм и валовое количество элементов в почвах определяли в соответствии с методикой [4]. Содержание подвижных

форм ТМ определяли экстракцией с помощью ацетатно-аммонийного буфера (рН 4.8) и вытяжки 1 М НСl, общее количество – экстракцией 7М HNO₃ при кипячении в присутствии H₂O₂.

Коэффициенты биологического накопления Zn (далее просто коэффициенты накопления – КН) рассчитывались как отношение содержания элементов в сухой биомассе растений к содержанию их в почве. Воздействие загрязнения разных типов почв Zn на состояние растений оценивали по изменению показателей урожая:

- средняя сухая биомасса 1 растения (для этого половину растений в сосуде убрали через 75 сут. после посева и учитывали массу только надземных частей растений).

- средняя масса семян 1 растения (оставшиеся растения в сосудах убрали после созревания урожая – через 100 сут. после посева).

Статистический анализ полученных данных проводили стандартными методами с использованием MS Excel.

Таблица 1. Основные характеристики почв

Показатель	Дерново-подзолистая супесчаная	Чернозем слабовыщелоченный тяжелосуглинистый	Торфяная болотная низинная
рН _{КСl}	5.05±0.01	5.49±0.01	4.35±0.01
рН _{водн.}	6.04±0.01	6.23±0.02	4.72±0.01
Гумус, %	1.67±0.03	5.13±0.19	21.3±0.9*
Массовая доля фракции (мм) в почве, %			
1-0.25	35.08	0.77	-
0.25-0.05	15.64	0.47	-
0.05-0.01	30.88	50.62	-
0.01-0.005	5.20	10.67	-
0.005-0.001	7.30	8.52	-
<0.001	5.89	28.95	-
Физическая глина (<0.01 мм)	18.39	48.14	-
Илистая фракции (<2µм), %	8.75	33.44	-
Н _г , мг- экв/100 г почвы	1.89±0.02	3.17±0.01	44.0±1.9
Сумма обменных оснований, мг- экв/100 г почвы	5.3±0.1	34.4±0.2	105.0±1.0
Обменный К ₂ O, мг/кг (по Масловой)	77.7±1.3	123.9±2.4**	372.7±3.9
Подвижный Р ₂ O ₅ , мг/кг (по Кирсанову)	126.9±1.9	120.0±1.3**	28.2±0.6

* - зольность торфа, %; ** - по Чирикову

Результаты и их обсуждение

Zn является одним из наиболее биологически доступных элементов в почве – содержание подвижной фракции (экстрагируемой разбавленными минеральными кислотами) может достигать 20–60 % [5].

Подвижность Zn зависит от соотношения форм нахождения (различных химических соединений) его в почвах. Для их фракционирования традиционно используются «групповые реагенты». В качестве группового реагента для извлечения из почв «подвижного», а также «доступного» растениям Zn традиционно используется ацетатно-аммонийный буферный раствор (ААБ), (рН 4.8), [4, 6]. Цинк, содержащийся в виде кислоторастворимых соединений, которые извлекаются при помощи группового реагента 1 М НСl (или 1 М HNO₃), считается потенциально доступным растениям. Металл, не извлекающийся с помощью вышеперечисленных групповых реагентов, считается прочнофиксированным [6]. Внесение Zn в виде водорастворимых соединений приводит к увеличению его подвижности в почвах и, как следствие, к росту перехода в растения.

Так, при внесении Zn в почвы доля подвижных форм элемента возросла в среднем в 5 (дерново-подзолистая почва), в 11 (чернозем) и в 4 раза (торфяная), (табл. 2). При этом доля доступных растениям форм Zn от общего количества элемента в почвах с ростом концентрации последнего изменяется по логарифмическому закону и приближается к постоянной величине (0.44) для дерново-подзолистой почвы, (0.31) – для чернозема слабовыщелоченного, (0.16) – для торфяной почвы. Доля кислоторастворимых форм Zn от общего количества элемента в почвах не зависит от концентрации последнего и равна: (0.65) для дерново-подзолистой почвы, (0.69) – для чернозема слабовыщелоченного, (0.67) – для торфяной низинной почвы.

