

**УДК 57.014**

## **ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ СВИНЦА И ЦИНКА В АГРОЗЕМАХ ПРЕДГОРНОГО КРЫМА**

*Дубас В. В.<sup>1</sup>, Алексашкин И. В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь,  
Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН,  
Феодосия, Российская Федерация  
E-mail: victoriadubas.VD@gmail.com*

Тяжелые металлы являются одной из основных проблем загрязнения почв современности. В статье рассматривается динамика изменения содержания свинца и цинка в почвах агрогенного ряда, приводятся результаты определения величин рН, количества гумуса в данных почвах. Установлено, что распределение свинца и цинка в представленных почвенных разрезах не превышает кларковых значений. Цинк во всех почвенных разрезах мигрирует неравномерно, увеличивая концентрацию с глубиной в агроземе, развитом на хрящевато-глинистом делювии. Содержание свинца было выявлено в двух из четырех представленных почвенных разрезов. Незначительное повышение его концентрации с глубиной наблюдается также в агроземе, развитом на хрящевато-глинистом делювии. С помощью множественной регрессии были установлены зависимости концентраций анализируемых металлов от величины рН и количества гумуса. Полученные расчетные результаты показали, что при уровне значимости менее 0,05 величина рН и количество гумуса не являются значимым фактором для осуществления миграционных процессов цинка и свинца.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, агроземы, миграция, регрессионный анализ.

### **ВВЕДЕНИЕ**

За последние годы значительно увеличилась антропогенная нагрузка на почвы, не только естественные (природные) и мало трансформированные, но и подверженные регулярным антропогенным изменениям со стороны сельскохозяйственной деятельности. Формирование агрогенных почв до их современного состояния происходило длительный промежуток времени, обусловленный чередованием экстенсивного и интенсивного освоения территорий, активно сопровождавшихся увеличением числа пахотных земель, их переводом из одной категории в другую. Все это в конечном итоге привело к резким ухудшениям состояния почв в пределах полевого севооборота и выводом этих земель из агропроизводственной деятельности. Значительно осложняет настоящую ситуацию активное и порой нерациональное применение удобрений и агрохимикатов различного происхождения.

Изучению вопросов накопления, распределения и миграции тяжелых металлов в агросистемах посвящено множество работ ученых как зарубежных [1–4], так и отечественных [5–7], поэтому общие механизмы их поступления, накопления и

поведения описаны. Основными источниками антропогенного поступления тяжелых металлов в почву являются процессы естественного осаждения из атмосферного воздуха и выпадение с атмосферными осадками. Еще большую угрозу вторичного загрязнения почв Крыма тяжелыми металлами создает орошение сточными водами. По данным [8, 9] для Крымского региона наиболее приоритетным направлением вторичного использования сточных вод является орошение, при этом объем сточных вод, являющихся загрязненными химическими веществами, в том числе тяжелыми металлами, с 2014 года находится в пределах более чем 75 %.

Попадая в почву в результате антропогенной деятельности, тяжелые металлы, особенно их подвижные формы, характеризуются высокими миграционными и аккумулятивными процессами, способствующими их включению в биогеохимические циклы. Особую опасность для живых организмов представляет способность тяжелых металлов при попадании в почву образовывать новые соединения с отличными от природных свойствами. Способность тяжелых металлов выноситься за пределы почвенного профиля, в особенности в произрастающие на них агрокультуры напрямую зависит от свойств почвы, характеризующих ее буферность и защитные возможности [5]. В отличие от почв естественного происхождения, агроземы менее устойчивы к экзогенным процессам и как следствие процессы самовосстановления и самоочищения в них замедлены или вовсе отсутствуют. Поэтому изучение миграционных процессов таких тяжелых металлов как свинец и цинк, относимых к наиболее часто встречаемым в почвах загрязнителям, является актуальной в крымских реалиях задачей.

Целью настоящей статьи является изучение поведения свинца и цинка при вертикальной миграции, осуществляемой в почвах агроземного ряда, широко распространенных в предгорных районах восточного Крыма. Среди основных задач, направленных на решение поставленной цели, следует выделить:

- 1) установление основных морфогенетических характеристик, представленных к исследованию участков агрогенных почв;
- 2) количественное определение основных физико-химических параметров – рН, количество гумуса, содержание свинца и цинка;
- 3) выявление особенностей вертикальной миграции свинца и цинка в зависимости от основных физических (мощность и глубина почвенных горизонтов, рН) и химических (количество гумуса) параметров.

