

УДК 550.42

МИГРАЦИЯ СВИНЦА И ЦИНКА В ЧЕРНОЗЕМНОЙ ПОЧВЕ В УСЛОВИЯХ ЖЕСТКОГО ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Бондаренко Г.Н., Кононенко Л.В., Высотенко О.А., **Маничев В.И.**, Кузенко С.В.

Бондаренко Г.Н. д. геол.-мин. н., гл. н. с., ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», bogernic34@gmail.com
Кононенко Л.В. к. геол.-мин. н., вед. н. с., ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», lkononenko@gmail.com.
Высотенко О.А. н. с., ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», vysotenkooksana@gmail.com
Кузенко С.В. н. с., ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины»

Проведены экспериментальные исследования форм нахождения техногенных цинка и свинца в черноземной почве в зоне влияния комбината «Укрцинк», которые подтвердили корректность реконструкции динамики трансформации техногенного свинца, предсказавшей, что при высокой степени загрязнения (>1000 мг/кг) накопление мобильных форм свинца происходит столь интенсивно, что способность почвы к иммобилизации загрязнителя исчерпывается, и тем самым почва утрачивает естественную способность к самовосстановлению. Исследование форм нахождения техногенных цинка и свинца в черноземной почве в условиях очень интенсивного, жесткого загрязнения (более 2000 мг/кг) показало, что иммобилизация цинка черноземной почвой практически не происходит, иммобилизация свинца – очень ограничена. Показано, что при высокой степени загрязнения черноземной почвы тяжелыми металлами происходит интенсивная вертикальная миграция техногенных загрязнителей – на глубине 20-30 см отмечаются концентрации Zn на уровне 2-4 г/кг, и Pb – 250-375 мг/кг. Результаты исследований показали, что загрязнение травяной растительности Zn подчиняется линейной зависимости от содержания мобильного Zn в почве. Загрязнение растительности Pb отклоняется от линейной зависимости от содержания мобильного Pb, поглощение его растениями несколько менее интенсивно, чем в случае Zn. Такое отличие может объясняться разными ролями этих металлов в жизнедеятельности растений. Наиболее загрязненной тяжелыми металлами оказывается растительность на участках, характеризующихся высоким содержанием их мобильных форм на глубине более 10 см, что может свидетельствовать о том, что существенным источником загрязнения травяной растительности тяжелыми металлами являются почвенные растворы из глубоких слоев почвы, обогащенных мобильными формами этих металлов.

Ключевые слова: тяжелые металлы, мобильные формы, динамика, вертикальная миграция, иммобилизация

Введение

Техногенные загрязнители, в том числе тяжелые металлы (ТМ), поступающие в атмосферу в течение длительного времени функционирования источника загрязнения, накапливаются в почвенном покрове. ТМ техногенного происхождения поступают на поверхность почвы в форме, существенно отличающейся от природных соединений этих

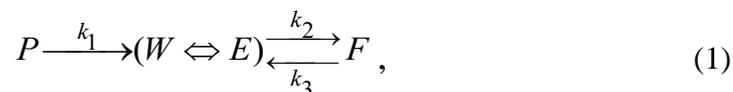
металлов. Таким образом, они оказываются в термодинамически неравновесном состоянии, что инициирует процессы взаимодействия техногенных продуктов с почвенным поглощающим комплексом, с минералами почвы.

Твердая фаза почвы благодаря развитой поверхности, наличию функциональных групп, является полифункциональным сорбентом, способным к одновременному поглощению катионов, анионов и нейтральных молекул. В результате взаимодействия с почвой техногенные ТМ переходят в физико-химические формы, которые с различной степенью прочности связаны с почвенным поглощающим комплексом.

В процессах водной миграции участвуют формы элемента, в наименьшей степени связанные с почвой. Помимо водорастворимой, такой формой элемента является ионообменная. Эти две формы составляют мобильную форму нахождения ТМ в почве, которая определяет их способность к вертикальной абиогенной миграции и к усвоению растительностью, т.е., к биогенной миграции. Прочно фиксированные формы ТМ надолго исключаются из процессов абиогенной и биогенной миграции.

Объективную оценку уровня экологической опасности относительно техногенного загрязнения почвы тяжелыми металлами дает исследование их мобильных форм. Именно мобильные формы обеспечивают поступление элементов-загрязнителей в первичное звено трофических цепей. Характерной особенностью техногенно загрязненных почв есть высокая доля мобильных форм ТМ.

При поступлении загрязнителя в окружающую среду в водорастворимой форме сорбционные процессы на почве происходят непосредственно вслед за его выпадением на земную поверхность. При поступлении загрязнителя в составе твердофазных выпадений процесс его трансформации представляет собой совокупность процессов мобилизации, иммобилизации и ремобилизации, последовательность которых может быть представлена в виде схемы:



где: P, W, E, F – твердофазная, водорастворимая, обменная, консервативная (фиксированная) форма элемента, соответственно; k_1 , k_2 , k_3 – константы скорости мобилизации, иммобилизации и ремобилизации.