Таблица 2. Концентрация Zn в сухой биомассе кормовых бобов и семенах в зависимости от содержания подвижных форм и общего количества металла в почве (среднее \pm ошибка среднего)

Внесено Zn, мг/кг	Массовая концентрация форм нахождения Zn в почве (мг/кг)*, извлекаемых:			Массовая концентрация Zn в пересчете на сухое вещество, мг/кг**			
	7 М HNO ₃	1 М HCl	AcNH ₄ , рН 4,8	Биомасса	КН***	Семена	КН
Дерново-подзолистая супесчаная							
0	30.7 \pm 2.7	7.26 \pm 0.20	1.43 \pm 0.48	48.6 \pm 1.7	1.58 \pm 0.15	60.4 \pm 5.0	1.97 \pm 0.24
25	56.1 \pm 2.4	22.1 \pm 0.2	13.0 \pm 6.3	136 \pm 6	2.42 \pm 0.15	68.9 \pm 3.0	1.23 \pm 0.07
50	65.4 \pm 6.5	38.8 \pm 0.1	19.0 \pm 1.1	242 \pm 18	3.71 \pm 0.46	84.0 \pm 4.3	1.29 \pm 0.14
100	109.7 \pm 0.4	75.5 \pm 3.0	43.0 \pm 1.1	457 \pm 43	4.16 \pm 0.39	86.7 \pm 8.9	0.79 \pm 0.08
175	179 \pm 2	135 \pm 4	80.6 \pm 2.4	579 \pm 83	3.23 \pm 0.46	101.4	0.57
250	261 \pm 5	185 \pm 3	104 \pm 3	664 \pm 9	2.54 \pm 0.06	-	-
500	482 \pm 52	374 \pm 58	232 \pm 47	1838 \pm 98	3.81 \pm 0.46	-	-
Чернозем слабовыщелоченный тяжелосуглинистый							
0	55.7 \pm 2.2	15.1 \pm 2.0	0.86 \pm 0.05	26.0 \pm 1.5	0.47 \pm 0.03	32.7 \pm 2.9	0.59 \pm 0.06
50	95.1 \pm 3.6	53.2 \pm 0.1	7.56 \pm 0.55	65.2 \pm 3.6	0.69 \pm 0.05	56.8 \pm 6.5	0.60 \pm 0.07
100	148.8 \pm 0.7	88.0 \pm 2.5	16.6 \pm 0.1	97.1 \pm 3.6	0.65 \pm 0.02	52.3 \pm 9.9	0.35 \pm 0.07
250	294 \pm 3	196 \pm 2	53.1 \pm 4.7	207 \pm 10	0.70 \pm 0.04	79.7 \pm 5.2	0.27 \pm 0.02
500	500 \pm 2	376 \pm 4	134.2 \pm 0.1	309 \pm 9	0.62 \pm 0.02	82.8 \pm 8.2	0.17 \pm 0.02
750	739 \pm 6	560 \pm 5	222 \pm 9	503 \pm 46	0.68 \pm 0.06	88.8 \pm 20.7	0.12 \pm 0.03
1000	1088 \pm 31	859 \pm 22	395 \pm 7	694 \pm 57	0.64 \pm 0.06	80.0	0.07
Торфяная болотная низинная							
0	34.3 \pm 4.5	18.3 \pm 1.2	1.37 \pm 0.23	37.4 \pm 18.9	0.54 \pm 0.09	29.3 \pm 7.9	0.85 \pm 0.26
250	248 \pm 14	167 \pm 1	30.5 \pm 1.0	120 \pm 3	0.48 \pm 0.03	74.2 \pm 2.1	0.30 \pm 0.02
500	455 \pm 8	302 \pm 6	64.8 \pm 8.7	155 \pm 9	0.34 \pm 0.02	84.6 \pm 2.8	0.19 \pm 0.01
1000	845 \pm 12	539 \pm 18	116 \pm 1	273 \pm 14	0.32 \pm 0.02	96.9 \pm 6.3	0.11 \pm 0.01
1500	1250 \pm 22	841 \pm 2	191 \pm 2	382 \pm 24	0.31 \pm 0.02	122.4 \pm 4.5	0.10 \pm 0.01
2000	1671 \pm 45	1129 \pm 33	263 \pm 5	450 \pm 26	0.27 \pm 0.02	102 \pm 18	0.06 \pm 0.01
2500	2003 \pm 7	1347 \pm 31	333 \pm 8	438 \pm 19	0.22 \pm 0.01	104 \pm 24	0.05 \pm 0.01