В землепользовании административных районов восточного Предгорья Крыма выделяются почвы агрогенного генезиса – агроземы (в естественных условиях – черноземы предгорные, дерново-карбонатные разновидности почв [10]). Среди них преобладают остаточно-карбонатные подвиды, сформировавшиеся на древнем делювии или элювии, в разной степени эродированные, отличающиеся мощностью гумусового горизонта, содержанием скелета, гранулометрическим и химическим составом как самого почвогрунта, так и почвообразующей породы. Особое значение имеют их качественные и количественные характеристики физико-химических параметров (рН, количество гумуса, тяжелых металлов и др.). Таким образом, объектом исследования выступают агроземы одного из административных районов

Республики Крым – Белогорского района, в большей степени пространственно расположенного в восточной части Предгорной зоны Крымских гор. В свою очередь предметом исследования являются миграционные процессы свинца и цинка, осуществляемых в почвах агрогенного происхождения.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве проектных участков исследований выбрано несколько сельхозугодий, которые в крайнем севообороте использовались под культивацию одной и той же агрокультуры. Размер элементарной единицы площади составлял около 100 м на 100 м, где закладывались почвенные разрезы согласно методу конверта. Диагностика и классификация почв проводились согласно сложившимся к настоящему времени представлениям [11, 12]. Морфогенетические особенности четырех наиболее представительных почвенных разрезов отражены на рис. 1.

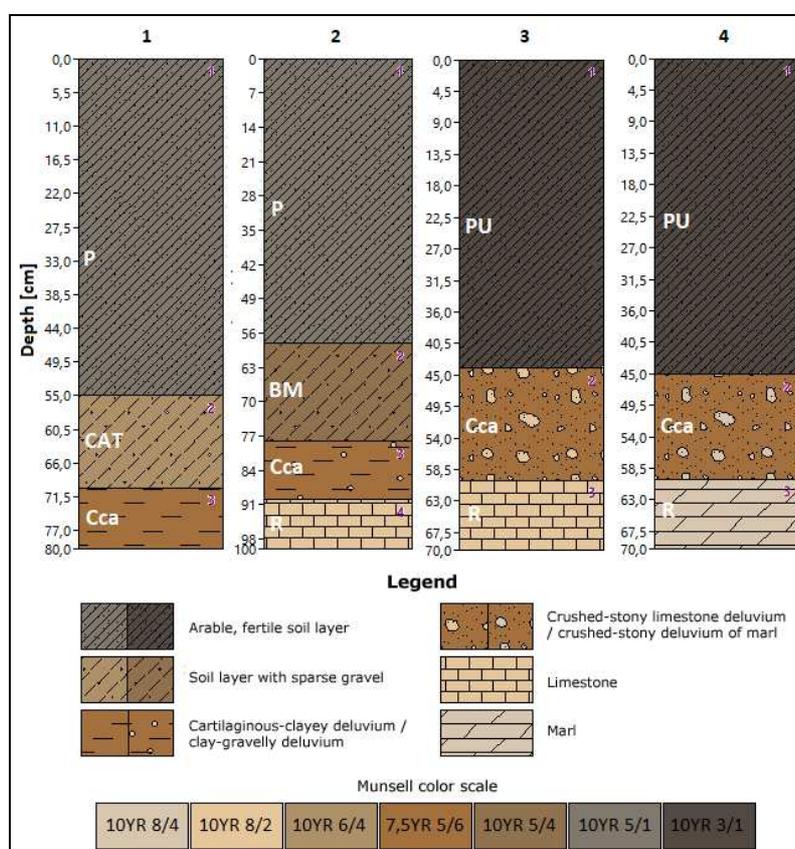


Рис. 1. Морфогенетические особенности агроземов Белогорского района Крыма.