Кинетические закономерности трансформации ТМ

Соотношение форм нахождения загрязнителей в почве, складывающееся вследствие их трансформации, меняется со временем в зависимости от скорости процессов трансформации и определяет их миграционную способность, усвоение растительностью, то есть, в конечном итоге, воздействие загрязнителей на экосистему.

Ранее нами была установлена зависимость скорости процессов иммобилизации и ремобилизации от концентрации внесенного в почву свинца. При концентрациях свинца 1000-3000 мг/кг величины константы скорости иммобилизации (k_2) свинца в дерново-подзолистой почве оказались почти вдвое выше аналогичных величин при загрязнении свинцом на уровне 250-500 мг/кг. Величины константы скорости ремобилизации (k_3) возрастают с увеличением концентрации свинца в еще большей степени.

Реконструкция динамики трансформации свинца, выпавшего на почвенный покров в составе твердой фазы (рис. 1), показала, что при загрязнении почвы свинцом, не превышающем 500 мг/кг, содержание его мобильных форм достигает максимума через 3-5 лет после выпадения, далее постепенно снижается благодаря образованию фиксированных форм [1]. Так как самопроизвольное уменьшение доли мобильных форм токсичного элемента в почве влечет соответствующее уменьшение его миграционной способности, уменьшение поступления в наземную растительность, то отношение мобильной формы к фиксированной может служить мерой самовосстановления почвы.

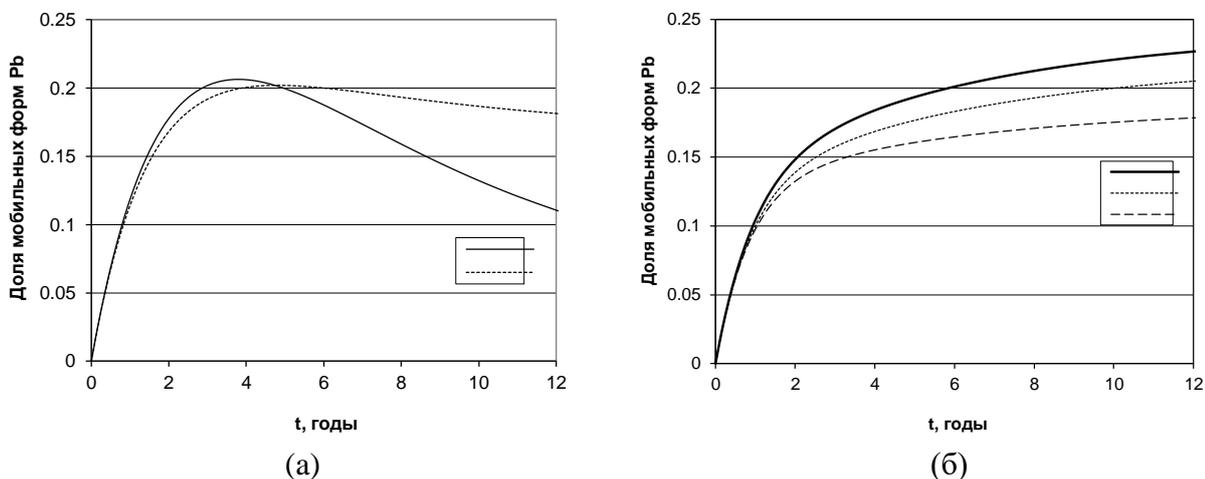


Рис. 1. Динамика мобильных форм техногенного свинца при концентрации ≤ 500 мг/кг (а) и ≥ 1000 мг/кг (б): 1 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.45$, $k_3 = 0.023$; 2 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.55$, $k_3 = 0.11$; 3 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.8$, $k_3 = 0.26$; 4 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.9$, $k_3 = 0.25$; 5 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.95$, $k_3 = 0.22$.

Fig. 1. Dynamics of technogenic lead mobile species at concentrations of ≤ 500 mg/kg (a) and ≥ 1000 mg/kg (b): 1 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.45$, $k_3 = 0.023$; 2 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.55$, $k_3 = 0.11$; 3 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.8$, $k_3 = 0.26$; 4 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.9$, $k_3 = 0.25$; 5 – $k_1 = 0.16$, $k_2 = 0.95$, $k_3 = 0.22$.

При высокой степени загрязнения (>1000 мг/кг) в течение первых 2-3 лет происходит быстрое накопление мобильных форм свинца, затем их накопление замедляется, приближаясь к некоему равновесному значению. Чем выше загрязненность почвы техногенным свинцом, тем больше это значение превышает равновесную концентрацию мобильных форм природного свинца. и при высоком уровне загрязненности (>1000 мг/кг) дерново-подзолистая почва утрачивает естественную способность к самовосстановлению.

Загрязнение почвы свинцом и цинком в зоне влияния завода «Укрцинк» (г. Константиновка)

Основной вклад в загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами вносят предприятия цветной металлургии. На территории Украины более 70 лет проработал завод «Укрцинк» (г. Константиновка, Донецкой обл.), который стал мощным источником загрязнения окружающей среды ТМ – прежде всего цинком и свинцом, а также медью, кадмием, и др. Сырьем для получения цинка и свинца были полиметаллические руды. ТМ поступали в окружающую среду в большом количестве в виде аэрозольных и крупнопылеватых частиц. В годы максимальной активности производства объем выбросов в атмосферу достигал 10 тыс. тонн в год.

