

УДК 550.4.02

## ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРЕДГОРЬЯ КРЫМСКИХ ГОР

Дубас В.В., Алексахин И.В.

Таврическая академия, ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»,

г. Симферополь, Российская Федерация

e-mail: [aligor@rambler.com](mailto:aligor@rambler.com)

Настоящая работа направлена на оценку экологического состояния агроценозов в контексте установления степени загрязненности тяжелыми металлами и выявления особенностей их биогеохимической миграции в различные среды. Для реализации поставленной цели были проведены: полевые работы, включающие в себя отбор проб материала различного генезиса (горные породы, почвы и вегетативные части агрокультур), а также камеральные работы, включающие в себя лабораторные анализы, проявляющиеся в проведении качественного и количественного элементного химического анализа, в проведении на основе полученных данных расчетов величин кларков и коэффициентов концентрации, аккумуляции и/или рассеяния, биофильности, показателя интегрального загрязнения территории и построения на их основе геохимических спектров. В качестве проектной территории намеченных исследований были использованы сельхозугодья расположенные в пределах Русаковского сельского поселения, Белогорского района.

**Ключевые слова:** агроэкосистемы, почвы, тяжелые металлы, кларки, биогеохимическая миграция.

### Введение

Почвы являются основным источником поступления тяжелых металлов в различные экосистемы. В них регулярно происходят процессы накопления, перераспределения и миграции из одной системы в другую различных катионогенных и анионогенных химических элементов, способных оказывать как благоприятное действие для роста и развития растений на микроэлементном уровне, так и негативное воздействие, находясь в избытке (в виде макроэлементов) или недостатке. Растения в таких случаях выступают в качестве промежуточного звена на пути миграции тяжелых металлов из почв в организм животных и/или человека, при этом обладая различным характером действия на них.

Внедрение технологий органического земледелия, предполагает полный отказ от использования удобрений (за исключением органических) и ядохимикатов, означая сведение количества антропогенных источников поступления тяжелых металлов в почвенный слой и растительность на минимальный уровень. Исследование почвенного покрова в данных условиях позволяет оценить уровень содержания и распределения металлов в системе «подстилающая порода – почва – растения», а также смоделировать характер накопления отдельных элементов в агроэкосистеме.

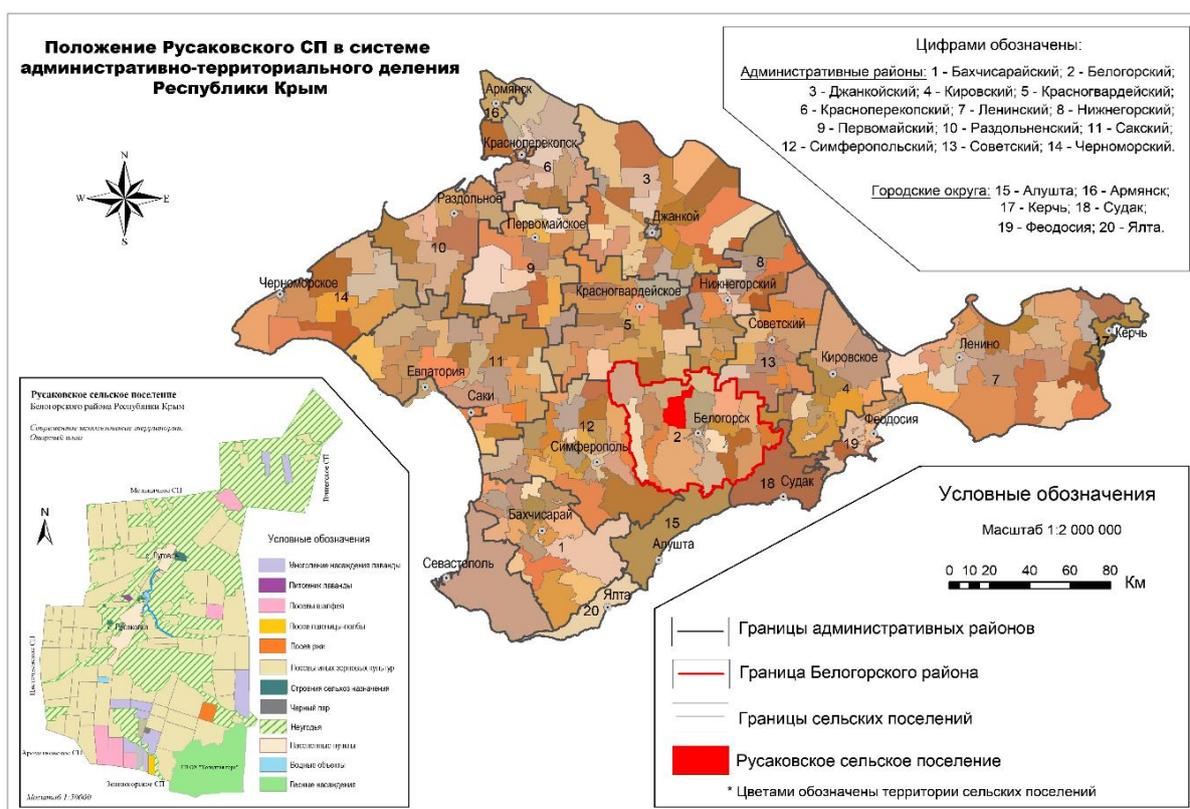
Цель настоящей работы – изучение особенностей биогеохимической миграции некоторых тяжелых металлов в системе «подстилающая порода – почва – сельхозкультура» в пределах сложившегося агроландшафта на территории Русаковского сельского поселения, Белогорского района, Республики Крым.