*n = 3;

**n = 6

***КН – коэффициент накопления элементов в растениях

В контрольных (нативных) почвах доля подвижного (доступного) Zn, извлекаемого ААБ (рН 4.8) от общего количества элемента оказалась незначительной и уменьшалась в ряду: чернозем слабовыщелоченный (0.02) < торфяная (0.04) < дерново-подзолистая (0.05). Доля кислоторастворимого Zn от общего количества металла в контрольных вариантах была значительно выше, чем доступного: 0.24 (дерново-подзолистая почва) \approx 0.27 (чернозем) < 0.53 (торфяная).

Чем больше водорастворимых, способных к обмену, легкорастворимых (непрочносвязанных) соединений Zn в почве – тем выше его подвижность и биологическая доступность.

Миграционная способность Zn в системе почва – растение определяется как факторами биологической природы, связанными с физиологическими особенностями растений, так и эдафическими факторами (кислотностью почвы, содержанием органических веществ, определенных групп неорганических соединений, механическим составом и проч.). Иными словами, миграционная способность элемента в почве зависит от ее буферной способности.

При низких концентрациях металла в почве концентрация его в растении может быть рассчитана по формуле $[Me]_{\text{раст.}} = KН \times [Me]_{\text{почв.}}$, где КН, являясь постоянной величиной, представляет собой коэффициент пропорциональности между содержанием ТМ в почве и в растении. Однако в реальных условиях постоянство КН не всегда соблюдается. Причиной этого является ответная реакция растений на превышение барьерной концентрации ТМ в питающем растворе, которая служит своеобразным триггером защитных реакций организма, направленных на воспрепятствование поступления избыточного количества токсичных элементов. Не менее важным фактором, снижающим фитотоксичность ТМ является эдафический, обусловленный буферностью почв, оказывающей сильное влияние на подвижность ТМ в системе почва – растение. Для почв с высокой буферной способностью, например, для черноземов даже при очень высоких концентрациях ТМ в почве, фитотоксичность ТМ будет проявляться слабо или отсутствовать. В этом случае значения КН, как можно ожидать, будут постоянными (или лишь незначительно уменьшаться) в широком диапазоне концентраций ТМ в почве.

В результате анализа дозовых зависимостей между количеством внесенного в дерново-подзолистую почву металла и накоплением Zn в биомассе кормовых бобов (табл. 2) выделены 3 диапазона содержания Zn в почве: нетоксичных концентраций (содержание Zn в почве 30-180 мг/кг, что соответствует его содержанию в растениях 50÷580 мг/кг сухой массы); избыточных концентраций (в почве содержится Zn 180 – 260 мг/кг, в растениях - 580 - 660 мг/кг); токсичных концентраций (содержание элемента в почве 260–480 мг/кг, в растениях - от 660 (критическая концентрация) до 1850 мг /кг). Тип поведения растений при этом изменяется, соответственно, с индикативного через барьерный ограничительный до барьерного гипераккумулятивного [7, 8]. Тем самым подтверждается вывод о том, что растения одного вида могут вести себя как аккумуляторы, индикаторы или биобарьеры (“excluders”) по отношению к ионам ТМ в зависимости от концентрации последних в субстрате.

Совершенно другие выводы следуют из анализа данных по накоплению Zn в вегетативной массе кормовых бобов, выращенных на черноземе слабовыщелоченном и торфяной низинной почве. Весь диапазон содержания цинка в почве на черноземе (55–1090 мг/кг) укладывается в интервал, который, исходя из формы кривых накопления ТМ, можно считать согласно [9], интервалом нетоксичных концентраций. Тип поведения растений – индикативный. Аналогично, для торфяной низинной почвы интервал нетоксичных концентраций Zn растянулся до 1670 мг/кг. Лишь при очень высоком содержании Zn в почве (1670-2000 мг/кг) проявились особенности поглощения элемента растениями, характерные для избыточных концентраций (тип поведения – барьерный ограничительный).