По результатам полевого обследования, каждый из разрезов соответствует следующим разновидностям почв:

- 1 – агрозем текстурно-карбонатный остаточно-карбонатный легкоглинистый слабощебнисто-каменистый на хрящевато-глинистом делювии. Формула: P–CAT–Cca;
- 2 – агрозем структурно-метаморфический остаточно-карбонатный легкоглинистый слабощебнисто-каменистый на глинисто-щебнистом делювии, подстилаемым плотным известняком с глубины 90 см. Формула: P–BM–Cca–R;
- 3 – агрозем темный остаточно-карбонатный легкоглинистый сильнощебнисто-каменистый на щебнисто-каменистом делювии известняка (плотный известняк с глубины 60 см). Формула: PU–Cca–R;
- 4 – агрозем темный остаточно-карбонатный легкоглинистый среднещебнисто-каменистый на щебнисто-каменистом делювии мергеля (плотный мергель с глубины 60 см). Формула: PU–Cca–R.

В природных условиях свинец содержится в минералах, в большинстве своем являющихся халькогенидами. Общее число минералов, содержащих свинец в качестве минералообразователя превышает 300 видов. При этом химический состав распространенных в почвах минералов, содержащих свинец, значительно отличается от аналогичных минералов, содержащихся в земной коре. Кроме того, свинец может поступать в окружающую среду при радиоактивном распаде (в т.ч. природном) некоторых химических элементов, образуя стабильные изотопы  $^{206}_{82}\text{Pb}$ ;  $^{207}_{82}\text{Pb}$ ;  $^{208}_{82}\text{Pb}$  [13]. Антропогенное поступление свинца в почвы агроземного ряда напрямую связано с использованием агрохимикатов, выбросами выхлопных газов автотранспорта (свинец используется как добавка к топливу), переносом и осаждением свинец содержащей пыли (образуется в местах добычи свинцовых руд и как побочный элемент в иных металлических рудах), а также с поливом сточными водами и стоком грунтовых вод. К последним можно отнести водную миграцию свинца, например, от мест свалок, в пределах которых дислоцируются отработанные аккумуляторы, различные краски, металлические сплавы и др. отходы продуктов жизнедеятельности человека, содержащие свинец.

Содержащийся в почвах и земной коре цинк представлен в виде минералов группы карбонатов, силикатов и/или фосфатов. В общей сложности насчитывается более 140 минералов, содержащих цинк в качестве минералообразующего элемента. Основными источниками антропогенного поступления цинка в агрогенные почвы являются различные удобрения, содержащие в своем составе цинк, загрязненные сточные воды и образующиеся в них осадки, пыль, концентрируемая в воздушной среде и в дальнейшем осаждаемая на поверхности почв [14].

Среднее содержание цинка в земной коре А. П. Виноградов оценивал в 0,0083 mass.% (83 ppm), а свинца – 0,0016 mass.% (16 ppm) [15]. В тоже время, S. R. Taylor оценивал содержание цинка в 0,007 mass.% (70 ppm), а свинца в 0,00125 mass.% (12,5 ppm) [16]. Значительные отличия имеют величины кларков рассчитанные В. А. Алексеенко и А. В. Алексеенко для почв селитебных территорий. В частности для пашни кларк цинка составляет 0,009 mass.% (90 ppm), а свинца – 0,002 mass.% (20 ppm) [17].

Содержание химических элементов (качественное и количественное) в почвах полевых агроценозов Белогорского района устанавливали посредством одного из физико-химических методов анализа – рентгенофлуоресцентной спектроскопии

(XANES, EXAFS). Пробы для анализа отбирались из каждого горизонта в объеме около 50–100 г каждая, согласно требованиям ГОСТ 17.4.4.02-84.

Изучение миграционных процессов, происходящих в почвах, является одним из важных подходов к оценке степени антропогенного воздействия на процессы загрязнения и самовосстановления почв и растительность в целом. Миграция в пределах почвенного профиля может осуществляться несколькими способами: за счет движения частиц почв, горных пород и минералов, содержащих тяжелые металлы, при движении влаги (уже содержащейся в почвенной среде и вновь поступающей из атмосферных осадков), содержащей в своем составе растворимые и коллоидные формы соединений металлов, а также при осуществлении процессов сорбции и десорбции. В свою очередь, динамическое равновесие, существующее между компонентами почвы [18], физико-химические свойства фаз почв [19, 20], а также сами особенности определенного типа миграции выступают в качестве основных факторов, оказывающих влияние на вертикальное распределение химических элементов по почвенному профилю. Особое внимание при изучении миграционных процессов следует уделить участкам почв с резко выраженной сменой величин концентрации и/или рассеяния тяжелых металлов, в том числе свинца и цинка. При этом, изучение процессов вертикальной миграции тяжелых металлов, содержащихся в количествах не превышающих кларковых значений (что характерно для регионов, в которых доля крупных промышленных объектов минимальна) не менее важно для общего понимания протекания процессов.