На основании поставленной цели, реализуются следующие задачи:

- 1) установить поэлементный химический состав образцов;
- 2) произвести геохимическую оценку состояния почвенного покрова на основании рассчитываемых коэффициентов концентрации, аккумуляции, рассеяния и биофильности;
- 3) оценить агроэкологическое состояние почв в пределах анализируемых сельхозугодий.

## Материал и методы

Территория Русаковского сельского поселения (далее – СП) расположена в центральной части Крымского полуострова, в пределах Северного Предгорья, Внешней гряды Крымских гор (рис. 1). В севообороте преобладают зерновые культуры, в меньшем количестве культивируются эфиромасличные культуры (лаванда, шалфей). Основой для возделывания тех или иных агрокультур является почвенный покров. Зональные почвы в предгорном Крыму – это кальций-гумусовые степные почвы – черноземы, относящиеся к автоморфному ряду увлажнения. Они развиваются в плакорных условиях при непромывном водном режиме под травяными ассоциациями, характерными для каждого из этих типов. Интразональные почвы приурочены к участкам территории с наличием локальных факторов почвообразования (близость к поверхности уровня грунтовых вод или специфической материнской породы) (Драган, 2004).



**Рис. 1.** Комплексная картосхема положения Русаковского СП в системе административно-территориального деления Республики Крым и структура современного землепользования территории Русаковского СП (составлено авторами)

На территории сельхозугодий Русаковского СП в качестве зональных почв распространены черноземы предгорные и дерново-карбонатные почвы, а к интразональным следует отнести различные разновидности луговых почв.

Объектом исследования выбраны образцы горных пород, почв и культурных растений, распространенных в пределах Русаковского СП, Белогорского района, Республики Крым. Предметом исследования выступает геохимическое состояние почвенного покрова сельхозугодий Русаковского СП, Белогорского района.

За время проведения полевых работ, осуществляемых в течение 2018–2019 гг. было отобрано около 250 проб различного материала. Места отбора проб устанавливались в зависимости от геологических условий местности, типов почв, выращиваемых в их пределах агрокультур и наличия дополнительных источников

поступления металлов. При отборе почвенных проб применялся метод конверта (согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017). Отбор проб надземной фитомассы осуществлялся в одну фенологическую фазу (зерновые – начало июля 2018 г, эфиромасличные культуры – середина июня 2019 г.). В общей сложности было исследовано более 100 га сельхозугодий.

Качественное и количественное определение химического состава образцов (горных пород и почв) проводилось рентгенофлуоресцентным методом анализа. Предел обнаружения элементов – 0,1 ppm (0,0001%). Подготовка образцов к анализу основывалась на измельчении исходного материала до состояния максимально однородного мелкодисперсного порошка, который в последствии совместно с КВг спрессовывался в таблетки. Исследование растительных структур проводилось после предварительного озоления, полученные результаты пересчитывались с учетом коэффициента озоления на массу воздушно-высушенной пробы. Результаты исследований приведены для наиболее распространенных химических элементов среди опасных металлов (Cu, Co, Cr, Mo, Ni, Pb, Zn), значения для химических элементов, относимых к неметаллам, не учитывались.

Отсутствие объективной системы нормативов, учитывающей геохимические особенности той или иной территории, предопределило необходимость использования кардинально отличающихся от установленных ПДК методик изучения миграций химических элементов в экосистемах и оценки их экологического состояния в целом. Кларк концентрации (Кк) и кларк рассеяния (Кр) рассчитываются по формуле (1) и (2) соответственно (МУ 2.1.7.730-99, 1999):

$$K_k = \frac{C_i}{K}, \quad (1)$$

$$K_p = \frac{K}{C_i}, \quad (2)$$

где,  $C_i$  – содержание  $i$ -го химического элемента в исследуемой геохимической системе (горной породе и/или почве);

$K$  – кларк  $i$ -го элемента в земной коре.

В случае когда рассчитанный кларк превышает единицу ( $K_k > 1$ ), то справедливо говорить о кларке концентрации (Кк) и накоплении тяжелых металлов (ТМ) в системе; при кларке равном единице ( $K_k = 1$ ) говорят об отношении концентраций ТМ равных кларку в земной коре. В некоторых случаях рассчитываемый кларк меньше единицы ( $K_k < 1$ ), что свидетельствует о рассеянии ТМ в системе, поэтому вводят понятие кларк рассеяния (Кр) и производят для большей наглядности расчеты по формуле (2).

Построение геохимических спектров, на основе полученных кларков позволяет сопоставлять и анализировать химические составы различных компонентов экосистемы представляя результаты коэффициентов в более наглядном виде.

Коэффициент аккумуляции (Ка) является частным случаем коэффициента концентрации и определяется для анализа содержания химических элементов в таких смежных системах как подстилающие породы-почвы. Формула для определения данного коэффициента представляет собой следующее (МУ 2.1.7.730-99, 1999):

$$K_a = \frac{C_{i1}}{C_{i2}}, \quad (3)$$

где  $C_{i1}$  – содержание  $i$ -го химического элемента в почве;  $C_{i2}$  – содержание  $i$ -го химического элемента в подстилающей породе.

