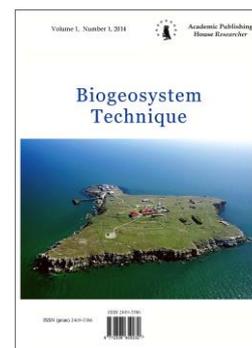


Copyright © 2017 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic  
Biogeosystem Technique  
Has been issued since 2014.  
ISSN: 2409-3386  
E-ISSN: 2413-7316  
2017, 4(1): 25-38

DOI: 10.13187/bgt.2017.1.25  
[www.ejournal19.com](http://www.ejournal19.com)



UDC 581.5

## Mechanism of Migration Processes of Heavy Metals (Zn, Cu, Pb, Cd) in Agroecosystems by the Example of Cabbage and Fodder Beet (Root Crops)

Tatyana V. Perevolotskaya <sup>a, \*</sup>, Vyacheslav S. Anisimov <sup>a</sup>, Lidia N. Anisimova <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

### Abstract

The studies of heavy metals behaviour into the components of “soil – plant” system is an important task of contemporary ecology, focused on scientific substantiation of permissible limits of man impact to natural complexes and agroecosystems, and control and regulation of chemical elements content in plant products. The paper presents an analysis of heavy metals migration in the system “soil – agricultural plants” based on accumulation coefficients of Cu, Zn, Pb, Cd on example of cabbage and fodder beet (root crops). The analysis was performed by statistical methods.

It was detected that distributions of accumulation coefficients of Cu, Zn, Pb, Cd for cabbage and fodder beet (root crops) in most cases do not follow the normal distribution law. It was shown that in the range of considered chemical elements the distributions of accumulation coefficients for cabbage could be presented as descending order: Zn > Cu > Cd > Pb.

It was established that soil type determines 52 % of variations of Cu accumulation in fodder beet (Fisher's ratio test is 9.22 at confidence level of  $p=0.0019$ ). To the greater degree a variation of Zn accumulation in fodder beet could be caused by unsuspected factors (82 %). In this case the influence of soil type has also a higher probability (Fisher's ratio test is 2.0423 at confidence level of  $p=0.12$ ), that highlights the significant effect of soil type on the processes of microelements accumulation by plant organism.

**Keywords:** heavy metals, accumulation coefficient, soil type, factor, chemical elements.

### 1. Введение

Из огромного числа разнообразных химических веществ, поступающих из антропогенных источников, обладающих высокой токсичностью и способностью включаться в биологический круговорот особое место занимают тяжелые металлы (ТМ) (Перельман, 1975; Дабахов и др., 2001; Adriano, 2001; Башкин, Касимов, 2004; Kabata-Pendias., 2011). ТМ во многом определяют риски для окружающей среды (Motuzova et al., 2014) конфликт биосферы и агроэкоцистем (Glazko V., Glazko T., 2015), здоровье почвы (Глинушкин и др., 2016). Их миграция и перераспределение в компонентах экосистемы зависят как от целого комплекса природных факторов, так и от интенсивности и характера техногенеза (Прохорова, Матвеев, 1996; Sparks, 2005; Anisimov et. al., 2015; Анисимов и др., 2016).

Установлено что, попадая на поверхность почвы, ТМ медленно удаляются при выщелачивании, потреблении растениями, эрозии, дефляции (Iimura et. al., 1977;

\* Corresponding author

E-mail addresses: [forest\\_rad@mail.ru](mailto:forest_rad@mail.ru) (T.V. Perevolotskaya)

Vazdyrev, 2001; Adriano, 2001). Первый период полуудаления для Zn составляет от 70 до 510 лет, для Cd – от 13 до 1100 лет, для Cu – от 310 до 1500 лет, для Pb – от 740 до 5900 лет (Ильин, Сысо, 2012).

Согласно результатам исследований растения поглощают из окружающей среды в больших или меньших количествах практически все известные химические элементы (Школьник (ред.), 1983; Ильин, 1985; Полевой, 1988; Greger, 1999; Min, 2007; Milner, 2008; Битюцкий, 2011). Но ввиду существования биогеохимических барьеров растения способны противостоять вредному влиянию находящихся в почве ТМ (Перельман, 1975; Цветкова, 1977; Baker, 1981; Baker et al., 2000; Нестерова, 1991; Cobbett, 2000; Cobbett et. al., 2002; Селезнева и др., 2005; Анисимов и др., 2013). Одни исследователи указывают на большую аккумуляцию ТМ в надземных органах (Шиханов, Юлушев, 1984), другие в корнях растений (Ильин, 1973; Diez, Krauss, 1992). Отмечаются различия концентраций ТМ в разных надземных органах (листья, стебли, плод), что объясняется видоспецифичностью метаболизма растений и физико-химическими свойствами самих элементов (Foy et. al., 1978, Godzik, 1991; Barber, 1995; Baldantoni et. al., 2009). Некоторые исследователи указывают на неоднозначную зависимость между доступностью ТМ для растений и их содержанием в разных частях растений (Второва, 1993). В исследованиях авторы широко обсуждают различные методические проблемы количественного изучения содержания ТМ в компонентах экосистем. Миграция и аккумуляция ТМ в почвах и природно-территориальных комплексах связана с комплексообразованием и ассоциацией ионов в почвенных растворах, которая во многом обуславливает эффект биогеохимических барьеров на границе «почва и ризосфера – растение» (Минкина и др., 2012; Ендовицкий и др., 2014; Endovitsky et al., 2014; Batukaev et al., 2016; Endovitsky et al., 2016; Kalinichenko, 2016a; Kalinichenko, 2016b).

Зависимость между содержанием ТМ в почве и их накоплением в растении нелинейная, она существенно варьирует в зависимости от условий эксперимента. Чем лучше в эксперименте или *in situ* условия для обеспечения функции биогеохимического барьера, тем в большей степени растение в состоянии обеспечить достижение генетически определенного ему вещественного состава, тем меньше зависимость вещественного растения от вещественного состава субстрата ризосферы. Наоборот, если возможности живого растения для реализации собственного потенциала формирования биогеохимического барьера на границе «почва и ризосфера – растение» исключены или слабые, то растение попадает в тяжелейшие условия органогенеза – клеточный сок практически полностью наследует вещественный состав почвенного раствора субстрата. Если субстрат загрязнен, то органогенез растения складывается настолько неблагоприятно, что возможны даже изменения в растении на генетическом уровне (Kwasniewska, 2014).

Исследование накопления ТМ в растениях важно для оценки состояния самого растения, а также и для научного обоснования допустимых пределов антропогенного воздействия на природно-территориальные комплексы и их отдельные элементы, а также для практических целей фиторемедиации почв (Прохорова, Матвеев, 1996; Chaney, 1997; Blaylock, 1999).

Разнообразие процессов, влияющих на поведение ТМ, обуславливает особенности статистических характеристик их содержания и распределения в почвах.

Цель исследования – выявить закономерности миграционных процессов ТМ с использованием статистических процедур на примере коэффициентов накопления (КН) Cu, Zn, Pb, Cd для капусты и свеклы кормовой (корнеплоды).

## 2. Объекты и методы

Анализ миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственные растения» проводили на основе систематизации накопленных литературных данных (Свидетельство о государственной регистрации..., 2016), представленных КН Cu, Zn, Pb, Cd на примере капусты и свеклы кормовой (корнеплоды) умеренной климатической зоны с применением методов статистического анализа: описательная статистика, индуктивная статистика, дисперсионный анализ (Лакин, 1990).