Административно это предприятие относится к Донецкой области и расположено в восточной зоне степной биоклиматической провинции. В почвенном покрове зоны преобладают черноземы обычные, малогумусные, развитые на элювии глинистых сланцев. Встречаются также легкосуглинистые и лугово-черноземные почвы. Черноземные почвы в зоне влияния комбината в значительной мере можно отнести к урбанизированным, они имеют мощность от 50 до 90 см, залегают на суглинках, содержание гумуса около 4%.

Отбор проб почв, их характеристика, выделение мобильных форм Pb и Zn

Для изучения особенностей накопления и вертикального распределения свинца и цинка, а также их мобильных форм в почвах был выбран участок поблизости Константиновского завода «Укрцинк».

Образцы почв отбирали на различном удалении от источника загрязнения (основная труба завода) и с различных глубин от поверхности. Почвенные профили в ряде шурфов показали, что мощность собственно черноземной части в среднем составляет 70-80 см, ниже которого она переходит в суглинистую толщу.

На території, прилегаючій к цьому підприємству, в нескольких точках были отобраны вертикальные почвенные колонки. Точки 1-3 расположены на территории завода «Укрцинк», точка 9 – возле заводууправления (газон), точки 4-6 в – парке, расположенном вблизи завода. Точки 7 и 8 более удалены от завода и находятся на пустыре в северном направлении. Точки 10 и 11 находятся в жилой зоне г. Константиновка, за рекой. В послойных образцах почвы (0-5 см, 5-10 см, 10-20 см и 20-30 см), выделенных из колонок, были определены валовые концентрации ТМ и содержание их мобильных форм, представляющих собой сумму водорастворимой и обменной формы соответствующего металла.

Среди отобранных образцов почв абсолютно преобладали черноземы малогумусные. Исключение составили только легкосуглинистая почва в точке 7 и луговая почва в точке 10. Черноземная почва имеет темно-серую окраску, рыхлая в верхней части профиля и постепенно уплотняется в нижней. Вещественный (минеральный) состав почвы по всему профилю однороден. На поверхности почвы имеется травянистый покров.

В верхнем слое (0-10 см) черноземной почвы преобладает алевро-песчаная часть (50-55 %), глинистая составляет 20-25 %, растительные остатки – не более 8-12 % от общего объема почвы. Содержание механических частиц техногенной составляющей колеблется от 8 до 15 %. В минеральном составе алевро-песчаной фракции черноземной почвы преобладают зерна кварца, в меньшей степени присутствуют также зерна полевого шпата и единичные обломки песчаной размерности карбонатных и песчаных пород. В глинистой фракции по данным рентгеноструктурного анализа отмечается наличие кварца с примесью каолина, кальцита, гидрослюд и полевого шпата.

Среди частиц техногенного происхождения выделяются песчано-алевритовой размерности обломки шлака, сферические образования и листочки металла. Шлак присутствует в виде обломков угловатой и полу-угловатой форм, смолисто-черной окраски, со стекловатым изломом. Металлические пластинки размером 0,1-0,2 мм имеют бронзовую или серо-стальную окраску.

Анализ содержаний тяжелых металлов в собственно шлаковом материале показал наличие в них (мг/кг) Ni – до 1500, Co – 60, Cr – 600, Mo – 400, Cu – 800-1000, Pb >10000, Ag – 20, Zn > 10000, Sb > 500. Подобный материал загрязнения присутствует практически во всех типах почв, включая как территорию завода, так и за ее пределами (пустыри, сквер, газоны). Количественное содержание техногенных частиц по периферии завода заметно меняется, что связано в первую очередь с местной розой ветров.

Выделение мобильных форм Pb и Zn из почвы проводили 1N раствором ацетата аммония при соотношении массы твердой фазы и объема раствора (Т:Ж) = 1:5. Часть металла, не экстрагируемая этим раствором, рассматривается как необменно сорбированная (фиксированная) форма. Содержание Pb и Zn в образцах почвы и растительности определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра модели AA-8500 («Nippon Jarrell-Ash», Япония).

Результаты анализа и их обсуждение

Результаты определения содержания цинка и свинца в послонных пробах почв в зоне влияния завода «Укрцинк» приведены в таблице 1. В большинстве опробованных точек в верхнем слое (0-5 см) почвы содержание свинца значительно превышает 1000 мг/кг, а концентрация цинка выше 10000 мг/кг, то есть составляет более 1 % массы почвы. При этом в мобильной форме в этом слое почв находится 26-32 % цинка и от 28 до 38 % свинца техногенного происхождения. Эти показатели существенно выше наблюдаемых нами относительных долей мобильных ТМ, искусственно внесенных в черноземную почву [2]. При искусственном загрязнении чернозема водными растворами азотнокислых солей ТМ из расчета не более 500 мг металла на кг почвы через четыре года в мобильной форме содержалось 13-16 % Zn и 11-15 % Pb.