Коэффициент биологического поглощения (Кб) позволяет проследить миграцию металлов в системе (растения – почва) и рассчитывается по следующей формуле (Перельман, 1975):

$$K_b = \frac{BCi}{CiI}, \quad (4)$$

где  $BCi$  – содержание  $i$ -го химического элемента в живом веществе (растительности);  $CiI$  – содержание  $i$ -го химического элемента в почве.

В случае если  $K_b > 1$ , то химический элемент накапливается в растениях, если  $K_b < 1$ , то растения лишь захватывают тот или иной химический элемент, но не накапливают.

Для расчета коэффициента  $K_b$  проводились измерения концентраций химических элементов в смешанных пробах листьев и стеблей таких сельхоз культур как лаванда узколистная (*Lavandula officinalis*), шалфей мускатный (*Salvia sclarea L.*), пшеница мягкая (*Triticum Vulgare*), рожь (*Secale cereale*) и ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare*).

Изучение распределения и миграции тяжелых металлов в системе «почва – растение» необходимо для установления путей поступления поллютантов в пищевые цепи человека и определения степени опасности для его здоровья. О негативном влиянии тяжелых металлов на организм человека позволяет также говорить показатель интегрального загрязнения территории ( $Z_c$ ), определяемый по формуле ниже (МУ 2.1.7.730-99, 1999):

$$Z_c = \sum(KCi + \dots Kcn) - (n - 1); \quad (5)$$

где  $n$  – число химических элементов, обладающих суммационным эффектом;  
 $KCi$  – коэффициент (кларк) концентрации  $i$ -го элемента.

Применение изложенных выше методов и методик позволяет провести качественную и количественную оценку современного состояния почвенного покрова.

### Результаты и обсуждение

В ходе исследования почвенного покрова на территории Русаковского СП было выделено несколько типов почв: большую часть хозяйства (~60%) занимают черноземы предгорные, около 25% территории приходится на дерново-карбонатные почвы, в виде отдельных участков выделяются луговые почвы (до 4%) приуроченные к местам близкого залегания грунтовых вод (0-0,5 м) и черноземно-луговые почвы (~1%) приуроченные к долине «безымянного ручья». Кроме того, некоторую часть территории СП (~10%) занимают выходы скальных пород. Полученная качественная и количественная характеристика почвенных образцов представлена в таблице 1.

Содержание ТМ в почвах не превышает кларкового, что свидетельствует о нахождении ТМ в рассеянном состоянии. Значительно варьирует количество ТМ по отношению к почвообразующей породе, что обусловлено различным уровнем антропогенного воздействия. Так, в черноземах, развитых на глинах содержание  $Cr$  и  $Zn$  меньше чем в подстилающей породе, а  $Cu$ ,  $Co$ ,  $Mo$ ,  $Ni$  и  $Pb$  больше; в черноземах, образованных на суглинке содержание  $Cr$  и  $Mo$  ниже по отношению к почвообразующей породе, а  $Cu$ ,  $Co$ ,  $Ni$ ,  $Pb$  и  $Zn$  выше; в черноземах, развитых на карбонатных породах (известняк и мергель) наблюдается превышение содержания всех перечисленных металлов над содержанием в почвообразующей породе. Дерново-карбонатная почва характеризуется практически равным количеством свинца по отношению к почвообразующей породе и некоторым превышением остальных металлов. Содержание  $Cu$  и  $Co$  в лугово-черноземной почве несколько выше, чем в подстилающей глине, в то время как в луговой заболоченной почве превышения наблюдаются лишь для меди.

Таблица 1.

**Средневзвешенное валовое содержание ТМ в различных компонентах сельхозугодий**

Компонент агроэкосистемы	Содержание ТМ, массовые %						
	Cu	Co	Cr	Mo	Ni	Pb	Zn
Чернозем предгорный на глинах	0,00465	0,0014	0,00662	0,0001	0,00546	0,00176	0,00765
Чернозем предгорный на суглинке	0,00356	0,00074	0,00398	0,000017	0,00297	0,00159	0,00488
Чернозем предгорный на известняке	0,00095	0,00026	0,00145	-	0,00126	0,00074	0,00075
Чернозем предгорный на мергеле	0,001	0,00086	0,00214	-	0,0014	0,00098	0,00371
Дерново-карбонатная почва	0,00088	0,00043	0,0021	0,00003	0,00121	0,00068	0,0048
Лугово-черноземная почва на глинах	0,00462	0,00162	0,00437	0,000088	0,00531	0,00157	0,0071
Луговая почва на глинах	0,00519	0,00198	0,00696	-	0,00534	0,00181	0,00762
Подстилаящая порода:							
- известняк	0,00053	-	0,001	-	0,00118	0,00064	-
- мергель	0,00061	-	0,002	-	0,00118	0,00058	-
- глина	0,0066	0,00199	0,00814	0,00009	0,00566	0,00181	0,00834
- суглинок	0,00425	0,0013	0,00491	0,00003	0,00296	0,00143	0,00447
<b>Кларк в земной коре (по А.П. Виноградову, 1962)</b>	0,0047	0,0018	0,0083	0,00011	0,0058	0,0016	0,0083

Почвообразующие породы соответствуют глинистым и карбонатным ассоциациям пород. Среднее валовое содержание ТМ в глинах в целом ниже кларкового, а убывающий ряд максимальных значений концентраций имеет следующий вид: Zn, Cr, Ni, Pb, Co, Cu и Mo. Аналогичная ситуация характерна и для суглинка. В карбонатных породах (известняк и мергель) концентрации ТМ также, как и в глинах ниже кларковых величин. Согласно максимальным значениям концентраций ТМ убывающий ряд приобретает следующий вид: Ni, Cr, Pb, Cu в известняке, Ni, Cr, Cu, Pb в мергеле. Концентрации Co, Mo и Zn в анализируемых пробах выявлены не были.