Допущения, принятые при исследовании миграции ТМ Cu, Pb, Zn, Cd в системе «почва – сельскохозяйственные растения» методами статистического анализа, следующие:

- принятый критический уровень значимости  $p=0,05$ ;
- при анализе рассматривались ТМ (Cu, Zn, Pb, Cd), которые относятся к числу приоритетных как для фонового мониторинга окружающей среды, так и экологических оценок территории;
- КН представляется отношением концентрации элемента в сухой массе растений к валовому (или общему) содержанию ТМ в почве (мг/кг сухого растения)/(мг/кг почвы). В качестве независимого показателя использовались массовые доли валового или общего содержания ТМ (Cu, Pb, Zn, Cd) в почвах;
- полученные результаты статистического анализа данных миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственные растения» носят оценочный характер.

### 3. Результаты и их обсуждение

На предварительном этапе статистического анализа выполнена проверка распределения коэффициентов накопления Cu, Pb, Zn, Cd для капусты, произрастающей на дерново-подзолистых (П<sup>Д</sup>), дерново-глубокоподзолистых (П<sup>Д</sup><sub>3</sub>) почвах, черноземе выщелоченном (Ч<sup>В</sup>) и черноземе типичном (Ч<sup>Т</sup>) умеренной климатической зоны (Табл. 1).

**Таблица 1.** Результаты статистической оценки распределения КН Cu, Pb, Zn, Cd для капусты, произрастающей на исследованных типах почв

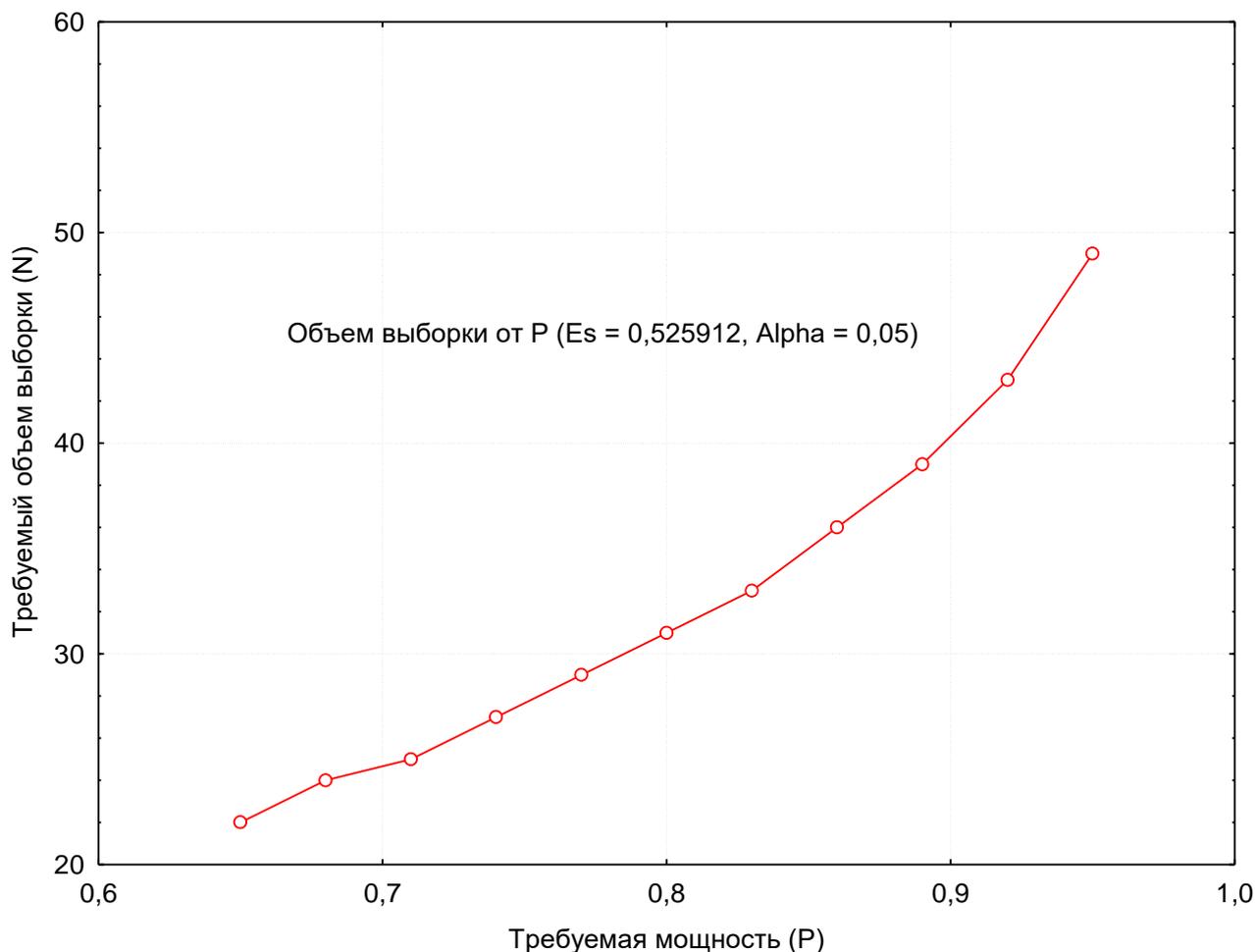
Тип почвы	Среднее	Медиана (Me)	Стандартное отклонение	Нижний квартиль	Верхний квартиль	As	Ex
коэффициент накопления Zn							
П <sup>Д</sup>	0,3499	0,1681	0,4198	0,0473	0,6287	1,2073	-0,3895
П <sup>Д</sup> <sub>3</sub>	0,0282	0,0282	0,0171	0,0164	0,0411	0	0
Ч <sup>В</sup>	0,0343	0,0242	0,0203	0,0192	0,0521	0,9874	-0,8927
Ч <sup>Т</sup>	0,3025	0,3076	0,0766	0,2234	0,3765	-0,301	0
коэффициент накопления Cu							
П <sup>Д</sup>	0,0554	0,0280	0,0521	0,0148	0,1018	1,0186	-0,0667
Ч <sup>Т</sup>	0,0854	0,0853	0,0506	0,0469	0,1239	0,0099	-0,7102
коэффициент накопления Pb							
П <sup>Д</sup>	0,0667	0,0667	0,0236	0,0500	0,0833	0	0
П <sup>Д</sup> <sub>3</sub>	0,0047	0,0047	0,0014	0,0035	0,0059	0	0
Ч <sup>В</sup>	0,0064	0,0064	0,0019	0,0039	0,0078	0,4872	-1,0915
коэффициент накопления Cd							
П <sup>Д</sup>	0,0016	0,0016	0,0007	0,0010	0,0021	0	0

Сопоставление значений среднего и медианы свидетельствует об отклонении распределения КН Zn и Cu от нормального для капусты, произрастающей на П<sup>Д</sup> почвах, что подтверждается рассчитанным критерием Шапиро-Уилка: Zn –  $W=0,729$ ,  $p=0,00162$ ; Cu –  $W=0,819$ ,  $p=0,0156$  (Табл. 1).

Несмотря на то, что по результатам проверки наблюдаются сопоставимые значения средних величин КН Zn и КН Pb по П<sup>Д</sup><sub>3</sub>, КН Cu по Ч<sup>Т</sup>, КН Pb и КН Cd по П<sup>Д</sup> типам почв, гипотезу о распределении КН близкому к нормальному применять не корректно. В данном случае результат можно объяснить малым объемом выборки (от 2 до 4), что определяет принятие ошибки I рода (ошибка первого рода – если на самом деле верной является нулевая гипотеза, а будет принята альтернативная гипотеза  $p(H_1/H_0)=\alpha$ , ошибка второго рода – если на самом деле верной является альтернативная гипотеза, а будет принята нулевая гипотеза  $p(H_0/H_1)=\beta$ ). В таких случаях, для описания асимметричных распределений, рекомендуется Me (50-й процентиль) и интерквартильный размах (интервал между 25-м и 75-м процентелями распределения). Следует отметить, что самое высокое значение КН цинка (медиана и интерквартильный размах) 0,3076 (от 0,2234 до 0,3765)

наблюдается для капусты, произрастающей на черноземе типичном, а минимальное – на ПДЗ и ЧВ (Табл. 1).