Установлены пороговые фитотоксичные концентрации Zn по показателю «средняя сухая биомасса 1 растения», которые составляют: для дерново-подзолистой почвы 260 мг/кг; чернозема слабовыщелоченного – 740 мг/кг; торфяной низинной почвы – 1670 мг/кг. Пороговые фитотоксические концентрации по показателю масса семян с

1 растения составляют: дерново-подзолистая почва – 180 мг/кг; чернозем – 250 мг/кг; торфяная низинная почва – 1670 мг/кг.

На основании данных по содержанию цинка в семенах кормовых бобов (табл. 2, рис. 1А), выращенных на почвах разного генезиса, можно сделать вывод о том, что максимальная концентрация элемента в семенах не превышает 130 мг/кг. Если тип поведения растений меняется с индикативного на барьерный ограничительный, семена не формируются. Этакритическая концентрация Zn находится в пределах 600–700 мг/кг сухой биомассы.

Величина КН Zn в семенах кормовых бобов, выращенных на разных почвах, уменьшается обратно пропорционально концентрации металла в почве (рис. 2Б). Тип поведения растений при этом меняется с «аккумулятивного» (транслокационное соотношение $[Zn]_{\text{семена}}/[Zn]_{\text{сухая биомасса}} > 1$) [7] через «индикативный» ($[Zn]_{\text{семена}}/[Zn]_{\text{сухая биомасса}} \approx 1$) на «барьерный» ($[Zn]_{\text{семена}}/[Zn]_{\text{сухая биомасса}} < 1$), (рис. 2В). Особый интерес представляет тот факт, что значение $[Zn]_{\text{семена}}/[Zn]_{\text{сухая биомасса}} > 1$ наблюдалось лишь при фоновых концентрациях Zn в почве, при которых содержание его в сухой надземной биомассе кормовых бобов, выращенных на разных почвах, не превышало 50 мг/кг. При превышении этого критического значения (фактически, уже в варианте внесения минимальных количеств Zn в почву в соответствии со схемой эксперимента) $[Zn]_{\text{семена}}/[Zn]_{\text{сухая биомасса}}$ быстро снижались и становились < 1 , указывая тем самым на проявление растениями барьерных функций, направленных на защиту генеративных органов и семян.