В большинстве вертикальных почвенных разрезов наблюдается плавное снижение содержания валового Zn с глубиной, при этом очень высокие содержания Zn отмечаются вплоть до глубины 20-30 см. Относительная доля мобильных форм цинка (%) в послонных пробах вертикальных разрезов отличается незначительно (колеблется в ограниченных пределах). Очень высокие содержания техногенного Pb отмечены преимущественно в слое 0-10 см (Т. 4, 5, 9) или даже 0-5 см (Т.8), в более глубоких слоях почвы содержание Pb резко снижается, иногда на порядок. Только почвенные разрезы 6 и 7 характеризуются относительно плавным и постепенным снижением содержания Pb с глубиной слоя, аналогичным распределению Zn.

На рис. 2 представлены примеры распределения цинка и свинца по вертикальным почвенным разрезам черноземной почвы (Т. 5, 6 и 8) наряду с распределением этих металлов между мобильной, кислоторастворимой и остаточной формами. Для распределения техногенного Zn по глубине характерно наличие высоких содержаний мобильной формы металла во всех исследованных слоях почвы вплоть до слоя 20-30 см. Такая особенность сохраняется, в том числе в Т.8, где наблюдается резкое снижение содержания Zn, начиная с

глибини 5-10 см, в отличие от профилей Т.5 и Т.6 с плавным снижением содержания Zn с глубиной.

Таблица 1. Содержание цинка и свинца (мг/кг) и доли их мобильных форм (% от валового содержания) в почвах зоны влияния завода «Укрцинк»

Table 1. The zinc and lead contents (mg/kg) and their mobile species parts (% of the total content) in the soils of the zone of influence of the «Ukrtsink» plant

Точка отбора	Глубина, см	Zn		Pb	
		Вал, мг/кг	Моб.форма %	Вал, мг/кг	Моб.ф., %
Т. 1	0-5	10100	28	10000	40
Т. 2	0-5	860	20	1500	20
	5-10	1380	22,5	1250	19
Т. 3	0-5	1350	31	2200	27
	5-10	1400	29	1980	23
Т. 4	0-5	15600	30,5	7200	17,5
	5-10	7000	50	2600	17
	10-15	3000	33	290	10
	15-20	1950	42	100	10
Т. 5	0-5	8700	26	4000	32,5
	5-10	7700	36	1600	19
	10-15	2900	24	390	8
	15-20	2000	20	250	6
	20-25	1700	23,5	190	5
Т. 6	0-5	7800	31	2500	28
	5-10	4600	30	900	17
	10-15	4500	29	860	19
	15-20	4000	30	800	19
	20-25	2450	24	400	7,5
Т. 7	0-5	10800	28	3200	37,5
Легкосуглин.	5-10	8900	34	1550	29
	10-20	9400	30	1000	25
	20-30	23000	29,5	1400	25
Т. 8	0-5	21200	32	5000	38
	5-10	2380	52,5	100	5
	10-20	2550	57	110	9
	20-30	3900	49	250	16
Т. 9	0-5	37000	44,6	14000	21
	5-10	18500	33	1800	22
	10-20	3930	38	400	12,5
	20-30	2700	22	360	8
Т. 10 луговая	0-5	320	31	195	15
Т. 11	0-5	850	27	375	9

Для распределения техногенного Pb по глубине, напротив, характерно резкое снижение содержания мобильной формы, начиная с глубины 5-10 см, исключение составляет профиль Т.6, характеризующийся также плавным снижением содержания валового Pb с глубиной.