Для того чтобы определить какой объем выборки должен быть использован для получения надежных оценок и какова вероятность того, что статистический тест будет обнаруживать экспериментальные эффекты данной величины проведен анализ мощности статистических критериев и оценка объема выборки. Графический анализ статистической мощности и объема выборки показывает, что мощность достигает уровня 0,8 (обычно минимально допустимый уровень) на выборке, состоящей из 31 наблюдения (Рис. 1).



**Рис. 1.** Взаимосвязь мощности критерия и объема выборки исследуемых химических элементов для капусты

При этом следует отметить, что по мере того, как увеличивается объем выборки, происходит увеличение мощности одностороннего статистического критерия, и тем больше вероятность получения надежных оценок при описании распределения КН элементов.

Оценка степени влияния исследованных типов почв на КН Cu, Pb, Zn для капусты проведена на основе дисперсионного анализа (Табл. 2). Полученные результаты свидетельствуют о незначительной степени влияния исследованных типов почвы на КН Cu, Pb, Zn для капусты ( $p > 0,05$ ), что можно объяснить малым объемом выборок и случайной вариацией признака. При этом следует отметить, что для КН Zn и Pb данный фактор определяет влияние на общую вариацию признака 24 % и 30 %, соответственно (Табл. 2).

Для установления существенности частных различий в распределениях между КН Zn и КН Pb применен критерий Краскела-Уоллиса (Табл. 3).

**Таблица 2.** Оценка степени влияния исследованных типов почв на КН Cu, Pb, Zn для капусты

Источник дисперсии	Степени свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	Критерий Фишера	Уровень значимости	Сила влияния фактора, %
<b>коэффициент накопления Zn</b>						
Тип почвы	3	1,3858	0,4619	2,2272	0,1148	24
Ошибка	21	4,3555	0,2074			
Всего	24	5,7413				
<b>коэффициент накопления Cu</b>						
Тип почвы	1	0,0556	0,0556	0,1950	0,6650	1,3
Ошибка	15	4,2830	0,2855			
Всего	16	4,3387				
<b>коэффициент накопления Pb</b>						
Тип почвы	2	1,3936	0,6968	2,2961	0,1511	31
Ошибка	10	3,0346	0,3034			
Всего	12	4,4283				

Анализируя полученные результаты можно указать достоверное различие характеристик КН Zn и КН Pb между исследуемыми типами почв для капусты: критерий Краскела-Уоллиса:  $H(3, N=25)=17,765$ ,  $p=0,0005$  и критерий Краскела-Уоллиса:  $H(2, N=13)=6,685$ ,  $p=0,035$ , соответственно (табл. 3).

**Таблица 3.** Результаты согласно критерию Краскела-Уоллиса

Тип почвы	Допустимый объем	Сумма Ряды
<b>коэффициент накопления Zn</b>		
критерий Краскела-Уоллиса: $H(3, N=25)=17,765$ , $p=0,0005$		
П <sup>д</sup>	12	209,00
П <sup>д</sup> <sub>3</sub>	2	9,00
Ч <sup>в</sup>	8	46,00
Ч <sup>т</sup>	3	61,00
<b>коэффициент накопления Pb</b>		
критерий Краскела-Уоллиса: $H(2, N=13)=6,685$ , $p=0,0353$		
П <sup>д</sup>	3	36,00
П <sup>д</sup> <sub>3</sub>	2	9,00
Ч <sup>в</sup>	8	46,00

Вероятность различия КН Cu между типами почв также достаточно высока, критерий Вальда-Вольфовица:  $Z=1,346$ ,  $p=0,1784$ .

В результате проведенного статистического анализа данных миграции ТМ в системе «почва – сельскохозяйственные растения» на примере Cu, Pb, Zn, Cd для капусты произрастающей на П<sup>д</sup>, П<sup>д</sup><sub>3</sub>, Ч<sup>в</sup> и Ч<sup>т</sup> выявлено:

– проверка распределения КН Zn Cu и Pb для капусты на П<sup>д</sup> почвах свидетельствует об отклонении распределения КН от нормального, критерий Шапиро-Уилка: Zn –  $W=0,729$ ,  $p=0,00162$ ; Cu –  $W=0,819$ ,  $p=0,0156$ . Сопоставимые значения средних величин (среднее и медиана) распределения КН Zn Cu и Pb П<sup>д</sup><sub>3</sub>, Ч<sup>в</sup> и Ч<sup>т</sup> типам почв не позволяют сделать вывод

о распределении КН элементов близкому к нормальному, что объясняется малым объемом выборки (от 2 до 4);

– результаты дисперсионного анализа свидетельствуют о незначительной степени влияния исследованных типов почвы на КН Cu, Pb, Zn ( $p > 0,05$ ), что можно объяснить малым объемом выборок, случайной вариацией признака, но также и действием индивидуальных для каждого вида растения, причём зависящих от свойств почвы и условий органогенеза, биогеохимических барьеров. При этом следует отметить, что для КН Zn и Pb данный фактор определяет влияние на общую вариацию признака 24 % и 30 %, соответственно;

– достоверное различие характеристик КН Zn и КН Pb между исследуемыми типами почв для капусты, критерий Краскела-Уоллиса:  $H(3, N=25)=17,765$ ,  $p=0,0005$  и критерий Краскела-Уоллиса:  $H(2, N=13)=6,685$ ,  $p=0,0353$ , соответственно. Вероятность различия КН Cu между типами почв также достаточно высока (критерий Вальда-Вольфовица:  $Z=1,346$ ,  $p=0,1784$ );

– распределение КН Cu, Pb, Zn, Cd для капусты, в разрезе исследуемых элементов, можно представить в виде убывающего ряда:  $Zn > Cu > Cd > Pb$ . Наибольшая средняя величина КН цинка (медиана и интерквартильный размах) 0,3076 (от 0,2234 до 0,3765) наблюдается для капусты, произрастающей на Ч<sup>г</sup>, а минимальная – на П<sup>д</sup><sub>3</sub> и Ч<sup>в</sup>.

На основании предположения о нормальности распределения выполнена проверка распределения КН Cu, Pb, Zn, Cd для свеклы столовой (корнеплоды), произрастающей на П<sup>д</sup>, Ч<sup>в</sup> и каштановых (К) почвах (Табл. 4).