Подходы к проведению качественной и количественной оценки поведения тяжелых металлов в антропогенно-преобразованных в той или иной степени почвах за последнее десятилетие представлены в отечественных и зарубежных трудах. Так, например, в [21], автор производил оценку динамики миграции свинца и цинка в почвах Курской агломерации посредством установления отклика и построения электрокинетических кривых, в [5] авторы производили корреляционный анализ для выявления взаимозависимостей при накоплении, распределении и миграции тяжелых металлов в системе «почва-растение-продукт растениеводства» (на примере Ярославского района), а в [22] авторы прибегают к использованию регрессионных уравнений для оценки вертикальной миграции тяжелых металлов в почвах Оренбургской области.

Оценить динамику миграционных процессов свинца и цинка в зависимости от глубины и с учетом значений pH и количества гумуса позволяет уравнение регрессии экспоненциального вида: (1).

$$C = C_0 \times \exp^{-\lambda x}; \quad (1)$$

где,  $C_0$  – концентрация металла на определенной глубине, mass.%;  $\lambda$  – коэффициент, определяющий интенсивность миграции в зависимости от физико-химических параметров почв;  $x$  – глубина (мощность) почвенного профиля, см [23].

Положительная величина  $\lambda$  отражает увеличение степени концентрации тяжелых металлов в зависимости от глубины, в то время как отрицательные значения указывают на уменьшение степени концентрации и снижение корреляции между концентрацией металлов и интенсивностью миграции по почвенному профилю. Обработка данных производилась с применением методов

математической статистики, посредством использования средств программного пакета STATISTICA.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам элементного анализа количественное распределение свинца и цинка в представленных почвенных разрезах не превышает кларковых значений и имеет следующий вид: рис. 2.

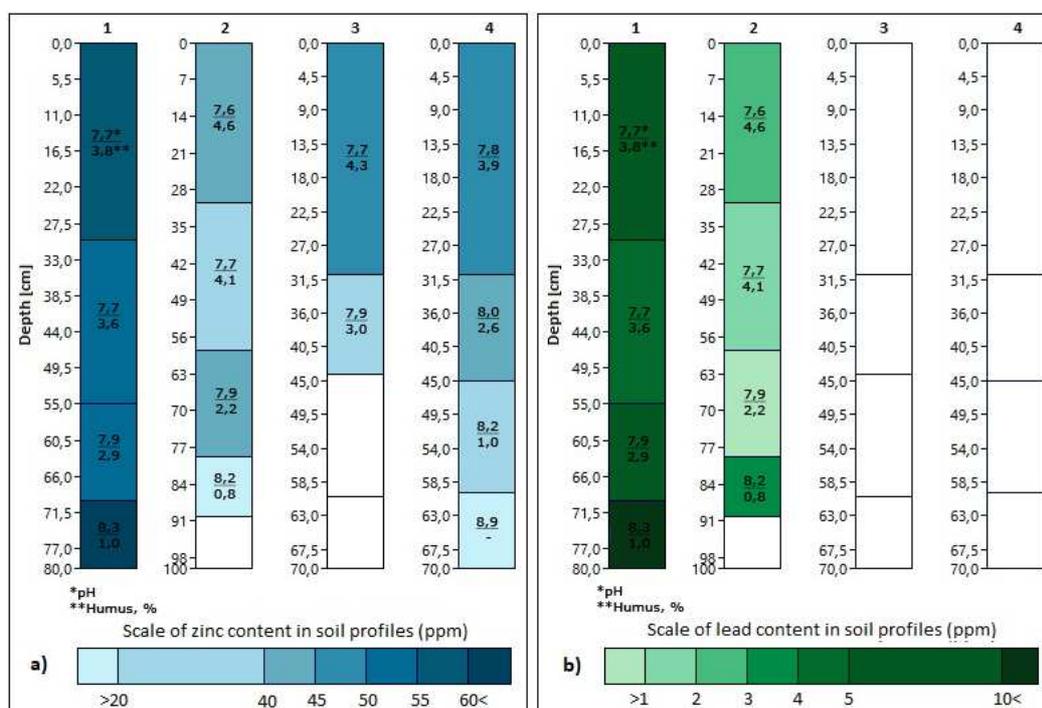


Рис. 2. Количественное распределение цинка (а) и свинца (б) в почвенных профилях.