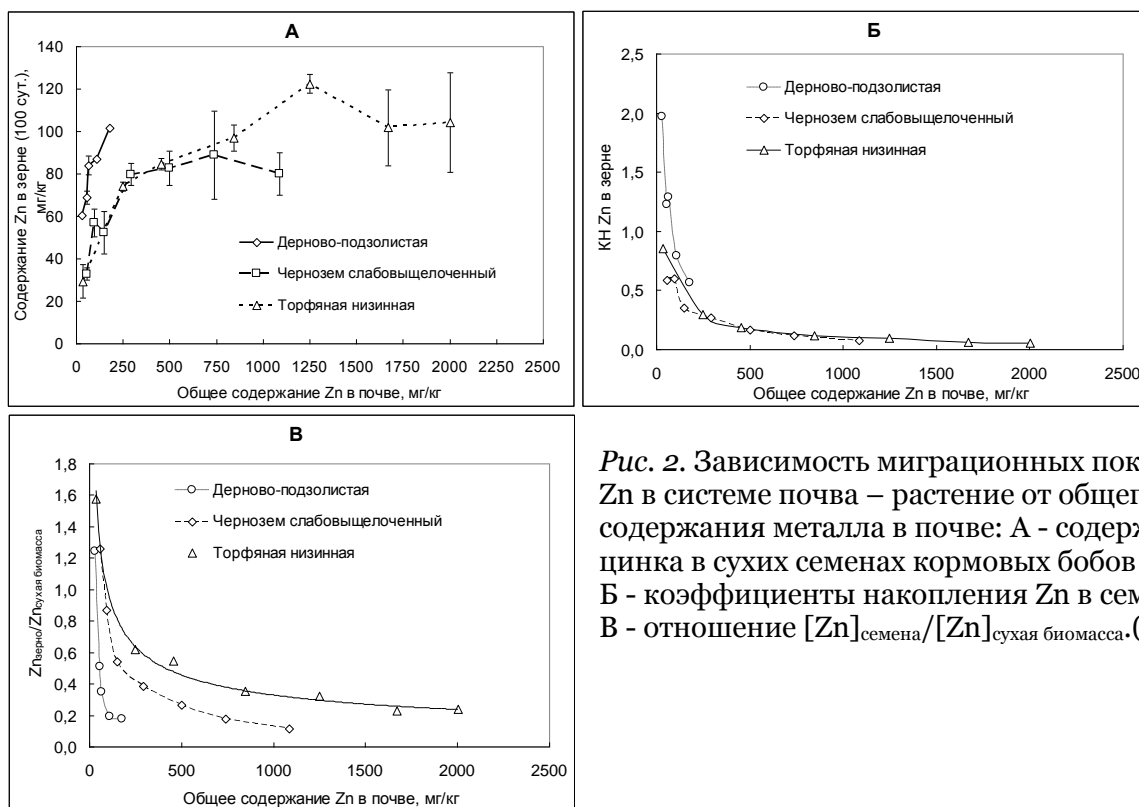


Рис. 2. Зависимость миграционных показателей Zn в системе почва – растение от общего содержания металла в почве: А - содержание цинка в сухих семенах кормовых бобов (100 сут.), Б - коэффициенты накопления Zn в семенах, В - отношение $[Zn]_{\text{семена}}/[Zn]_{\text{сухая биомасса}}$. (В)

Согласно действовавшим до 2001 г. санитарным правилам и нормам СанПиН 2.3.2.560-96 "Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов" допустимый уровень (ДУ) Zn в семенах зернобобовых составлял 50 мг/кг [10].

С помощью линейной аппроксимации экспериментальных данных были рассчитаны критические концентрации Zn в исследованных почвах (табл. 3), начиная с которых выращенная сельскохозяйственная продукция (семена кормовых бобов) будет содержать количества металла, превышающие значение ДУ установленное [9] и максимально-допустимый уровень (МДУ), [11] – 50 мг/кг. Линейная аппроксимация проводилась только в

диапазоне относительно низких исследованных концентраций Zn в почвах (где соблюдается линейная зависимость: $[Zn]_{\text{раст}} = a \times [Zn]_{\text{почва}}$).

Как видно из табл. 3, наименьшее содержание Zn, при котором наблюдалось превышение допустимого уровня содержания металла (50 мг/кг) в семенах кормовых бобов [10, 11] отмечено для дерново-подзолистой супесчаной почвы – всего 38 мг/кг. Аналогично были установлены критические концентрации Zn в исследованных почвах, при которых выращенная сельскохозяйственная продукция (грубые и сочные корма естественной влажности) будет содержать количества металла, превышающие значение установленные МДУ [11] – 50 мг/кг (табл. 3). Учитывая, что содержание сухого вещества в сырой вегетативной массе кормовых бобов составляет 18.3 % [12], массовая доля Zn в сухой биомассе должна быть предварительно пересчитана на сырую биомассу с соответствующим поправочным коэффициентом. Полученные результаты также приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения критических концентраций Zn в разных почвах при выращивании кормовых бобов

Общее содержание Zn в почве (мг/кг), при которой наблюдается: превышение ДУ [10] и МДУ [11] Zn в семенах		
Дерново-подзолистая супесчаная	Чернозем выщелоченный	Болотная торфяная низинная
38	115	233
Общее содержание Zn в почве (мг/кг), при которой наблюдается: превышение и МДУ Zn в кормах естественной влажности		
75	347	596

Наименьшее содержание Zn, при котором наблюдалось превышение допустимого уровня содержания металла (50 мг/кг) в сырой биомассе кормовых бобов также было отмечено для дерново-подзолистой супесчаной почвы – 75 мг/кг. На основании полученных данных, можно констатировать, что для кормовых бобов действующие нормативы ОДК Zn в почвах [13] завышены по транслокационному показателю почва – зерно, и занижены – по транслокационному показателю почва – сырая биомасса растений. Т.е, ОДК Zn в почвах нуждаются в уточнении.

К сожалению, в действующем СанПиН 2.3.2.1078-01 [14] допустимые уровни содержания цинка в пищевых продуктах (в том числе – в семенах зернобобовых) были не уточнены, а просто исключены из перечня контролируемых показателей (по-видимому, актуализированы в соответствии с международными и европейскими нормативными документами [15, 16], в которых упоминаются только следующие токсичные элементы: As, Cd, Hg, Pb, Sn).