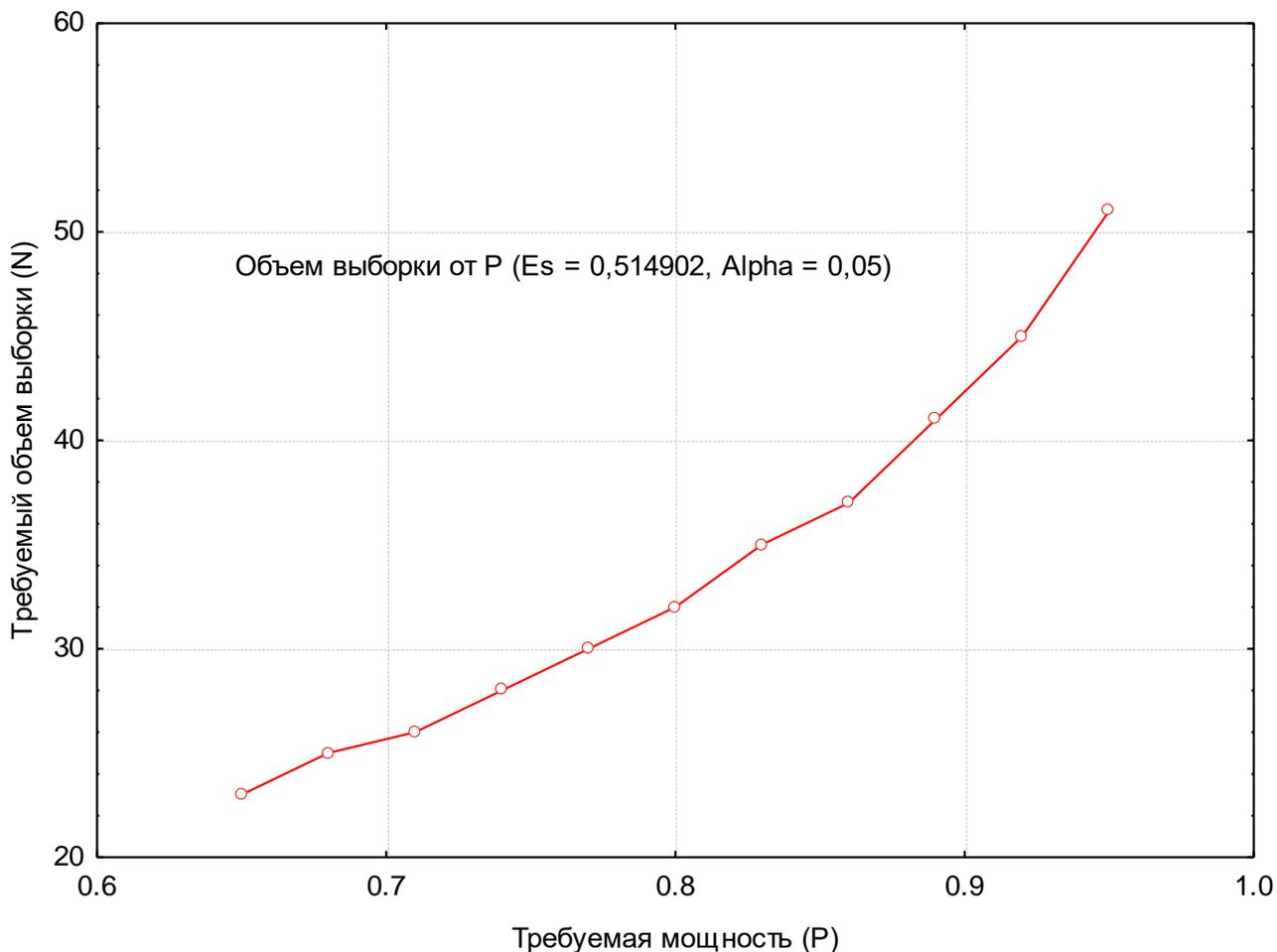
**Таблица 4.** Результаты статистического анализа распределения КН Cu, Pb, Zn, Cd для свеклы столовой (корнеплоды)

Тип почвы	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Нижний квартиль	Верхний квартиль	As	Ex
коэффициент накопления Zn							
П <sup>д</sup>	1,0744	1,0756	0,4524	0,6830	1,4659	-0,0012	-5,954
К	1,1509	0,9381	0,2341	0,8726	1,2481	0,3501	-1,852
Ч <sup>в</sup>	0,7880	0,7880	0,0877	0,7260	0,8500		
коэффициент накопления Cu							
П <sup>д</sup>	0,4336	0,2873	0,2919	0,2437	0,7697	1,6888	
К	0,2945	0,3419	0,1366	0,1618	0,4087	-0,3089	-1,270
Ч <sup>в</sup>	0,8025	0,8025	0,0530	0,7650	0,8400		
коэффициент накопления Cd							
П <sup>д</sup>	0,8781	0,8772	0,9002	0,0986	1,6577	0,0001	-5,997
коэффициент накопления Pb							
К	0,0009	0,0005	0,0006	0,0004	0,0012	1,3655	0,6601

Согласно анализу результатов проверки на нормальность распределения КН для свеклы (корнеплоды), произрастающей на каштановых почвах, можно констатировать близкое к нормальному распределение КН Zn, критерий Шапиро-Уилка  $W=0,7878$ ,  $p=0,0026$ , распределение КН Cu не подчиняется закону нормального распределения, что подтверждается критерием Шапиро-Уилка  $W=0,9248$ ,  $p=0,2285$ . Сопоставимые значения средних величин (среднее и медиана) КН исследуемых элементов для всех остальных почв позволяют выдвинуть предположение о нормальности распределения КН, однако следует указать, что небольшой объем выборок (от 2 до 4), а также количественные характеристики показателей вариации (Табл. 4) определяют принятие ошибки первого рода.

Результаты анализа мощности статистических критериев и оценка объема выборки свидетельствуют, что для получения надежных оценок при статистическом описании распределения КН элементов для свеклы (корнеплоды) достичь мощности одностороннего критерия 0,8 возможно на выборке, состоящей из 32 наблюдений (Рис. 2). Увеличение мощности одностороннего критерия до 0,9 определяет увеличение объема выборки до 42 наблюдения и, тем самым, большую вероятность получения надежных оценок при

статистическом описании распределения КН элементов для свеклы кормовой (корнеплоды). Для дальнейшего анализа КН исследуемых элементов рекомендуют применять медиану (Me) и интерквартильный размах (Табл. 4).



**Рис. 2.** Взаимосвязь мощности критерия и объема выборки исследуемых химических элементов для свеклы кормовой (корнеплоды)

В целом следует отметить, что КН Zn и КН Cu характеризуются наибольшими значениями средних величин: медиана (интерквартильный размах) для всех исследованных типов почв: КН Zn – от 0,7880 (от 0,7260 до 0,8500) на Ч<sup>В</sup> до 0,9381 (от 0,8726 до 1,2481) на К почвах; КН Cu – от 0,2873 (от 0,2437 до 0,7697) на П<sup>Д</sup> до 0,8025 (от 0,7650 до 0,8400) на Ч<sup>В</sup>. Наименьшие значения средних величин КН Pb наблюдаются при произрастании свеклы на каштановых почвах – 0,0005 (от 0,0004 до 0,0012). Таким образом, значение средних величин КН Zn несколько выше для каштановых почв относительно дерново-подзолистых и чернозема выщелоченного, наибольшее значение КН Cu отмечено для Ч<sup>В</sup>, наименьшее – для каштановых почв. Кадмий отличается высокой мобильностью в системе «почва – растение»: среднее значение КН Cd на П<sup>Д</sup> для свеклы составляет 0,8772 (от 0,0986 до 1,6577) (Табл. 4).

Результаты оценки степени влияния типа почвы на КН Cu и Zn для свеклы кормовой (корнеплоды) с применением метода дисперсионного анализа представлены в табл. 5. Согласно результатам дисперсионного анализа, такой фактор как тип почвы определяет 52 % вариации КН Cu. Варьирование КН Zn, предположительно, в большей степени может быть обусловлено неучтенными факторами (82 %). При этом следует указать, что влияние типа почвы имеет высокую вероятность (критерий Фишера составляет 2,0423 при уровне значимости  $p=0,15$ ) (Табл. 5).