Пониженное содержание химических элементов в почве по отношению к подстилаящей породе – глине и суглинку отчасти отражает сущность миграций металлов, некоторые из которых мигрируют от дневной поверхности вниз по почвенному профилю и концентрируются на подстилаящей породе, образуя геохимические барьеры. В таких условиях возможно также увеличение емкостных свойств почв, что приводит к повышению скорости закрепления металлов, сорбируемых из иных природных сред. В свою очередь несколько повышенное содержание ТМ в почве на фоне подстилаящих карбонатных пород позволяет судить о миграциях металлов в процессе почвообразования (от исходных концентраций в подстилаящей породе к последующим концентрациям в почве).

В ходе проведения анализа растительной золы некоторые химические элементы не определялись, поэтому для дальнейших расчетов использовались наиболее распространенные металлы, обладающие токсическими для живых организмов свойствами. Средневзвешенное содержание Cu, Ni, Pb и Zn приведено в табл. 2, указанные концентрации в большинстве случаев ниже кларковых и лишь значения характерные для меди, свинца и цинка в некоторых случаях показывают несколько повышенные величины на фоне кларковых, при этом не достигая уровня токсических концентраций.

Таблица 2.

## Средневзвешенное валовое содержание ТМ в живом веществе

Тип почвы	Содержание ТМ, в пересчете из мг/кг в массовые %			
	Cu	Ni	Pb	Zn
<b>Лаванда узколистная (<i>Lavandula officinalis</i>)</b>				
Чернозем предгорный на глинах	0,000041	0,0000138	0,000057	0,00183
Чернозем предгорный на мергеле	0,000036	0,000076	0,0000154	0,0019
Дерново-карбонатная почва	0,000039	0,00008	0,000034	0,00191
<b>Шалфей мускатный (<i>Salvia sclarea</i> L.)</b>				
Чернозем предгорный на глинах	0,000028	0,000079	0,000021	0,00094
Дерново-карбонатная почва	0,000031	0,00001	0,00002	0,00101
<b>Пшеница мягкая (<i>Triticum Vulgare</i>)</b>				
Чернозем предгорный на глинах	0,000021	0,000038	0,000056	0,00167
Чернозем предгорный на известняке	0,000038	0,0000456	0,0000142	0,00051
Лугово-черноземная почва на глинах	0,0000173	0,000032	0,00005	0,0023
Луговая почва на глинах	0,000026	0,000028	0,000043	0,00211
<b>Рожь (<i>Secale cereale</i>)</b>				
Чернозем предгорный на известняке	0,00003	0,000041	0,000024	0,00052
Дерново-карбонатная почва	0,000026	0,000038	0,000043	0,00046
<b>Ячмень обыкновенный (<i>Hordeum vulgare</i>)</b>				
Чернозем предгорный на суглинке	0,000026	0,000067	0,0000118	0,0016
Чернозем предгорный на глинах	0,000023	0,000079	0,0000102	0,00181
Дерново-карбонатная почва	0,000024	0,000041	0,000038	0,00094
Луговая почва на глинах	0,000153	0,000019	0,000051	0,00213
<b>Кларк в живом веществе (по А.А. Ярошевскому, 1990)</b>	0,00004	0,00008	0,00005	0,002

Основной путь поступления в почвы и культурные растения свинца в данном случае – аэральный. Прежде всего, это наблюдается в пробах, отобранных в местах, расположенных в непосредственной близости от автодорог, что может быть связано с содержанием тетраэтилсвинца в автомобильном топливе и выделяемом в окружающую среду в составе продуктов сгорания. Следует также принимать во внимание возможность поступления свинца в растения из почв, предварительно загрязненных аэралью и/или за счет природной миграции металла вверх по профилю из горных пород или совместно с ними. Однако, необходимо учитывать, что свинец, поступивший в растение, инактивируется уже в корневой системе и практически не перемещается с восходящим током метаболитов (Алексеев, 2008). В целом, свинец в повышенных концентрациях оказывает негативное воздействие на организм человека: он блокирует сульфгидрильные группы белков, ингибирует некоторые ферменты, вызывает отравления, поражает нервную систему (ГН 2.1.7.020-94, 1994).

Произведенные расчеты коэффициентов концентрации и/или рассеяния позволяют выявить группы химических элементов, находящихся в агросистеме в аккумулярованном и/или рассеянном виде. В табл. 3 представлены рассчитанные величины кларков концентрации (Кк) и рассеяния (Кр).