Концентрации свинца были выявлены в двух из четырех представленных почвенных разрезов. Во 2-м почвенном разрезе отмечается общее уменьшение степени концентрации свинца в зависимости от глубины ( $\lambda = (-0,0036)$ ), в то время как в 1-м разрезе наблюдается незначительное увеличение степени его концентрации с глубиной ( $\lambda = 0,0228$ ). Стандартная ошибка регрессии варьирует также в допустимых пределах (от 0,0002 до 0,0215).

Уравнения регрессии, характеризующие изменения концентрации свинца с глубиной имеют следующий вид:

- для 1го почвенного разреза –  $C(x) = (0,0001) * \exp((0,0228) * x)$ ;
- для 2го почвенного разреза –  $C(x) = (0,0002) * \exp((-0,0036) * x)$ .

Свинец и цинк относятся к катионогенным элементам, обладая повышенной миграционной активностью в кислых средах и пониженной в нейтральных и щелочных. Способность к осаждению у свинца проявляется в нейтральных и кислых условиях среды при этом находясь в растворах с значениями pH >8,0 он сохраняется практически в неподвижном состоянии. В случае резкого увеличения pH и/или его смены с кислого на щелочной образуются щелочные геохимические барьеры в качестве которых могут выступать отдельные почвенные горизонты или их части. Обычно щелочные барьеры формируются на контакте силикатных и щелочных пород, например, при глинистом (С) горизонте (pH < 8,0) подстилаемом плотным известняком (R горизонт) (pH > 9,0).

Установить зависимость концентрации свинца и цинка от величины pH и количества гумуса возможно с помощью множественной регрессии. На основании полученных результатов анализа возможно дальнейшее формирование гипотезы о степени влияния настоящих параметров на миграционные процессы подвижных форм свинца и цинка. В табл. 1 представлены результаты множественной регрессии для цинка.

**Таблица 1**  
**Результаты множественного регрессионного анализа для Zn (коэффициенты)**

Параметр	Почвенный разрез			
	1	2	3	4
Концентрация Zn в почве, mass. %	0,122	0,201	-0,112	0,018
pH	-0,012	-0,024	0,013	-0,002
Количество гумуса, %	-0,005	-0,002	0,002	0,001
Стандартная ошибка регрессии:				
Концентрация Zn в почве, mass. %	0,482	0,034	0,85	0,004
pH	0,056	0,004	0,781	0,001
Количество гумуса, %	0,012	0,001	0,026	0,001

Таким образом можно предположить, что при уровне значимости менее 0,05 величина pH и количество гумуса не являются значимым фактором для осуществления миграционных процессов цинка.

Результаты множественного регрессионного анализа для свинца отражены в табл. 2.

Уравнения связи для свинца имеют следующий вид:

– в 1м почвенном разрезе –  $C(x) = (-0,0083) + 0,011x_1 - 0,0001x_2$ ;

– во 2м почвенном разрезе –  $C(x) = (-0,0162) + 0,0019x_1 + 0,0002x_2$ ;

Таким образом, видно, что, как и в случае с цинком, величина pH и количество гумуса не являются значимым фактором для осуществления миграционных процессов свинца.