**Таблица 5.** Оценка степени влияния исследованных типов почв на КН Cu и Zn

Источник дисперсии	Степени свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	Критерий Фишера	Уровень значимости	Сила влияния фактора, %
коэффициент накопления Zn						
Тип почвы	2	29,990	14,9952	2,0423	0,15	18
Ошибка	18	132,161	7,3423			
Всего	20	162,152				
коэффициент накопления Cu						
Тип почвы	2	0,4714	0,2357	9,22	0,0019	52
Ошибка	17	0,4344	0,0256			
Всего	19	0,9058				

Результаты анализа данных миграции ТМ Cu, Pb, Zn, Cd в системе «почва – сельскохозяйственные растения» на примере свеклы кормовой (корнеплоды), произрастающей на П<sup>д</sup>, Ч<sup>в</sup> и каштановых (К) почвах в условиях умеренной климатической зоны позволяют констатировать, что в большинстве вариантов распределение КН Cu, Pb, Zn, Cd не подчиняется закону нормального распределения.

Наибольшими значениями средних величин (медиана и интерквартильный размах) для всех исследованных типов почв характеризуются КН Zn и КН Cu:

– значения средних величин КН Zn для Ч<sup>в</sup> фиксируется на уровне 0,7880 (от 0,7260 до 0,8500), а для П<sup>д</sup> оно возрастает до 1,0756 (от 0,6830 до 1,4659);

– значения средних величин КН Cu составляют 0,2873 (от 0,2437 до 0,7697) для П<sup>д</sup>, а для Ч<sup>в</sup> 0,8025 (от 0,7650 до 0,8400).

Тип почвы определяет 52 % вариации КН Cu для свеклы (критерий Фишера составляет 9,22 при уровне значимости  $p=0,0019$ ), это очень высокий показатель, он свидетельствует, что в эксперименте, данные которого взяты в расчёт, биогеохимический барьер на границе «почва и ризосфера – растение» функционировал относительно слабо. Согласно расчёту, варьирование КН Zn в решающей степени обусловлено неучтенными факторами (82 %), но при этом влияние типа почвы имеет статистически значимую вероятность (критерий Фишера составляет 2,0423 при уровне значимости  $p=0,15$ ), в этом случае биогеохимический барьер на границе «почва и ризосфера – растение», функционировал достаточно эффективно, отстраивая влияние ТМ, содержащихся в почве, на растение.

#### 4. Заключение

Анализ миграции тяжёлых металлов в системе «почва – сельскохозяйственные растения» с применением статистических методов позволяет констатировать, что в большинстве своем, распределения КН Cu, Pb, Zn, Cd для капусты и свеклы кормовой (корнеплоды) не подчиняются закону нормального распределения.

Распределения КН Cu, Pb, Zn, Cd для капусты, в разрезе исследуемых элементов, можно представить в виде убывающего ряда: Zn > Cu > Cd > Pb. Наибольшая средняя величина КН цинка (медиана и интерквартильный размах) 0,3076 (от 0,2234 до 0,3765) наблюдается для капусты, произрастающей на черноземе типичном, а минимальная – на П<sup>д3</sup> и Ч<sup>в</sup>. Такой фактор как тип почвы определяет 24 % вариации КН Zn и 30 % КН Pb для капусты.

Наибольшими значениями средних величин (медиана и интерквартильный размах) для всех исследованных типов почв характеризуются КН Zn и КН Cu для свеклы кормовой (корнеплоды). Среднее значение КН Zn фиксируется на уровне 0,7880 (от 0,7260 до 0,8500) на Ч<sup>в</sup>, а на П<sup>д</sup> оно возрастает до 1,0756 (от 0,6830 до 1,4659). Среднее значение КН Cu составляет 0,2873 (от 0,2437 до 0,7697) на П<sup>д</sup>, а на Ч<sup>в</sup> 0,8025 (от 0,7650 до 0,8400). Тип почвы определяет 52 % вариации КН Cu и 18 % КН Zn для свеклы кормовой (корнеплоды).

Результаты проведенного статистического анализа позволяют констатировать, что влияние на процессы накопления микроэлементов растительным организмом оказывает

множество факторов. Можно заключить, что фактор типа почвы является существенным, статистически значимо обуславливая часть изменчивости использованных в расчёте данных.

Применение системного подхода при исследовании миграции Cu, Pb, Zn, Cd в системе «почва – сельскохозяйственные растения» методами статистического анализа позволило на основе систематизации данных и их количественного описания посредством основных статистических показателей, а также сопоставления значимости и характера влияния факторов, выявить закономерности накопления ТМ исследуемыми видами растительности. Полученные результаты могут быть применены для дальнейшей разработки и усовершенствования стратегии статистических исследований, и в процедурах принятия управленческих решений при производстве овощей на различных почвах в условиях загрязнения ТМ.

### Литература

**Анисимов и др., 2013** – Анисимов В.С., Санжарова Н.И., Анисимова Л.Н., Гераськин С.А., Дикарев Д.В., Фригидова Л.М., Фригидов Р.А., Белова Н.В. (2013). Оценка миграционной способности и фитотоксичности Zn в системе почва-растение // *Агрехимия*, № 1, С. 64–74.

**Анисимов и др., 2016** – Анисимов В. С., Кочетков И. В., Дикарев Д. В., Анисимова Л.Н., Корнеев Ю. Н., Фригидова Л. М. (2016). Влияние физико-химических характеристик почв на биологическую доступность природного и радиоактивного цинка // *Почвоведение*, № 8, С. 942–954.

**Баздырев и др., 2004** – Баздырев Г.И., Пронина Н.Б., Родригес Д.Р. Тяжелые металлы в системе почва–растение на склоновых землях // *Известия ТСХА*. 2001. Вып. 2. С. 81–104.

**Башкин, 2004** – Башкин В.Н., Касимов Н.С. (2004). Биогехимия. М.: Научный мир, 648 с.

**Битюцкий, 2011** – Битюцкий Н.П. (2011). Микроэлементы высших растений. СПб.: Изд-во С.-Петербург. гос. ун-та, 368 с.

**Второва, 1993** – Второва В.Н. (1993). Изменчивость элементного состава у представителей родов *Populus*, *Lycium* и *Tamarix* на засоленных почвах // *Ботанический журнал*, Т. 78, С. 17–33.

**Глинушкин и др., 2016** – Глинушкин А.П., Соколов М.С., Торопова Е.Ю. (2016). Фитосанитарные и гигиенические требования к здоровой почве. М.: «Издательство Агрорус», 288 с.

**Дабахов и др., 2001** – Дабахов М.В., Дабахова Е.В., Титова В.И. (2001).. Экотоксикология тяжелых металлов. Н. Новгород: НГСХА, 135 с.

**Ендовицкий и др., 2014** – Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Минкина Т.М. Состояние свинца и кадмия в черноземе после внесения фосфогипса // *Почвоведение*, 2014, № 3, С. 340–350, doi:10.7868/S0032180X14030058

**Ильин, 1973** – Ильин В.Б. (1973). Биохимия и агрохимия микроэлементов в южной части Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 389 с.

**Ильин, 1985** – Ильин В.Б. (1985). Элементарный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 129 с.

**Ильин, Сысо, 2012** – Ильин В.Б., Сысо А.И. (2012). Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва – растение, Новосибирск: Изд-во СО РАН, 220 с.

**Лакин, 1990** – Лакин Г.Ф. (1990). Биометрия. М.: Высш. шк., 352 с.

**Минкина и др., 2012** – Минкина Т.М., Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Федоров Ю.А. (2012). Карбонатно-кальциевое равновесие в системе вода-почва. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 376 с.