Геохимические ряды металлов, находящихся в почвах в различных концентрациях, имеют следующий вид:

- $Cu_{(1,01)} - Ni_{(1,06)} - Zn_{(1,08)} - Mo_{(1,1)} - Cr_{(1,25)} - Co_{(1,29)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в черноземах предгорных развитых на глинах различного генезиса. Аккумуляционным эффектом в данной почве обладает  $Pb_{(1,1)}$ ;

- $Pb_{(1,01)} - Cu_{(1,32)} - Zn_{(1,7)} - Ni_{(1,95)} - Cr_{(2,08)} - Co_{(2,43)} - Mo_{(6,47)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в черноземах предгорных развитых на суглинистых отложениях;

- $Pb_{(2,16)} - Ni_{(4,6)} - Cu_{(4,96)} - Cr_{(5,72)} - Co_{(6,92)} - Zn_{(11,06)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в черноземе предгорном образованном на известняке. Кларк концентрации и/или рассеяния для Мо не рассчитывался ввиду отсутствия некоторых исходных данных;

- $Pb_{(1,63)} - Co_{(2,09)} - Zn_{(2,24)} - Cr_{(3,88)} - Ni_{(4,14)} - Cu_{(4,7)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в черноземах предгорных развитых на мергеле. Как и в случае с почвой выше, кларк концентрации и/или рассеяния для Мо не рассчитывался;

- $Zn_{(1,73)} - Pb_{(2,35)} - Mo_{(3,67)} - Cr_{(3,95)} - Co_{(4,19)} - Ni_{(4,79)} - Cu_{(5,34)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в дерново-карбонатных разновидностях почв;

- $Cu_{(1,02)} - Pb_{(1,02)} - Ni_{(1,09)} - Co_{(1,11)} - Zn_{(1,17)} - Mo_{(1,17)} - Cr_{(1,9)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в лугово-черноземной почве развитой на иловато-глинистых отложениях;

- $Pb_{(1,13)} - Cu_{(1,1)} - Co_{(1,1)}$  для химических элементов, обладающих аккумуляционным эффектом,  $Zn_{(1,09)} - Ni_{(1,09)} - Cr_{(1,19)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в луговой заболоченной почве, образованной на иловатой глине. Кларк концентрации и/или рассеяния для Мо не рассчитывался.

Таблица 3.

Кларки ТМ в различных компонентах сельхозугодий

Компонент агроэкосистемы	Кoeffициент	Значения кларков						
		Cu	Co	Cr	Mo	Ni	Pb	Zn
Чернозем предгорный на глинах	Кк	-	-	-	-	-	1,1	-
	Кр	1,01	1,29	1,25	1,1	1,06	-	1,08
Чернозем предгорный на суглинке	Кк	-	-	-	-	-	-	-
	Кр	1,32	2,43	2,08	6,47	1,95	1,01	1,7
Чернозем предгорный на известняке	Кк	-	-	-	*	-	-	-
	Кр	4,95	6,92	5,72	*	4,6	2,16	11,06
Чернозем предгорный на мергеле	Кк	-	-	-	*	-	-	-
	Кр	4,7	2,09	3,88	*	4,14	1,63	2,24
Дерново-карбонатная почва	Кк	-	-	-	-	-	-	-
	Кр	5,34	4,19	3,95	3,67	4,79	2,35	1,73
Лугово-черноземная почва на глинах	Кк	-	-	-	-	-	-	-
	Кр	1,02	1,11	1,9	1,25	1,09	1,02	1,17
Луговая почва на глинах	Кк	1,1	1,1	-	*	-	1,13	-
	Кр	-	-	1,19	*	1,09	-	1,09
Известняк	Кк	-	*	-	*	-	-	*
	Кр	8,87	*	8,3	*	4,91	2,5	*
Мергель	Кк	-	*	-	*	-	-	*
	Кр	7,7	*	4,15	*	4,91	2,76	*
Глина	Кк	1,4	1,11	-	-	-	1,13	1,00
	Кр	-	-	1,02	1,22	1,02	-	-
Суглинок	Кк	-	-	-	-	-	-	-
	Кр	1,11	1,38	1,69	3,67	1,96	1,12	1,86

Примечание: \* – кларки не рассчитывались ввиду отсутствия исходных значений для одного из компонентов агроэкосистемы

Геохимические ряды металлов, находящихся в почвообразующих породах, имеют следующий вид:

- $Pb_{(2,5)} - Ni_{(4,91)} - Cr_{(8,3)} - Cu_{(8,87)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в известняке, для Со, Мо и Zn кларки не рассчитывались;

- $Pb_{(2,76)} - Cr_{(4,15)} - Ni_{(4,91)} - Cu_{(7,7)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в мергеле, для Со, Мо и Zn кларки не рассчитывались;

•  $Cu_{(1,4)} - Pb_{(1,13)} - Co_{(1,11)}$  для химических элементов, обладающих аккумуляционным эффектом,  $Cr_{(1,02)} - Ni_{(1,02)} - Mo_{(1,22)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в глинах,  $Zn_{(1,00)}$  сходен с кларковым значением;

•  $Cu_{(1,11)} - Pb_{(1,12)} - Co_{(1,38)} - Cr_{(1,69)} - Zn_{(1,86)} - Ni_{(1,96)} - Mo_{(3,67)}$  для химических элементов, находящихся в рассеянном виде в суглинке.