**Таблица 2**

**Результаты множественного регрессионного анализа для Pb (коэффициенты)**

Параметр	Почвенный разрез			
	1	2	3	4
Концентрация Pb в почве, mass. %	-0,0083	-0,0162	-	-
pH	0,0011	0,0019	-	-
Количество гумуса, %	-0,0001	0,0002	-	-
Стандартная ошибка регрессии:				
Концентрация Pb в почве, mass. %	0,0813	0,0195	-	-
pH	0,0095	0,0023	-	-
Количество гумуса, %	0,0021	0,0003	-	-

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование профильной миграции тяжелых металлов в почвах агроземного ряда восточного Предгорья Крыма посредством регрессионного анализа показало, что в зависимости от того или иного параметра металлы имеют неодинаковых характер поведения. распределение свинца и цинка в представленных почвенных разрезах не превышает кларковых значений. Цинк во всех почвенных разрезах мигрирует неравномерно, увеличивая концентрацию с глубиной в агроземе, развитом на хрящевато-глинистом делювии. Концентрации свинца были выявлены в двух из четырех представленных почвенных разрезов. Также, как и в случае с цинком, незначительное увеличение концентрации с глубиной наблюдается в агроземе, развитом на хрящевато-глинистом делювии.

С помощью множественной регрессии были установлены зависимости концентраций анализируемых металлов от величины pH и количества гумуса. Полученные расчетные результаты показали, что при уровне значимости менее 0,05 величина pH и количество гумуса не являются значимым фактором для осуществления миграционных процессов цинка и свинца. Что может быть связано, в первую очередь, с исходными значениями концентраций металлов ниже кларковых и указывать на их природное содержание, например, в структуре минералов.

*Работа выполнена в рамках темы № 121032300023-7 «Изучение особенностей структуры и динамики сухопутных экосистем в различных климатических зонах»*

### Список литературы

1. Maharramova S. T. Migration of Heavy Metals in the Agricultural Soil Profile Around the Ganja-Kazakh Zone of the Republic of Azerbaijan / S. T. Maharramova // World Science. – 2022. – №1(73). – P. 1–5.
2. Li J. Distribution and accumulation of heavy metals in soil-crop systems from a typical carbonate rocks area in Guangxi / J. Li, M. Zhan, X. Zhong [et al.] // Acta Scientiae Circumstantiae. – 2021. – Vol. 41. – P. 597–606.

3. Ji Y. Impact of a super typhoon on heavy metal distribution, migration, availability in agricultural soils / Y. Ji, J. Xu, L. Zhu // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 289. – P. 117835.
4. Dube A. Adsorption and Migration of Heavy Metals in Soil / A. Dube, R. Zbytyniewski, T. Kowalkowski [et al.] // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2001. – Vol.10. – P. 1–10.
5. Сенченко М. А. Тяжелые металлы и микроэлементы в системе «почва-растение-продукт переработки растения». / Сенченко М. А., Степанова М. В. – Вестник АПК Верхневолжья. – 2021. – №1(53). – С. 13–18.
6. Schiptsova N. Effect of sewage sludge application on heavy metals contamination in soil and carrot / N. Schiptsova, G. Larionov, O. Vasilyev [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 604, No. 1. – P. 012034.
7. Bezuglova O. Accumulation and migration of heavy metals in soils of the Rostov region, south of Russia / O. Bezuglova, S. Gorbov, S. Tischenko [et al.] // *Journal of Soils and Sediments*. – 2016. – Vol. 16. – P. 1203–1213.
8. Иванютин Н. М. Загрязнение водных объектов Крыма сточными водами / Н. М. Иванютин, С. В. Подовалова // *Экология и строительство*. – 2018. – №1. – С. 4–8.
9. Ляшевский В. И. Мелиоративная характеристика орошаемых земель Крыма / В. И. Ляшевский, М. В. Вердыш // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. – 2018. – № 3(31). – С. 86–99.
10. Драган Н. А. Почвенные ресурсы Крыма: науч. моног. / Н. А. Драган. – 2-е изд. доп. – Симферополь: Доля, 2004. – 208 с.
11. Полевой определитель почв России. – М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. – 182 с.
12. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография / под. ред. А. Л. Иванова, С. А. Шоба. – М.: Почвенный ин-т им В.В. Докучаева, 2014. – 768 с.
13. Водяницкий Ю. Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах / Ю. Н. Водяницкий. – М.: ГНУ Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева Россельхозакадемии, 2009. – 92 с.
14. Robson A. D. Zinc in Soils and Plants / A. D. Robson // *Developments in Plant and Soil Sciences*. – 1993. – Т. 55. – P. 208.
15. Виноградов А. П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры / А. П. Виноградов // *Геохимия*. – 1962. – Вып. 7. – С. 555–571.
16. Taylor S. R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table / S. R. Taylor // *Geochemical et Cosmochimica Acta*. – 1964. – Vol. 28, No. 8. – P. 1273–1285.
17. Алексеев В. А. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитенных ландшафтов / В. А. Алексеев, А. В. Алексеев. – Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2013. – 388 с.
18. Alloway B. J. Chemical principles of environmental pollution / B. J. Alloway, D. C. Ayres. – Oxford, 1993. – 293 p.
19. Перельман А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман, Н. С. Касимов. – М.: Астрель-2000, 1999. – 763 с.
20. Vernet J. P. Heavy metals in the environment / J. P. Vernet. – N.Y., 1991. – 379 p.
21. Неведров Н. П. Профильное распределение и миграция тяжелых металлов в почвах Курской агломерации (модельные опыты) / Н. П. Неведров // *Юг России: экология, развитие*. – 2020. – Т.15 (№1). – С. 60–68.
22. Горшенина Е. Л. Миграция подвижных форм тяжелых металлов в почвах Оренбургской области / Е. Л. Горшенина, И. Н. Алферов, Т. А. Некрасова // *Экология и развитие общества*. – 2019. – № 2(29). – С. 30–32.
23. Ефремов И. В. Оценка динамики концентрации тяжелых металлов по почвенному профилю / И. В. Ефремов, Е. Л. Горшенина, Л. В. Пуйто // *Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: Всероссийская научно-методическая конференция*. – Оренбург: ОГУ, 2013. – С. 125–128.