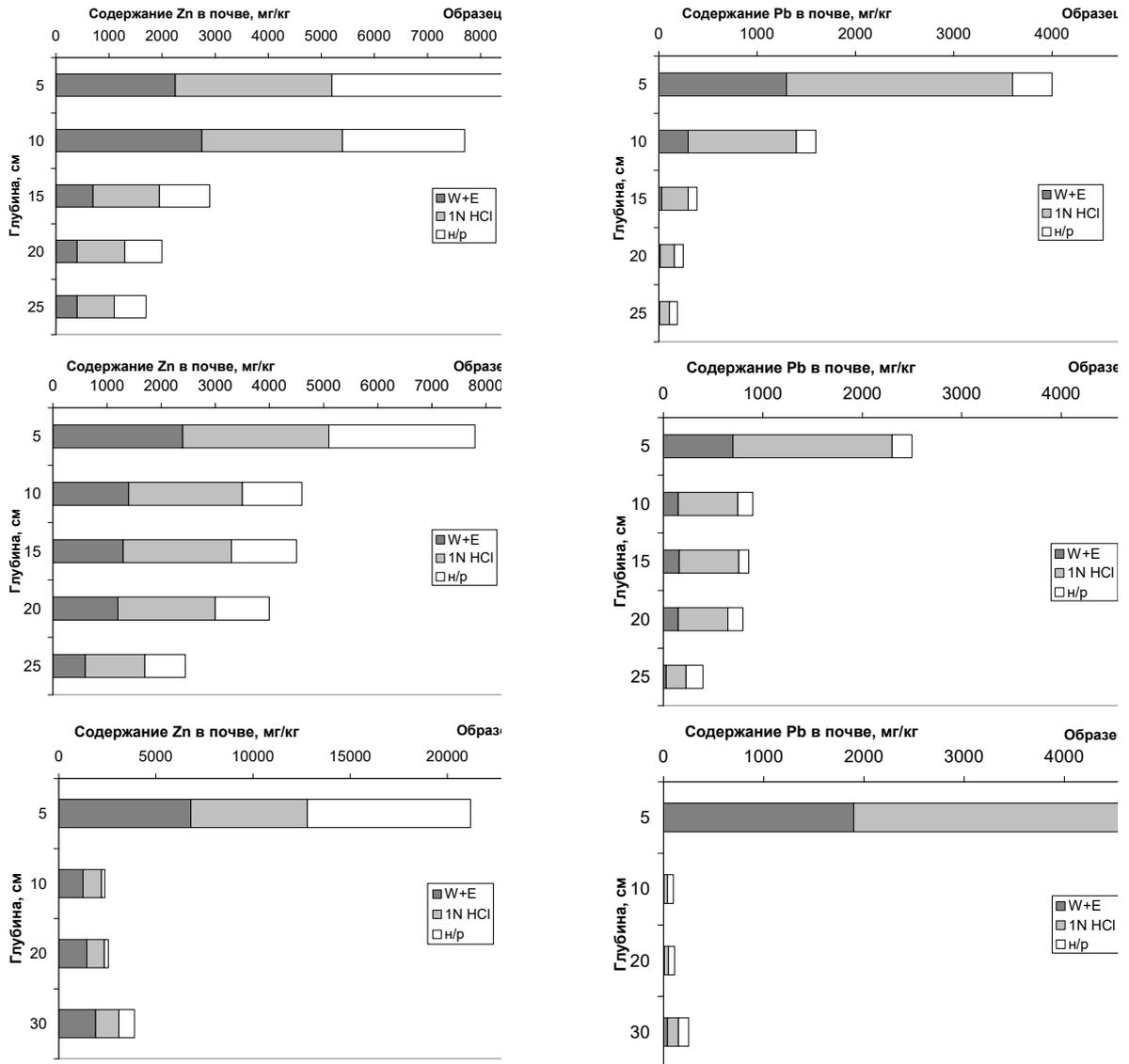


Рис. 2. Распределения цинка и свинца, и их форм нахождения по вертикальным почвенным разрезам черноземной почвы (Т. 5, 6 и 8)

Fig. 2. Distribution of zinc and lead, and their species in the vertical soil sections of the chernozem soil (T. 5, 6 and 8)

На рис. 3 показана зависимость содержания мобильных форм Zn и Pb от валовых содержаний тех же металлов в почвенных профилях Т.5, Т.6 и Т.8. Во всех случаях экспериментальные данные почти идеально соответствуют линейной зависимости содержания мобильной формы от валового содержания техногенного загрязнителя, что, по-видимому, свидетельствует о достижении равновесия в распределении Zn и Pb между мобильными и фиксированными формами нахождения.

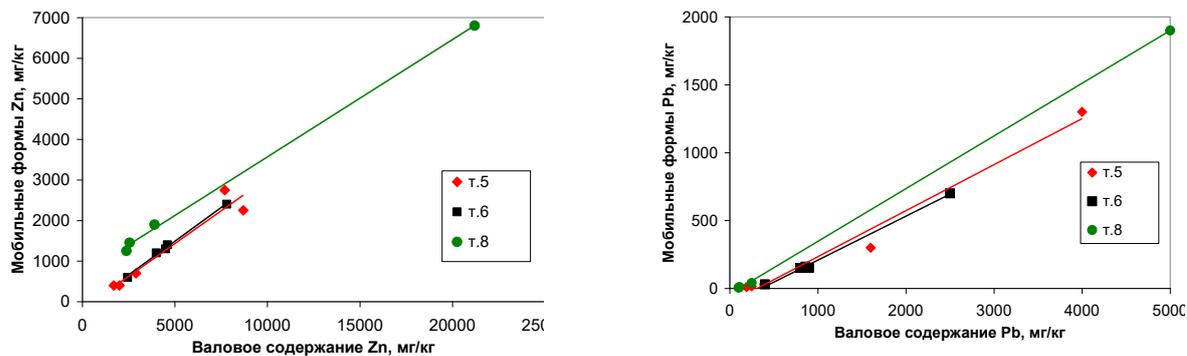


Рис. 3. Зависимость содержания мобильных форм Zn и Pb от валовых содержаний в почвенных профилях (Т.5, Т.6 и Т.8.)

Fig. 3. Dependence of the mobile Zn and Pb content on their total content in soil profiles (T.5, T.6 and T.8.)

Как известно, органическое вещество, общее содержание которого в верхнем слое чернозема составляет 4,8 %, способно к образованию с тяжелыми металлами сложных комплексных соединений, которые закрепляются и аккумулируются в почве. Высокая адсорбционная способность гумусного горизонта чернозема по отношению к ТМ должна приводить к достаточно прочному связыванию их почвой. Кроме гумуса в фиксации тяжелых металлов почвами черноземного типа принимают участие также глинистые минералы.