На рис. 2 приведены геохимические спектры всех типов исследуемых почв, которые иллюстрируют отличия их химического состава в зависимости от почвообразующей породы. Наиболее контрастное распределение микроэлементов наблюдается при сравнении почв, образовавшихся на глинах с почвами, развитыми на карбонатных породах. Указанные отличия свидетельствуют о значительной геохимической дифференциации горных пород, что характеризуется варьированием в их составе концентраций таких редких металлов, как Pb, Co, Cr.

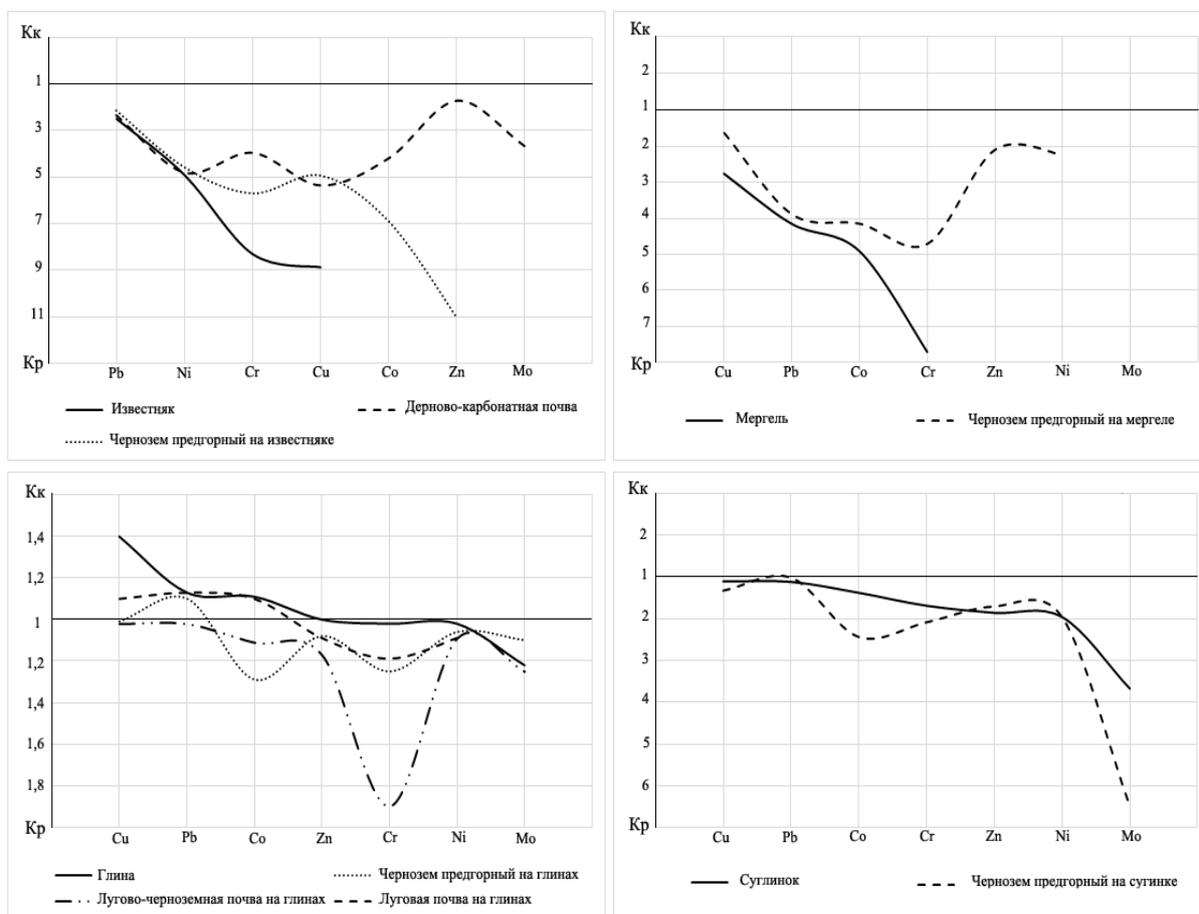


Рис. 2. Геохимические спектры подстилающих пород и почв

Среди осадочных пород возможно выделить отличия химического состава глин от суглинков, в которых происходит аккумуляция Cu, Pb и Co. Практически аналогичная тенденция сохраняется и для почв, образованных на глинистых отложениях. Карбонатные породы, обеднены большинством химических элементов, в известняке отсутствуют такие металлы как Co, Zn, Mo, а в мергеле – Zn, Ni, Mo. В почвах же данная тенденция не наблюдается, что свидетельствует о поступлении указанных элементов извне.

Полученные в ходе анализа значения коэффициента аккумуляции ТМ для смежной системы «подстилающие породы – почвы» представлены в табл. 4. Все значения варьируют в пределах от 0,5 до 2,1.

Биогенная миграция ТМ осуществляется разными видами растений избирательно, что отличает полученные концентрации ТМ в золе от их содержания в компонентах

природной агроэкосистемы. Коэффициент биологического поглощения ТМ для системы «растительность – почва» показывает значения в пределах 0,002–0,693 (табл. 5).

Таблица 4.