**SPECIALTYS OF LEAD AND ZINC MIGRATION IN AGROZEMS OF  
PIETHMOUNT CRIMEA**

*Dubas V. V.<sup>1</sup>, Aleksashkin I. V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol', Russian Federation*

<sup>2</sup>*T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS – Branch of A. O. Kovalevsky  
Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Feodosia, Russian Federation*  
*E-mail: victoriadubas.VD@gmail.com*

Heavy metals are one of the main problems of modern soil pollution. Pollution of soils of the agrozem series requires special control, which is associated with the increased vulnerability of such soils (lower resistance to pollutants, slow processes of self-purification and self-recovery) and uncontrolled movement of toxicants, especially beyond the soil profile. The entry of heavy metals from soils into agricultural crops growing on them can not only inhibit plants and reduce yields, but also cause some risks to public health. However, it should also be understood that pollution of agricultural crops occurs most often simultaneously with soil pollution. Heavy metals contained in the atmospheric air enter soils and plants by natural precipitation, together with precipitation, and thus accumulate on the surface of soils and plants, from where, through various geochemical processes, some of them are transferred further. The input of heavy metals together with chemical fertilizers occurs repeatedly and over time they can be transferred to nearby water bodies due to runoff and leaching processes. Re-contamination of both soils and crops can occur when irrigated with wastewater. The profile migration of elements is especially active in the spring-autumn periods, when there are descending flows of soil moisture and its movement in the opposite direction due to absorption by plant roots. All this points to the existing relationship between soil pollution and plants. Most of the works presented earlier took into account only soil pollution, their assessment and considered individual migration processes or pollution of individual crops. That is why, having identified certain concentrations of heavy metals, they should be correlated with indicators that affect the mobility of the metal (pH, amount of humus, mineralogical composition), thereby establishing positive and / or negative dependencies. The study of the profile migration of heavy metals in the soils of the agrozem series of the eastern Foothills of the Crimea by means of regression analysis showed that, depending on one or another parameter, the metals have a different behavior. The article discusses the dynamics of changes in the content of lead and zinc in soils of the agrogenic series, the results of the associated determination of pH values, the amount of humus in these soils are presented. Regression analysis equations were used as a method for assessing the relationship between parameters affecting the mobility of heavy metals. It has been established that the distribution of lead and zinc in the presented soil profiles does not exceed clarke values. Zinc migrates unevenly in all soil sections, increasing its concentration with depth in the agrozem developed on cartilaginous-argillaceous deluvium. Lead concentrations were detected in two of the four presented soil profiles. As in the case of zinc, a slight increase in concentration with depth is observed in the agrozem developed on cartilaginous-argillaceous deluvium. Using multiple regression, the dependences of the concentrations of the analyzed metals on the pH value and the amount of humus were established. The

obtained calculated results showed that at a significance level of less than 0.05, the pH value and the amount of humus are not a significant factor for the implementation of the migration processes of zinc and lead. What can be connected, first of all, with the initial values below the clarke and indicate the natural content of metals, for example, in the structure of minerals.