**Нестерова, 1991** – Нестерова А.Н. (1991). Изменение организации меристемы главных корней проростков кукурузы при действии некоторых тяжелых металлов // *Владивосток: Современные проблемы экологии и анатомии растений: Материалы 2 Всесоюзного совещ.* 10 – 16 сент. 1990, С. 109–111.

**Перельман, 1975** – Перельман А.И. (1975). Геохимия ландшафтов. М: Выс. Шк., 342 с.

**Полевой, 1988** – Полевой В.В. (1989). Физиология растений. М.: Высшая школа, 464 с.

**Прохорова, Матвеев, 1996** – Прохорова Н.В., Матвеев Н.М. (1996). Тяжелые металлы в почвах и растениях в условиях техногенеза // *Вестник СамГУ*, № 3. С. 125–148.

Свидетельство о государственной регистрации..., 2016 – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016621301, 22 сентября 2016 г. «Систематизация результатов исследований по миграции тяжелых металлов ТМ в системе почва – сельскохозяйственные растения».

Селезнева и др., 2005 – Селезнева Е.М., Анисимов В.С., Гончарова Л.И., Анисимова Л.Н., Белова Н.В. (2005). Влияние свинца и ультрафиолетового излучения на продуктивность растений и накопление металла в зерне ярового ячменя // *Агрехимия*, № 5, С. 82–86.

Цветкова, 1977 – Цветкова Н.Н. (1977). Микроэлементы в жизни степного леса, Днепропетровск: Вопросы степного лесоведения и охраны природы, С. 50–54.

Шиханов, Юлушев, 1984 – Н.С. Шиханов, И.Г. Юлушев (1984). О фоновом содержании некоторых микроэлементов в растениях на территории Кировской области. Пермь: Рациональное использование и охрана лугов Урала, С. 127–131.

Школьник (ред.), 1983 – Растения в экстремальных условиях минерального питания: Эколого-физиологические исследования. Под ред. М.Я. Школьника и Н.В. Алексеевой-Поповой. Л.: Наука, 1983. С. 140–148.

Anisimov et al., 2015 – Anisimov V.S., Kochetkov I.V., Dikarev D.V., Anisimova L.N., Korneev Y.N. (2015) Effects of physical-chemical properties of soils on <sup>60</sup>Co and <sup>65</sup>Zn bioavailability // *J. Soils Sediments*, Vol. 15, Is. 11, pp. 2232-2243 doi 10.1007/s11368-015-1153-z.

Adriano, 2001 – Adriano D.C. (2001). Trace elements in terrestrial environments. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg.

Baker, 1981 – Baker A.J.M. (1981). Accumulators and excluders – Strategies in the response of plants to heavy metals // *Plant Nutrition*, Vol. 3, pp. 643-654.

Baker et al., 2000 – Baker A.J.M., McGrath S.P., Reeves R.D., Smith J.A.C. (2000). Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metalpolluted soils. In: Terry N, Banuelos G (eds) *Phytoremediation of contaminated soil and water*. Lewis Publication, Boca Raton.

Baldantoni, 2009 – Baldantoni D, Ligrone R, Alfani A (2009). Macro- and trace-element concentrations in leaves and roots of *Phragmites australis* in a volcanic lake in Southern Italy // *J Geochem Explor* 101:166–174.

Barber, 1995 – Barber S.A. (1995) Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach (second edition). John Wiley & Sons, New York.

Batukaev et al., 2016 – Batukaev Abdulmalik A., Anatoly P. Endovitsky, Andrey G. Andreev, Valery P. Kalinichenko, Tatiana M. Minkina, Zaurbek S. Dikaev, Saglara S. Mandzhieva, and Svetlana N. Sushkova (2016). Ion association in water solution of soil and vadose zone of chestnut saline solonetz as a driver of terrestrial carbon sink // *Solid Earth*, 7, Issue 2, 415-423, doi: 10.5194/se-7-415-2016

Blaylock, 1999 – Blaylock M.J., Haung J.W. (1999). Phytoextraction of metals. In: Raskin I, Ensley BD (eds) *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. Wiley, New York.

Chaney, 1997 – Chaney RL, Malik M, Li YM, Brown SL, Brewer EP, Angle JS, Baker AJM (1997). Phytoremediation of soil metals. *Curr Opin Biotechnol* 8:279–284.

Cobbett, 2000 – Cobbett C. (2000). Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification // *Plant Physiol* 123:825–832.

Cobbett et al., 2002 – Cobbett C., Goldsbrough P. (2002). Phytochelatins and metallothioneins: roles in heavy metal detoxification and homeostasis // *Annu Rev Plant Biol* 53:159–182.

Diez, Krauss, 1992 – Diez Th., Krauss M (1992). Schwermetallgehalte und Schwermetallanreicherung in landwirtschaftlich genutzten B (den Bayerns) // *Bayer. Land. wirt. Jahrb*, B. 69.3 pp. 343-355.

Endovitsky et al., 2014 – Endovitsky A.P., Minkina T.M. Kalinichenko V.P., Batukaev A.A., Dikaev Z.S., Sushkova S.N. (2014). The association of ions in the soil solution of saline soils // *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 9 (2): 238-244, 2014, doi: 10.3844/ajabssp.2014.238.244

Endovitsky et al., 2016 – Endovitsky Anatoly P., Abdulmalik A. Batukaev, Tatiana M. Minkina, Valery P. Kalinichenko, Saglara S. Mandzhieva, Svetlana N. Sushkova, Nikolai A.

Mischenko, Sirojdin Y. Bakoyev, Ali A. Zarmaev, Vaha U. Jusupov (2016). Ions association in soil solution as the cause of lead mobility and availability after application of phosphogypsum to chernozem // *Journal of Geochemical Exploration*, Available online 31 August 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.08.018>

Foy et al., 1978 – Foy C.D., Chaney R.L., White M.C. (1978). The physiology of metal toxicity in plants // *Ann. Rev. Plant. Physiol.*, Vol. 294, pp. 511-566.

Glazko V., Glazko T., 2015 – Glazko Valery I., Glazko Tatiana T. (2015). Conflicts of Biosphere and Agroecosystems // *International Journal of Environmental Problems*, Vol. (1), Is. 1, pp. 4–16, doi: 10.13187/ijep.2015.1.4

Godzik, 1991 – Godzik B. (1991). Accumulation of heavy metals in *Biscutella laevigata* (Cruciferae) as a function of their concentration in substrate // *Pol. Bot. Stud.*, Vol. 2, pp. 241–246.

Greger, 1999 – Greger, M. (1999). Metal availability and bioconcentration in plants, in *Heavy Metal Stress in Plants*, Prasad, M. N. V. and Hagemeyer, J., eds., Springer, Heidelberg,

Iimura et al., 1977 – Iimura R., Ito H., Chino M. (1977). Behaviour of contaminant heavy metals in soil-plant system // Tokyo: Proc. Inst. Sem. SEFMIA, P. 357-364.

Kabata-Pendias, 2011 – Kabata-Pendias A. (2011). Trace elements in soils and plants. London: CRC Press, 505 p.