В странах Западной Европы, широко распространены голландские стандарты – контрольные уровни концентраций загрязняющих веществ в почвах (Dutch list) [17], которые накладывают ограничения на использование загрязненных земель и обуславливают необходимость применения восстановительных мер. Согласно голландскому списку допустимая концентрация (target value) Zn в стандартной почве (усредненной по характеристикам почвы Нидерландов) равна 140 мг/кг. При этом содержании металла экологические, агрономические и социальные функции не нарушаются. Стандартной считается почва с содержанием органического вещества 10% и минеральных илестых частиц 25%. Для оценки допустимых концентраций ТМ (включая Zn) в других (нестандартных) почвах используется следующее уравнение:

$$(SW, IW)_b = (SW, IW)_{sb} \times \{A + (B \times \% \text{ clay (grain size} < 2 \mu\text{m)}) + (C \times \% \text{ organic matter})\} / \{(A + (B \times 25) + (C \times 10))\}, \quad (1)$$

где: $(SW, IW)_b$ - значение контрольного уровня (target value) или уровня вмешательства (intervention value) содержания Zn в оцениваемой почве/грунте, $(SW, IW)_{sb}$ - значение

контрольного уровня или уровня вмешательства содержания Zn для стандартной почвы/грунта, % *clay* - процентное содержание в оцениваемой почве илистых частиц (эффективный диаметр <2 мкм), % *organic matter* - процентное содержание в оцениваемой почве органического вещества (гумуса), A, B, C – константы, характерные для каждого тяжелого металла. Для Zn: A = 50, B = 3, C = 1.5.

Для дерново-подзолистой супесчаной почвы, к примеру, решение уравнения (1) с соответствующими параметрами позволяет получить значения массовых долей Zn в почвах (мг/кг), соответствующие контрольному уровню и уровню вмешательства:

$$(SW)_b = 140 \times \{[50 + (3 \times 8.75)] + (1.5 \times 1.67)\} / \{(50 + (3 \times 25)) + (1.5 \times 10)\} = 79 \text{ mg/kg}, \quad (2)$$

$$(IW)_b = 720 \times \{[50 + (3 \times 8.75)] + (1.5 \times 1.67)\} / \{(50 + (3 \times 25)) + (1.5 \times 10)\} = 405 \text{ mg/kg}, \quad (3)$$

Полученные значения $(SW)_b$ (табл. 4) в 1.5 раза превышает значение ОДК Zn для супесчаных почв и в 2 раза – для нейтральных суглинистых почв, принятые в России. А если говорить об оцененных уровнях вмешательства $(IW)_b$ для исследованных почв (превышают ОДК более чем в 3 раза), то они в соответствии с [18] характеризуют экологическое состояние почв как «экологическое бедствие».

Таблица. 4. Контрольные уровни и уровни вмешательства содержания Zn для исследованных почв, мг/кг

Тип почвы	Дерново-подзолистая супесчаная	Чернозем слабовыщелоченный	Торфяная болотная низинная
Гумус, %	1.67±0.03	5.13±0.19	21.3±0.9*
Массовая доля фракции (<2μм), %	8.75	33.4	0
Контрольный уровень	79	158	168
Уровень вмешательства	405	813	864

* - зольность торфа, %

Заключение

Показано, что эдафические факторы, определяющие буферную способность почв, в регулировании подвижности Zn в системе почва – растение имеют не менее важное значение, чем биологический фактор (физиологические особенности растений): несмотря на 2-4-х кратное превышение концентрации цинка в черноземе слабо выщелоченном и торфяной низинной почве по сравнению с дерново-подзолистой, концентрация металла (и, соответственно, значения КН) в сухой вегетативной массе кормовых бобов, выращенных на дерново-подзолистой почве в 5 и более раз превышают эти показатели для растений, выращенных на черноземе и торфяной почве.