**Keywords:** heavy metals, agrozems, migration, regression analysis.

### References

1. Maharramova S. T., Migration of Heavy Metals in the Agricultural Soil Profile Around the Ganja-Kazakh Zone of the Republic of Azerbaijan. *World Science*. **1(73)** (2022).
2. Li J., Zhan M., Zhong X., Wang X., Ouyang X. and Zhao X. Distribution and accumulation of heavy metals in soil-crop systems from a typical carbonate rocks area in Guangxi. *Acta Scientiae Circumstantiae*. **41**, 597 (2021).
3. Ji Y., Xu J., Zhu L., Impact of a super typhoon on heavy metal distribution, migration, availability in agricultural soils. *Environmental Pollution*. **289**, 117835 (2021).
4. Dube A., Zbytniewski R., Kowalkowski T., Cukrowska E., Buszewski B., Adsorption and Migration of Heavy Metals in Soil. *Polish Journal of Environmental Studies*. **10**, 1 (2001).
5. Schiptsova N., Larionov G., Vasilyev O., Fadeeva N., Terentyeva M., Effect of sewage sludge application on heavy metals contamination in soil and carrot. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. **604**, 012034 (2020).
6. Bezuglova O., Gorbov S., Tischenko S., Aleksikova A., Tagiverdiev S., Sherstnev A., Dubinina M., Accumulation and migration of heavy metals in soils of the Rostov region, south of Russia. *Journal of Soils and Sediments*. **16**, 1203 (2016).
7. Ivaniutin N. M., The pollution of water bodies in the Crimea by wastewater. *Ecology and construction*. **1**, 4 (2018).
8. Lyashevskiy V. I., Verdysch M. V., Reclamation characteristics of irrigated lands of Crimea. *Scientific journal of the Russian research institute for reclaim problems*. **3(31)**, 86 (2018).
9. Senchenko M. A., Stepanova M. V., Heavy metals and microelements in the «Soil-plant-plant-processed product» system. *Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*. **1(53)**, 13 (2021).
10. Dragan N. A., *Soil resources of Crimea*. p. 208 (Dolya, Simferopol', 2004).
11. *Field determinant of Russian soils*. p. 182 (V. V. Dokuchaev Soil Inst., M., 2008).
12. *Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0*. p. 768 (V. V. Dokuchaev Soil Inst., M., 2014).
13. Vodyanitsky Yu. N., *Heavy and superheavy metals and metalloids in contaminated soils*. p. 92 (V. V. Dokuchaev Soil Inst. of the Russian Agricultural Academy, M., 2009).
14. Robson A. D. Zinc in Soils and Plants. *Developments in Plant and Soil Sciences*. **55**, 208 (1993).
15. Vinogradov A. P. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust. *Geochemistry*. **7**, 555 (1962).
16. Taylor S. R., Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **28(8)**, 1273 (1964).
17. Alekseenko V. A., Alekseenko A. V. *Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of residential landscapes*. p. 288 (SFU Publishing House, Rostov-on-Don, 2013)
18. Alloway B. J., Ayres D. C. *Chemical principles of environmental pollution*. p. 293 (Oxford, 1993)
19. Perelman A. I., Kasimov N. S., *Geochemistry of landscapes*. p. 763 (Astrea-2000, M., 1999)
20. Vernet J. P. *Heavy metals in the environment*. p. 379 (N. Y., 1991)
21. Nevedrov N. P. Profile Distribution and Migration of Heavy Metals in the Soils of the Kursk Agglomeration (Model Experiments). *South of Russia: ecology, development*, **15(1)**, 60 (2020).
22. Gorshenina E. L., Alferov I. N., Nekrasova T. A., Migration of mobile forms of heavy metals in soils of Orenburg region. *Ecology and development of society*. **2(29)**, 30 (2019)
23. Efremov I. V., Gorshenina E. L., Puito L. V., Evaluation of the dynamics of the concentration of heavy metals in the soil profile. *Abstracts of all-Russian scientific and methodological conference "The university complex as a regional center for education, science and culture"* (OSU, Orenburg, 2013), p. 125.