Kalinichenko, 2016a – Kalinichenko Valery P. (2016). Technologies and Technical Means for Matter Recycling into the Soil (Review) // *International Journal of Environmental Problems*, Vol. (3), Is. 1, pp. 58–85. doi: 10.13187/ijep.2016.3.58

Kalinichenko, 2016b – Kalinichenko Valery P. (2016). Optimizing the Matter Flow in Biosphere and the Climate of the Earth at the Stage of Technogenesis by Methods of Biogeosystem Technique (Problem-Analytical Review) // *International Journal of Environmental Problems*, Vol. (4), Is. 2, pp. 99–130. doi: 10.13187/ijep.2016.4.99

Kwasniewska, 2014 – Kwasniewska J (2014) Molecular Cytogenetics Serves Environmental Monitoring // Published in abstract book of 3<sup>rd</sup> ScienceOne International Conference on Environmental Sciences, Page No. 25. Proceeding <http://thescienceone.com/ices/proceedingsices2014.php> 4/16

Min, 2007 – Min Y., Boging T., Meizhen Y., Aoyana I. (2007). Accumulation of manganese in a hyperaccumulator. *Phytolacca Americana* // *Minerals Eng.* 20:188–190.

Milner, 2008 – Milner M.J., Kochian L.V. (2008). Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system // *Ann. Bot.* 102:3–13.

Motuzova et al., 2014 – Motuzova, G. V., Minkina, T. M., Karpova, E. A., Barsova, N. U. & Mandzhieva, S. S. (2014). Soil contamination with heavy metals as a potential and real risk to the environment // *Journal of Geochemical Exploration*, 144, 241-246, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.026>

Sparks, 2005 – Sparks D.L. (2005) Toxic metals in the environment: the role of surfaces // *Elements* 1:193–197.

## References

Anisimov et al., 2013 – Anisimov V.S., Sanzharova N.I., Anisimova L.N., Geraskin S.A., Dikarev D.V., Frigidova L.M., Frigidov R.A., Belova N.V. (2013). Assessment of the migratory ability and phytotoxicity of Zn in the soil-plant system, *Agrochemistry*, No. 1, pp. 64-74.

Anisimov et al., 2016 – Anisimov VS, Kochetkov IV, Dikarev DV, Anisimova LN, Korneev Yu. N., Frigidova LM (2016). Influence of physical and chemical characteristics of soils on the biological availability of natural and radioactive zinc, *Pochvovedenie*, № 8, pp. 942-954.

Bazdyrev, 2001 – Bazdyrev G.I., Pronina N.B., Rodrigues D.R. (2001). Heavy metals in the soil-plant system on slope lands, *Izvestia TSHA*, Issue 2: 81-104.

Bashkin, 2004 – Bashkin VN, Kasimov NS (2004). Biogeochemistry. M.: The scientific world, 648 p.

Bitjuckij, 2011 – Bitjuckij N.P. (2011). Mikrojelementy vysshih rastenij. S-Pb.: Izd-vo S.Peterb. gos. un-ta, 368 p.

Vtorova, 1993 – Vtorova V.N. (1993). Variability of elemental composition in representatives of the genera *Populus*, *Lycium* and *Tamarix* on saline soils, *Botanical Journal*, T. 78, C.17-33.

Glinushkin et al., 2016 – Glinushkin AP, Sokolov MS, Toropova EY (2016). Phytosanitary and hygienic requirements for healthy soil. M.: "Agrorus Publisher", 288 p.

- Dabakhov et al., 2001 – Dabakhov MV, Dabahova EV, Titova VI (2001). Ecotoxicology of Heavy Metals. N. Novgorod: NGSAA, 135 pp.
- Endovitsky et al., 2014 – Endovitsky A.P., Kalinichenko V.P., Minkina T.M. (2014). State of lead and cadmium in chernozem after making phosphogypsum, *Pochvovedenie*, 3, 340-350, doi:10.7868/S0032180X14030058. (in Russian)
- Ilyin, 1973 – Ilyin V.B. (1973). Biochemistry and agrochemistry of microelements in the southern part of Western Siberia. Novosibirsk: Science, 389 p.
- Ilyin, 1985 – Ilyin V.B. (1985). Elementary chemical composition of plants. Novosibirsk: Science, 129 p.
- Ilyin, Syso, 2012 – Ilyin VB, Syso AI (2012). Heavy Metals and Non-Metals in the Soil-Plant System. Novosibirsk: Izd. SB RAS, 220 p.
- Lakin, 1990 – Lakin G.F. (1990). Biometrics. M: High. Shk., 352 c.
- Minkina et al., 2012 – Minkina T.M., Endovitskii A.P., Kalinichenko V.P. Fedorov Y.A. (2012). Calcium carbonate equilibrium in the system water-soil. Rostov-on-Don: Southern Federal University Publishing, 376 p.
- Nesterova, 1991 – Nesterova A.N. (1991). Changes in the organization of the meristem of the main roots of corn seedlings under the action of some heavy metals. Vladivostok: Modern problems of ecology and plant anatomy: Materials of the 2 All-Union. Sovshch. 10-16 Sept. 1990, pp. 109-111.
- Perelman, 1975 – Perelman AI (1975). Geochemistry of landscapes. M: High. Shk., 342 p.
- Polevoy, 1988 – Polevoy V.V. (1989) Plant physiology. Moscow: Higher School, 464 p.
- Prokhorova, Matveev, 1996 – Prokhorova N.V., Matveev N.M. (1996). Heavy metals in soils and plants in conditions of technogenesis, *Bulletin of Samgoru State University*, No. 3, pp. 125–148.
- Certificate of state registration..., 2016 – Certificate of state registration of the database No. 2016621301, September 22, 2016 «Systematization of research results on the migration of heavy metals in the soil system – agricultural plants».
- Selezneva et al., 2005 – Selezneva E.M., Anisimov V.S., Goncharova L.I., Anisimova L.N., Belova N.V. (2005). The influence of lead and ultraviolet radiation on the productivity of plants and the accumulation of metal in the grain of spring barley, *Agrochemistry*, No 5, pp. 82-86.
- Tsvetkova, 1977 – Tsvetkova N.N. (1977). Trace Elements in the Steppe Forest. Dnipropetrovsk: Questions of Steppe Forest Science and Conservation, pp. 50-54.
- Shikhanov, Yulushev, 1984 – N.Shikhanov, I.G. Yulushev (1984). On the background content of some microelements in the plant in the Kirov region. Perm: Rational use and protection of the meadows of the Urals, pp. 127–131.
- Shkolnik (Ed.), 1983 – Plants in extreme conditions of mineral nutrition: Ecological and physiological studies. Ed. M.Ya. Shkolnik and N.V. Alekseeva-Popova. L.: Science, 1983. pp. 140-148.
- Anisimov et al., 2015 – Anisimov V.S., Kochetkov I.V., Dikarev D.V., Anisimova L.N., Korneev Y.N. (2015) Effects of physical-chemical properties of soils on <sup>60</sup>Co and <sup>65</sup>Zn bioavailability, *J. Soils Sediments*, Vol. 15, Is. 11, pp. 2232-2243, doi: 10.1007/s11368-015-1153-z.
- Adriano, 2001 – Adriano D.C. (2001). Trace elements in terrestrial environments. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg.
- Baker, 1981 – Baker A.J.M (1981). Accumulators and excluders – Strategies in the response of plants to heavy metals, *Plant Nutrition*, Vol. 3. pp. 643-654.
- Baker et al., 2000 – Baker A.J.M., Mcgrath S.P., Reeves R.D., Smith J.A.C. (2000). Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metalpolluted soils. In: Terry N, Banuelos G (eds) *Phytoremediation of contaminated soil and water*. Lewis Publication, Boca Raton.
- Baldantoni, 2009 – Baldantoni D, Ligrone R, Alfani A (2009). Macro- and trace-element concentrations in leaves and roots of *Phragmites australis* in a volcanic lake in Southern Italy, *J Geochem Explor* 101: 166–174.
- Barber, 1995 – Barber S.A. (1995). Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach (second edition). John Wiley & Sons, New York.
- Batukaev et al., 2016 – Batukaev Abdulmalik A., Anatoly P. Endovitsky, Andrey G. Andreev, Valery P. Kalinichenko, Tatiana M. Minkina, Zaurbek S. Dikaev, Saglara S. Mandzhieva, and Svetlana N. Sushkova (2016). Ion association in water solution of soil and vadose zone of chestnut saline solonetz as a driver of terrestrial carbon sink, *Solid Earth*, 7, Issue, 2, 415-423, doi: 10.5194/se-7-415-2016

**Blaylock, 1999** – *Blaylock M.J., Haung J.W.* (1999). Phytoextraction of metals. In: Raskin I, Ensley BD (eds) *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. Wiley, New York.