**Коэффициент аккумуляции ТМ в системе «подстилаящая порода-почва»**

Компонент агроэкосистемы	Значения Ка1						
	Cu	Co	Cr	Mo	Ni	Pb	Zn
Чернозем предгорный / глина	0,7	0,7	0,81	1,11	0,96	0,97	0,92
Чернозем предгорный / суглинок	0,84	0,57	0,81	0,57	1,00	1,11	1,09
Чернозем предгорный / известняк	1,79	*	1,45	*	1,07	1,16	*
Чернозем предгорный / мергель	1,64	*	1,07	*	1,19	1,69	*
Дерново-карбонатная почва / известняк	1,66	*	2,1	*	1,02	1,06	*
Лугово-черноземная почва / глина	0,7	0,81	0,54	0,98	0,94	0,87	0,85
Луговая почва / глина	0,79	0,99	0,85	*	0,94	1,00	0,91

Примечание: \* – коэффициенты не рассчитывались ввиду отсутствия исходных значений для одного из компонентов агроэкосистемы

Таблица 5.

**Коэффициент аккумуляции ТМ в системе «растительность – почва»**

Компонент агроэкосистемы	Значения Кб			
	Cu	Ni	Pb	Zn
<b>Лаванда узколистная (<i>Lavandula officinalis</i>)</b>				
Чернозем предгорный на глинах	0,009	0,002	0,032	0,239
Чернозем предгорный на мергеле	0,036	0,054	0,016	0,512
Дерново-карбонатная почва	0,044	0,066	0,05	0,398
<b>Шалфей мускатный (<i>Salvia sclarea</i> L.)</b>				
Чернозем предгорный на глинах	0,006	0,014	0,012	0,123
Дерново-карбонатная почва	0,035	0,008	0,029	0,21
<b>Пшеница мягкая (<i>Triticum Vulgare</i>)</b>				
Чернозем предгорный на глинах	0,004	0,007	0,032	0,218
Чернозем предгорный на известняке	0,04	0,036	0,019	0,68
Лугово-черноземная почва на глинах	0,004	0,006	0,032	0,324
Луговая почва на глинах	0,005	0,005	0,024	0,277
<b>Рожь (<i>Secale cereale</i>)</b>				
Чернозем предгорный на известняке	0,032	0,032	0,032	0,693
Дерново-карбонатная почва	0,029	0,031	0,063	0,096
<b>Ячмень обыкновенный (<i>Hordeum vulgare</i>)</b>				
Чернозем предгорный на суглинке	0,007	0,023	0,007	0,005
Чернозем предгорный на глинах	0,005	0,014	0,006	0,237
Дерново-карбонатная почва	0,027	0,034	0,056	0,196
Луговая почва на глинах	0,01	0,004	0,028	0,279

Биогеохимические ряды интенсивности поглощения металлов растениями имеют следующий вид:

- для лаванды узколистной, произрастающей на черноземе предгорном развитом на глинах –  $Zn_{(0,239)}$  –  $Pb_{(0,32)}$  –  $Cu_{(0,009)}$  –  $Ni_{(0,002)}$ ; произрастающей на черноземе предгорном развитом на мергеле –  $Zn_{(0,512)}$  –  $Ni_{(0,054)}$  –  $Cu_{(0,036)}$  –  $Pb_{(0,016)}$ ; произрастающей на дерново-карбонатной почве –  $Zn_{(0,512)}$  –  $Ni_{(0,054)}$  –  $Pb_{(0,016)}$  –  $Cu_{(0,036)}$ ;
- для шалфея мускатного, произрастающего на черноземе предгорном развитом на глинах –  $Zn_{(0,123)}$  –  $Ni_{(0,014)}$  –  $Pb_{(0,012)}$  –  $Cu_{(0,006)}$ ; произрастающего на дерново-карбонатной почве –  $Zn_{(0,21)}$  –  $Cu_{(0,035)}$  –  $Pb_{(0,029)}$  –  $Ni_{(0,008)}$ ;
- для пшеницы мягкой, произрастающей на черноземе предгорном развитом на глинах –  $Zn_{(0,218)}$  –  $Pb_{(0,032)}$  –  $Ni_{(0,007)}$  –  $Cu_{(0,004)}$ ; произрастающей на черноземе предгорном развитом на известняке –  $Zn_{(0,68)}$  –  $Cu_{(0,04)}$  –  $Ni_{(0,036)}$  –  $Pb_{(0,019)}$ ; произрастающей на лугово-

черноземной почве развитой на глинистых отложениях –  $Zn_{(0,324)} - Pb_{(0,032)} - Ni_{(0,006)} - Cu_{(0,004)}$ ; произрастающей на луговой почве развитой на иловатых глинах –  $Zn_{(0,277)} - Pb_{(0,024)} - Ni_{(0,005)} - Cu_{(0,005)}$ ;

- для ржи, произрастающей на черноземе предгорном развитом на известняке –  $Zn_{(0,693)} - Pb_{(0,032)} - Ni_{(0,032)} - Cu_{(0,032)}$ ; произрастающей на дерново-карбонатной почве –  $Zn_{(0,096)} - Pb_{(0,063)} - Ni_{(0,031)} - Cu_{(0,029)}$ ;

- для ячменя обыкновенного, произрастающего на черноземе предгорном развитом на суглинистых отложениях –  $Ni_{(0,023)} - Pb_{(0,007)} - Cu_{(0,007)} - Zn_{(0,005)}$ ; произрастающего на черноземе предгорном развитом на глинах –  $Zn_{(0,237)} - Ni_{(0,014)} - Pb_{(0,006)} - Cu_{(0,005)}$ ; произрастающего на дерново-карбонатной почве –  $Zn_{(0,196)} - Pb_{(0,056)} - Ni_{(0,034)} - Cu_{(0,027)}$ ; произрастающего на луговой почве развитой на иловатых глинах –  $Zn_{(0,279)} - Pb_{(0,028)} - Cu_{(0,01)} - Ni_{(0,004)}$ .