Как показали наши исследования форм нахождения техногенных Zn и Pb в черноземной почве в зоне влияния комбината «Укрцинк», в условиях очень интенсивного, жесткого загрязнения (более 2000 мг/кг) иммобилизация цинка черноземной почвой практически не происходит, иммобилизация свинца – очень ограничена. Вследствие этого происходит интенсивное заглубление техногенных загрязнителей – на глубине 20-30 см отмечаются концентрации Zn на уровне 2-4 г/кг, и Pb – 250-375 мг/кг.

Загрязнение травяной растительности цинком и свинцом

Высокое содержание мобильных форм Zn и Pb в исследованных почвах привело также к значительному загрязнению травяной растительности (табл. 3). Сопоставление данных таблиц 1 и 2 указывает на важность мобильных форм Pb и Zn в поглощении этих металлов растительностью. Наиболее загрязненной ТМ оказывается растительность на участках, характеризующихся высоким содержанием их мобильных форм на глубине 5-10 см и более. Сопоставление данных табл. 3 по загрязнению растительности Zn и содержанию его мобильных форм в послойных пробах почвы Т. 5 и Т. 6 показывает, что более высокое содержание Zn в растительности в точке 6 (122 мг/кг) соответствует более высокому

содержанию мобильного Zn в слоях почвы точки 6 – 10-15 см и 15-20 см, которое почти в два раза превышает его соответствующие концентрации в слоях почвы точки 5. При этом содержания как валового, так и мобильного Zn в верхних слоях почв Т. 5 и Т. 6 очень близки. Загрязнение растительности Pb также выше в Т. 6 (83 мг/кг), что соответствует более высокому содержанию мобильного Pb в слоях 10-15 и 15-20 см этой почвы по сравнению с почвой Т.5.

Таблица 2. Содержание свинца и цинка в растительности с исследованных площадок, мг/кг

Table 2. Lead and zinc content in vegetation from the studied sites, mg/kg

Площадка	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг	Площадка	Pb, мг/кг	Zn, мг/кг
Т.1	870	184	Т. 7	147	225
Т.2	306	100	Т. 8	162	920
Т.3	535	135	Т. 9	124	560
Т. 4	250	270	Т. 10	14	45
Т. 5	63	90	Т. 11	26	115
Т. 6	83	122			

Таблица 3. Мобильные формы свинца и цинка в почвенных профилях в районе свинцово-цинкового комбината и загрязнение растительности

Table 3. Mobile lead and zinc in soil profiles in the area of the lead-zinc plant and pollution of vegetation

Площадка	Глубина, см	Zn			Pb		
		Вал, мг/кг	Моб.ф., мг/кг	Растительность, мг/кг	Вал, мг/кг	Моб.ф., мг/кг	Растительность, мг/кг
Т. 5	0-5	8700	2250	90	4000	1300	63
	5-10	7700	2750		1600	300	
	10-15	2900	700		390	30	
	20-25	1700	400		190	10	
Т. 6	0-5	7800	2400	122	2500	700	83
	5-10	4600	1400		900	150	
	10-15	4500	1300		860	160	
	15-20	4000	1200		800	150	
Т. 7	0-5	10800	3000	225	3200	1200	147
	15-20	9400	2800		1000	250	
	25-30	23000	6800		1400	350	
Т. 8	0-5	21200	6800	920	5000	1300	162
	5-10	2380	1250		100	5	
	10-20	2550	1450		110	10	
	20-30	3900	1900		250	40	
Т.10	0-5	320	100	45	195	30	14
Т.11	0-5	850	230	115	375	35	26

Очень высокие показатели загрязненности растительности Zn на площадках Т. 7 и Т. 8 также соответствуют очень высоким содержаниям мобильного Zn в нижних слоях соответствующих почвенных профилей. Такая закономерность может свидетельствовать о том, что существенным источником загрязнения травяной растительности ТМ являются

почвенные растворы из глубоких слоев почвы, обогащенных мобильными формами этих металлов.

Исключением из этой закономерности является высокое загрязнение Рb растительности с площадки Т. 8, профиль которой характеризуется невысокими показателями как валового, так и мобильного Рb в слоях почвы ниже 5 см. В этом случае загрязнение растительности, по-видимому, обязано чрезвычайно высоким содержанием как валового, так и мобильного свинца в верхнем слое почвы 0-5 см.

Влияние содержания мобильных форм Zn и Рb в почве на загрязнение этими металлами травяной растительности показано на рис. 4. Содержание Zn в растениях подчиняется линейной зависимости от содержания мобильного Zn в почве (рис. 4а). Поглощение растительностью Рb несколько менее интенсивно, чем в случае Zn, соответствие линейной зависимости от содержания мобильного Рb можно считать удовлетворительным до концентрации 1000 мг/кг, при более высоких концентрациях усвоение Рb растениями затрудняется (рис. 4б).