Существующие гигиенические нормативы уровней содержания ТМ в почвах [13] позволяют «...дифференцированно подходить к оценке эколого-гигиенического состояния почв, расположенных в различных регионах России». Однако, установленные в этих документах значения ОДК (ПДК) ТМ часто (точнее сказать, как правило) не соответствуют реалиям, наблюдающимся в практике земледелия. Так, из перечня объектов нормирования почему-то выпали органогенные почвы (торфяные), являющиеся важной частью сельскохозяйственных угодий (пастбища). Кроме того, поскольку ОДК ТМ в почвах устанавливаются расчетным путем на основании всего лишь одного лимитирующего показателя – перехода (транслокации) ТМ в хозяйственно-ценную часть урожая, то возможны серьезные искажения реальной картины опасности загрязнения сельскохозяйственных угодий ТМ. В целом же, полученные результаты позволяют уточнить особенности транслокации Zn в хозяйственно-ценные части кормовых бобов для разных почв и могут быть полезными при последующем пересмотре нормативов содержания Zn в почвах (не только в зависимости от величины рН и гранулометрического состава, но и, например, в зависимости от типа почвы).

В большинстве стран ЕС принято оценивать степень загрязнения почв с помощью комплексного эколого-токсикологического подхода, базирующегося на концепциях «максимально-допустимого риска» (MRP) и недопустимого негативного эффекта на биоту. Применение вышеуказанного подхода к нормированию содержания загрязняющих веществ в почвах позволило голландским ученым предложить нормативы содержания последних в различных почвах и грунтовых водах (Dutch List), которые к настоящему моменту являются наиболее проработанными и часто используемыми в европейских странах.

В настоящей работе рассчитанные на основании экспериментальных данных значения контрольных уровней (target values, SW_b) и уровней вмешательства (intervention levels, IW_b) содержания Zn в исследуемых почвах, в 1.5 раза превышает значение ОДК Zn для супесчаных почв и в 2 раза - для нейтральных суглинистых почв, принятые в России. А если говорить об оцененных уровнях вмешательства (IW)_b для исследованных почв (превышают ОДК более чем в 3 раза), то они в соответствии с [18] вообще характеризуют экологическое состояние почв как «экологическое бедствие». Подобные различия позволяют утверждать о недостаточной проработанности как отечественного, так и европейского подхода к нормированию содержания тяжелых металлов в почвах.

Примечания:

1. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
2. Агротехнические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
3. Аринушкина Е.В. Химический анализ почв и грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1970. 480 с.
4. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (изд. 2-е, перераб. и дополненное). М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
5. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, ЛО, 1987. 142 с.
6. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. / Под ред. Н.Г. Зырина и Л.К. Садовниковой. М.: Изд-во МГУ, 1985. 208 с.
7. Baker A.J.M. Accumulators and excluders – Strategies in the response of plants to heavy metals // Journal of Plant Nutrition. 1981. Vol. 3. P. 643-654.
8. Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений и поиски рудных месторождений: автореф. дисс. д-ра геолого-минералогических наук. М., 1983. 49 с.
9. Первунина Р.И., Зырин Н.Г. Миграция соединений кадмия в модельном агробиоценозе // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах: тр. II Всесоюзного совещания, Обнинск, ноябрь 1978 / Под ред. Бобовниковой Ц.И., Малахова С.Г. ИЭМ. Л.: Гидрометеиздат, 1980. С. 182–191.
10. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.3.2.560-96 «Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов». М., 1996
11. Временный максимально-допустимый уровень (ВМДУ) химических элементов в кормах сельскохозяйственных животных, № 123-41281-87 от 15.07.87 г
12. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments // IAEA-TECDOC-1616. IAEA. Vienna. 2009. 615 p.
13. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10с.
14. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078-01». М.: ФГУП «Интер СЭН», 2002. 168 с.
15. Codex General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (Amended 2013) Codex Stan 193-1995
16. Commission Regulation (EC) No 1881/2006. Official Journal of the European Union. 2006. L. 364/5-364/24
17. Dutch Target and Intervention Values, 2000 (the New Dutch List). Version, februari 4th. URL: http://www.esdat.net/Environmental_Standards.aspx

18. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. М.: МООСипР РФ, 1992. 55с.