**Chaney, 1997** – *Chaney RL, Malik M, Li YM, Brown SL, Brewer EP, Angle JS, Baker AJM* (1997). Phytoremediation of soil metals, *Curr Opin Biotechnol* 8:279–284.

**Cobbett, 2000** – *Cobbett C.* (2000). Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification, *Plant Physiol* 123:825–832.

**Cobbett et al., 2002** – *Cobbett C., Goldsbrough P.* (2002). Phytochelatins and metallothioneins: roles in heavy metal detoxification and homeostasis, *Annu Rev Plant Biol* 53: 159–182.

**Diez, Krauss, 1992** – *Diez Th., Krauss M* (1992). Schwermetallgehalte und Schwermetallanreicherung in landwirtschaftlich genutzten B (den Bayerns), *Bayer. Land. wirt. Jahrb*, B.69.3 pp. 343-355.

**Endovitsky et al., 2014** – *Endovitsky A.P., Minkina T.M. Kalinichenko V.P., Batukaev A.A., Dikaev Z.S., Sushkova S.N.* (2014). The association of ions in the soil solution of saline soils, *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 9 (2): 238-244, 2014. doi: 10.3844/ajabssp.2014.238.244

**Endovitsky et al., 2016** – *Endovitsky Anatoly P., Abdulmalik A. Batukaev, Tatiana M. Minkina, Valery P. Kalinichenko, Saglara S. Mandzhieva, Svetlana N. Sushkova, Nikolai A. Mischenko, Sirojdin Y. Bakoyev, Ali A. Zarmaev, Vaha U. Jusupov* (2016). Ions association in soil solution as the cause of lead mobility and availability after application of phosphogypsum to chernozem, *Journal of Geochemical Exploration*, Available online 31 August 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.08.018>

**Foy et al., 1978** – *Foy C.D., Chaney R.L., White M.C.* (1978). The physiology of metal toxicity in plants, *Ann. Rev. Plant. Physiol.*, Vol. 29, pp. 511–566.

**Glazko V., Glazko T., 2015** – *Glazko Valery I., Glazko Tatiana T.* (2015). Conflicts of Biosphere and Agroecosystems, *International Journal of Environmental Problems*, Vol. (1), Is. 1, pp. 4–16. doi: 10.13187/ijep.2015.1.4

**Godzik, 1991** – *Godzik B.* (1991). Accumulation of heavy metals in *Biscutella laevigata* (Cruciferae) as a function of their concentration in substrate, *Pol. Bot. Stud.*, Vol. 2, pp. 241–246.

**Greger, 1999** – *Greger, M.* (1999). Metal availability and bioconcentration in plants, in *Heavy Metal Stress in Plants*, *Prasad, M. N. V. and Hagemeyer, J.*, eds., Springer, Heidelberg,

**Iimura et al., 1977** – *Iimura R., Ito H., Chino M.* (1977). Behaviour of contaminant heavy metals in soil-plant system, Tokyo: Proc. Inst. Sem. SEFMIA, pp. 357–364.

**Kabata-Pendias, 2011** – *Kabata-Pendias A.* (2011). Trace elements in soils and plants. London: CRC Press, 505 p.

**Kalinichenko, 2016a** – *Kalinichenko Valery P.* (2016). Technologies and Technical Means for Matter Recycling into the Soil (Review), *International Journal of Environmental Problems*, Vol. (3), Is. 1, pp. 58–85. doi: 10.13187/ijep.2016.3.58

**Kalinichenko, 2016b** – *Kalinichenko Valery P.* (2016). Optimizing the Matter Flow in Biosphere and the Climate of the Earth at the Stage of Technogenesis by Methods of Biogeosystem Technique (Problem-Analytical Review), *International Journal of Environmental Problems*, Vol. (4), Is. 2, pp. 99–130. doi: 10.13187/ijep.2016.4.99

**Kwasniewska, 2014** – *Kwasniewska J* (2014) Molecular Cytogenetics Serves Environmental Monitoring // Published in abstract book of 3<sup>rd</sup> ScienceOne International Conference on Environmental Sciences, Page No. 25. Proceeding <http://thescienceone.com/ices/proceedingsices2014.php> 4/16

**Min, 2007** – *Min Y., Boging T., Meizhen Y., Aoyana I.* (2007). Accumulation of manganese in a hyperaccumulator. *Phytolacca Americana, Minerals Eng.* 20:188–190.

**Milner, 2008** – *Milner M.J., Kochian L.V.* (2008). Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system, *Ann. Bot.* 102:3–13.

**Motuzova et al., 2014** – *Motuzova, G. V., Minkina, T. M., Karpova, E. A., Barsova, N. U. & Mandzhieva, S. S.* (2014). Soil contamination with heavy metals as a potential and real risk to the environment, *Journal of Geochemical Exploration*, 144, 241-246, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.026>

Sparks, 2005 – Sparks D.L. (2005) Toxic metals in the environment: the role of surfaces, *Elements* 1:193–197.

УДК 581.5

### **Закономерности миграционных процессов тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd) в агроэкосистемах на примере капусты и свеклы кормовой (корнеплоды)**

Татьяна Витальевна Переволоцкая <sup>a, \*</sup>, Вячеслав Сергеевич Анисимов <sup>a</sup>,  
Лидия Николаевна Анисимова <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,  
Российская Федерация

**Аннотация.** Изучение закономерностей поведения тяжелых металлов в компонентах «почва – растение» является важнейшей задачей современной экологии, направленное на научное обоснование допустимых пределов антропогенного воздействия на природные комплексы и агроэкосистемы, контроль содержания химических элементов в растительной продукции и его регулирование. В работе проведен анализ миграции тяжёлых металлов в системе «почва – сельскохозяйственные растения» на основе литературных данных, представленных коэффициентами накопления Cu, Zn, Pb, Cd на примере капусты и свеклы кормовой (корнеплоды) с применением методов статистического анализа. Выявлено, что распределения коэффициентов накопления Cu, Pb, Zn, Cd для капусты и свеклы кормовой (корнеплоды) в большинстве своем, не подчиняются закону нормального распределения. Показано, что в разрезе исследуемых элементов распределения коэффициентов накопления для капусты можно представить в виде убывающего ряда: Zn > Cu > Cd > Pb. Установлено, что тип почвы определяет 52 % вариации накопления Cu для свеклы кормовой (критерий Фишера составляет 9,22 при уровне значимости  $p=0,0019$ ). В большей степени варьирование накопления Zn для свеклы кормовой может быть обусловлено неучтенными факторами (82 %), при этом влияние типа почвы имеет также высокую вероятность (критерий Фишера составляет 2,0423 при уровне значимости  $p=0,15$ ), что указывает на существенное влияние типа почвы на процессы накопления микроэлементов растительным организмом.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, коэффициент накопления, тип почвы, фактор, элементы.

---

\* Корреспондирующий автор  
Адреса электронной почты: [forest\\_rad@mail.ru](mailto:forest_rad@mail.ru) (Т.В. Переволоцкая)