Такое отличие в поглощении может объясняться разными ролями этих металлов в жизнедеятельности растений. Цинк относится к элементам, необходимым для жизнедеятельности растений, он входит в состав ферментов, принимает участие в формировании рибонуклеиновых кислот, необходим для синтеза хлорофилла. Ферменты, которые содержат Zn, принимают участие в углеводном и фосфатном обмене [3]. Особая физиологическая роль Zn в жизнедеятельности растений обеспечивает его специфическое поглощение растениями из почвы. Свинец не имеет особого физиологического значения, он захватывается растениями из почвы вместе с другими микроэлементами, которые находятся в почве.

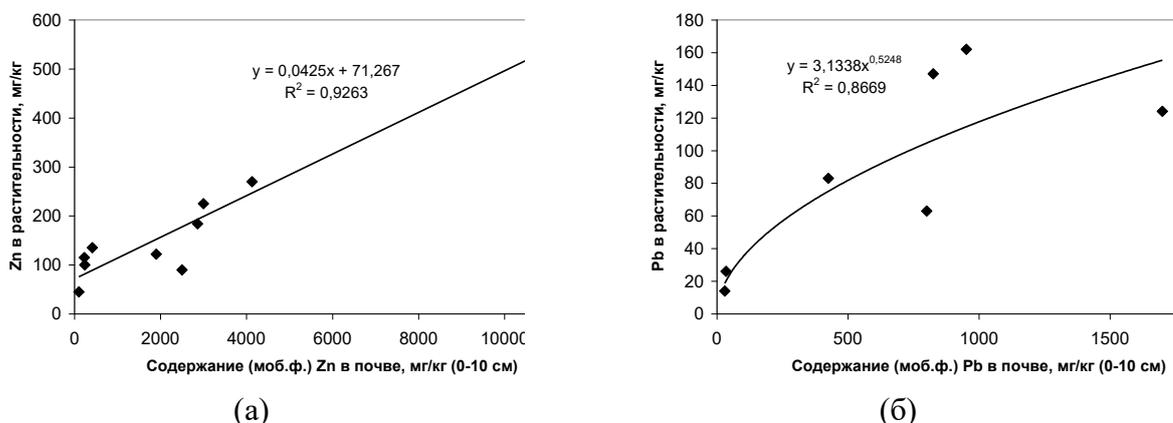


Рис. 4. Зависимость загрязнения травяной растительности Zn (а) и Рb (б) от содержания их мобильных форм в почве

Fig. 4. Dependence of grass vegetation pollution by Zn (a) and Pb (b) on the content of their mobile species in the soil

Вследствие этого Zn и Pb существенно отличаются по интенсивности их включения в биомиграцию, т.е. поглощения растительностью. Глобальные значения коэффициента биологического поглощения K_b , который является количественной оценкой включения микроэлементов в биомиграцию и, по определению Б.Б.Полынова, равен отношению содержания элемента в золе растительности к содержанию его в горной породе, для цинка и свинца равны, соответственно, 11,8 и 1,5 [3].

Выводы

1. Экспериментальные исследования форм нахождения техногенных Zn и Pb в черноземной почве в зоне влияния комбината «Укрцинк» подтвердили корректность реконструкции динамики трансформации техногенного свинца, предсказавшей, что при высокой степени загрязнения (>1000 мг/кг) накопление мобильных форм свинца происходит столь интенсивно, что способность почвы к иммобилизации загрязнителя исчерпывается, и тем самым почва утрачивает естественную способность к самовосстановлению.

2. Исследования форм нахождения техногенных Zn и Pb в черноземной почве в зоне влияния комбината «Укрцинк», в условиях очень интенсивного, жесткого загрязнения (более 2000 мг/кг) показали, что иммобилизация цинка черноземной почвой практически не происходит, иммобилизация свинца – очень ограничена.

3. При высокой степени загрязнения черноземной почвы ТМ происходит интенсивная вертикальная миграция техногенных загрязнителей – на глубине 20-30 см отмечаются концентрации Zn на уровне 2-4 г/кг и Pb – 250-375 мг/кг.

4. Загрязнение травяной растительности Zn подчиняется линейной зависимости от содержания мобильного Zn в почве (рис. 4а). Загрязнение растительности Pb отклоняется от линейной зависимости от содержания мобильного Pb, поглощение его растениями несколько менее интенсивно, чем в случае Zn. Такое отличие может объясняться разными ролями этих металлов в жизнедеятельности растений.

5. Наиболее загрязненной ТМ оказывается растительность на участках, характеризующихся высоким содержанием их мобильных форм на глубине более 10 см, что может свидетельствовать о том, что существенным источником загрязнения травяной растительности ТМ являются почвенные растворы из глубоких слоев почвы, обогащенных мобильными формами этих металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко Г.Н., Кононенко Л.В., Высотенко О.А. Динамика трансформации оксидов тяжелых металлов техногенного происхождения в дерново-подзолистой почве // Доповіді НАН України. – 2005. – № 2. – С.169-173.
2. Высотенко О.А., Кононенко Л.В., Кузенко С.В. Формообразование свинца и цинка в черноземной почве и переход их в растительность // 36. наук. праць Ін-ту геохімії навколишнього середовища. – 2009. – вип. № 17 – с. 20-26.
3. Добровольский В. В. Основы биогеохимии. – М.: Высшая школа, 1998. – 413 с.