References:

1. Kabata-Pendias A (2011) Trace elements in soils and plants. 4-th edition. CRC Press, London. 505 p. (in Russian)
2. Methods for agrochemical soil survey (1975) М.: Nauka, Moscow. 656 p. (in Russian)
3. Arinushkina EV (1970) Chemical analysis of soils and sediments. MSU Publ., Moscow. 480 p. (in Russian)
4. Methodological guides for HM determination in farm soils and plant products (edition 2 revised and enlarged) (1992) М.: CINAО 61 p. (in Russian)
5. Alekseev Y.V. (1987) Heavy metals in soils and plants L.: Agropromizdat 142 p. (in Russian)
6. Chemistry of heavy metals, arsenic and molybdenum in soils (1985) / Eds. Zyrin N.G. and Sadovnikova L.K. М.: Izd-vo MGU 208 p. (in Russian)
7. Baker A.J.M. Accumulators and excluders – Strategies in the response of plants to heavy metals // Journal of Plant Nutrition. 1981. Vol. 3. P. 643-654.
8. Kovalevsky AL (1983) Biogeochemistry of plants and search for ore deposits. Abstract of a thesis of doctor of geological-mineralogical sciences. Moscow. 49 p. (in Russian)
9. Pervunina RI and Zyrin NG (1980) The migration of cadmium compounds in the model agrobiocenosis. Proceedings of II All-Union Conference "Migration of contaminants in soils and adjacent environments". Obninsk, November 1978 /Ed. by Bobovnikova TS.I., Malakhov SG. (Institute of Experimental Meteorology). Gidrometeoizdat. Leningrad. P. 182-191. (in Russian)
10. Sanitary rules and regulations SanPiN 2.3.2.560-96 "Hygienic requirements for quality and safety of food raw materials and food products" (1996) Moscow. (in Russian)
11. Provisional maximum permissible level (MPL) of chemical elements in fodders of farm animals (1987) № 123-41281-87 of 15.07.87. (in Russian)
12. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments //IAEA-TECDOC-1616. IAEA. Vienna. 2009. 615 p.
13. Estimated allowable concentration (EAC) of chemical substances in the soil: Hygienic standards (2009) Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Moscow. 10 p.
14. Hygienic requirements for safety and nutritional value of food products. Sanitary and Epidemiological Norms and Regulations SanPin 2.3.2.1078-01 (2002) Moscow: FGUP Inter SEN 168 p. (in Russian)
15. Codex General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (Amended 2013) Codex Stan 193-1995
16. Commission Regulation (EC) No 1881/2006. Official Journal of the European Union. 2006. L. 364/5-364/24
17. Dutch Target and Intervention Values, 2000 (the New Dutch List). Version, februari 4th. URL: http://www.esdat.net/Environmental_Standards.aspx
18. Criteria for assessing the ecological environment areas to identify areas of ecological emergency and zones of ecological disaster (1992) Moscow: MOOSiPR RF. 55 p. (in Russian)

УДК 631.453 633.31/37 581.5

Оценка миграционной способности Zn в системе почва-растение

- ¹ Вячеслав Сергеевич Анисимов
- ² Лидия Николаевна Анисимова
- ³ Людмила Митрофановна Фригидова
- ⁴ Дмитрий Владимирович Дикарев
- ⁵ Руслан Алексеевич Фригидов
- ⁶ Илья Владимирович Кочетков
- ⁷ Наталья Ивановна Санжарова

¹⁻⁷ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
Российская Федерация
249032 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе

¹ Кандидат биологических наук, заведующий лабораторией
E-mail: vsanisimov@list.ru

² Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
E-mail: lanisimovan@list.ru

³ Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
E-mail: rus3386@gmail.com

⁴ Младший научный сотрудник

⁵ Младший научный сотрудник
E-mail: rus3386@gmail.com

⁶ PhD (Biology), senior researcher
E-mail: ikochetkoff@gmail.com

⁷ Доктор биологических наук профессор, член-корреспондент Российской академии наук,
заместитель директора института
E-mail: natsan2004@mail.ru

Аннотация. В вегетационном опыте изучены закономерности миграции Zn в системе почва – растение в зависимости от типа почвы и концентрации металла. Определены показатели миграции Zn с использованием в качестве тест-культуры кормовых бобов (*Vicia faba* L.). Рассчитаны пороговые концентрации Zn в дерново-подзолистой супесчаной, торфяной болотной низинной почвах и черноземе слабовыщелоченном тяжелосуглинистом. Установлено, что эдафические факторы играют не менее важную роль в регулировании подвижности Zn в системе почва – растение, чем физиологические особенности растений. Представлены различные подходы к нормированию содержания Zn в почвах

Ключевые слова: цинк, кормовые бобы, подвижность, биологическая доступность, коэффициент накопления, фитотоксичность, нормирование