Сопоставив ряды для подстилающих пород, почв и растительности, можно увидеть кардинальные различия, что обуславливается возможностью поступления ТМ в каждый из анализируемых компонентов агроэкосистемы из сторонних источников (к примеру, из атмосферы оседая в виде аэрозольных частиц не только на почвах, но и на растениях, таким образом вовлекаясь в процессы жизнедеятельности).

Оценка уровня загрязнения почв ТМ в пределах агроэкосистем производилась с помощью интегрального показателя степени загрязнения почв ( $Z_c$ ), результаты которого следующие: для разновидностей чернозема предгорного образованного на глинах  $Z_c = 1,1$ ; для луговой заболоченной почвы, развитой на иловатых глинах  $Z_c = 1,33$ . Оба показателя свидетельствуют о допустимой категории загрязнения почв оказывающей наименьшее влияние на живые организмы (в т.ч. здоровье человека). Для всех остальных приведенных в работе типов почв рассчитать показатель  $Z_c$  не представляется возможным и не имеет смысла ввиду содержания металлов в рассеянном виде.

### Выводы

В ходе проведенных исследований установлено отсутствие территорий, загрязненных тяжелыми металлами. Уровень интегрального показателя загрязнения почв для разновидностей чернозема предгорного и луговой заболоченной почвы находится в пределах допустимой категории загрязнения, для остальных почв и вовсе не определяется. На основании результатов данного показателя также можно судить об отсутствии видимого негативного воздействия на организм человека.

Установленные концентрации большинства тяжелых металлов не превышают кларковых величин, исключение составляют черноземы предгорные и луговые почвы, развитые на глинах, что обуславливается несколько повышенными концентрациями металлов в почвообразующей породе и возможностью поступления элементов из окружающей среды. Так, поступление в данные почвы свинца, меди и цинка возможно за счет близкого, а в некоторых случаях пограничного положения с исследуемыми сельхозугодиями дорог общего пользования. В то же время, все фоновые превышения находятся согласно ПДК/ОДК в пределах допустимых уровней концентраций и не представляют опасности.

Рассчитанные коэффициенты аккумуляции в системах «подстилающая порода – почва» и «почва – агрокультура» наглядно отражают процесс миграции микроэлементов из системы в систему. Так, из исходных концентраций металлов, находящихся в породе, некоторая часть элементов мигрирует вверх по почвенному профилю, где претерпевает преобразования, в ходе которых одна часть закрепляется в почве, а другая переходит в растения обеспечивая их процесс жизнедеятельности. Не стоит также исключать возможный процесс выноса химических элементов за пределы почвенного профиля и переход в грунтовые воды.

### Список литературы

1. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в агроландшафте. Санкт-Петербург: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
2. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
3. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.020-94 «Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг)». М., 1994.
4. ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа». М.: Стандартинформ, 2018. 9 с.
5. Драган Н.А. Почвенные ресурсы Крыма. Симферополь: Изд-во «ДОЛЯ», 2004. 209 с.
6. Методические указания МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почв населенных мест». М.: Минздрав России, 1999. 20 с.
7. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
8. Ярошевский А.А. Кларки геосфер // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. С. 7–14.

### PECULIARITIES OF MIGRATION OF HEAVY METALS IN AGROECOSYSTEMS OF THE EASTERN PART OF THE FRENCH OF CRIMEAN MOUNTAINS

Dubas V.V., Aleksashkin I.V.

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation,  
e-mail: [aligor@rambler.com](mailto:aligor@rambler.com)*

This work is aimed at assessing the ecological state of agrocenoses in the context of establishing the degree of contamination with heavy metals and identifying the features of their biogeochemical migration to various environments. To achieve this goal, the following were carried out: field work, including sampling of material of various genesis (rocks, soils and vegetative parts of agricultural crops), as well as desk work, including laboratory analyzes, manifested in the conduct of qualitative and quantitative elemental chemical analysis, in carrying out, based on the obtained data, calculations of clark values and concentration, accumulation and / or scattering coefficients, biophilicity, the integral pollution index of the territory and construction tions on this basis of geochemical spectra. As the project area of the planned studies, farmland located within the Rusakovsky rural settlement, Belogorsky district was used.

**Key words:** agroecosystems, soils, heavy metals, clarks, biogeochemical migration.

Дубас Виктория Викторовна      Обучающаяся кафедры геоэкологии, факультета географии, геоэкологии и туризма, Таврическая академия, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», e-mail: [victoriadubas.VD@gmail.com](mailto:victoriadubas.VD@gmail.com)

Алексашкин Игорь Владимирович      Кандидат химических наук, доцент кафедры геоэкологии, факультета географии, геоэкологии и туризма, Таврическая академия, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»; e-mail: [aligor@rambler.ru](mailto:aligor@rambler.ru)

*Поступила в редакцию 17.12.2019 г.*