REFERENCES

1. Bondarenko, G., Kononenko, L., Vysotenko, O. (2005), *Dinamika transformatsii oksidov tzhzhelykh metallov tehnogennoho proishozhdeniya v derno-podzolistoj pochve*, Dopovidi NAN Ukrainy, 2, pp. 169 - 173.
2. Vysotenko, O., Kononenko, L., Kuzenko, S. (2009), *Formoobrazovanie svintsya i tsinka v chernozemnoj pochve i perehod ih v rastitel'nost'*, Zbirnyk naukovykh prats IGNS, 17, pp.20-26.
3. Dobrovolskij, V.V. (1998), *Osnovy biogeohimii*, Vysshaja shkola, Moscow, RU, 413p.

МИГРАЦИЯ СВИНЦА ТА ЦИНКУ У ЧОРНОЗЕМНОМУ ҐРУНТІ В УМОВАХ ЖОРСТКОГО ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Бондаренко Г.М., Кононенко Л.В., Высотенко О.О., **Маничев В.И.**, Кузенко С.В.

Бондаренко Г.Н. д. геол.-мін. н., гол. н. с., ДУ«Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», bogernic34@gmail.com

Кононенко Л.В. к. геол.-мін. н., пров. н. с., ДУ«Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», lkononenko@gmail.com.

Высотенко О. О. н. с., ДУ«Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», vysotenkooksana@gmail.com

Кузенко С.В. н. с., ДУ«Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

Проведено експериментальні дослідження форм знаходження техногенних цинку та свинцю у чорноземному ґрунті в зоні впливу комбінату «Укрцинк», які підтвердили коректність реконструкції динаміки трансформації техногенного свинцю, яка передбачає, що при високому ступені забруднення (> 1000 мг/кг) накопичення мобільних форм свинцю відбувається настільки інтенсивно, що здатність ґрунту до іммобілізації забруднювача вичерпується, і тим самим ґрунт втрачає природну здатність до самовідновлення. Дослідження форм знаходження техногенних цинку та свинцю у чорноземному ґрунті в умовах дуже інтенсивного, жорсткого забруднення (понад 2000 мг/кг) показало, що іммобілізація цинку чорноземним ґрунтом практично не відбувається, іммобілізація свинцю – дуже обмежена. Показано, що при високому ступені забруднення чорноземного ґрунту ВМ відбувається інтенсивна вертикальна міграція техногенних забруднювачів – на глибині 20-30 см відзначаються концентрації Zn на рівні 2-4 г/кг, і Pb – 250-375 мг/кг. Результати досліджень показали, що забруднення трав'яної рослинності Zn підпорядковується лінійній залежності від вмісту мобільного Zn у ґрунті. Забруднення рослинності Pb відхиляється від лінійної залежності від вмісту мобільного Pb, поглинання його рослинами менш інтенсивне, ніж у випадку Zn. Така відмінність може пояснюватися різною участю цих металів у життєдіяльності рослин. Найбільш забрудненою ВМ виявляється рослинність на ділянках, що характеризуються високим вмістом їх мобільних форм на глибині понад 10 см, що може свідчити про те, що істотним джерелом забруднення трав'яної рослинності ВМ є ґрунтові розчини з глибоких шарів ґрунту, збагачених мобільними формами цих металів.

Ключові слова: важкі метали, мобільні форми, динаміка, вертикальна міграція, іммобілізація

MIGRATION OF LEAD AND ZINC IN CHERNOZEM SOIL IN CONDITIONS OF HARD TECHNOGENEOUS POLLUTION

G. Bondarenko, L. Kononenko, O. Vysotenko, V. Manichev, S. Kuzenko

G. Bondarenko D.Sc. (Geol.-Min.), Principal Research, SI «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine», bogernic34@gmail.com.

L. Kononenko Ph.D. (Geol.-Min.), Principal Research, SI «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine», lkononenko@gmail.com.

O. Vysotenko Researcher, SI «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine», vysotenkooksana@gmail.com.

S. Kuzenko Researcher, SI «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine»

Experimental study of technogenic zinc and lead species in chernozem soil in the zone of influence of the 'Ukrtsink' plant has been carried out. The earlier reconstruction of technogenic lead transformation dynamics was confirmed to be correct by the results of the study. This reconstruction has predicted that accumulation of the mobile lead species at high degree of contamination (> 1000 mg/kg) occurs so intensely that the soil's ability to immobilize the pollutant is exhausted, and thus the soil loses its natural ability to heal itself. The study of technogenic zinc and lead species in chernozem soil under very intensive, severe pollution (more than 2000 mg/kg) showed that there is practically no immobilization of zinc in chernozem, immobilization of lead is very limited. An intense vertical migration of technogenic pollutants has been shown to take place in the chernozem soil with a high degree of HM contamination – at a depth of 20-30 cm, Zn concentrations was noted at the level of 2-4 g/kg, and Pb – 250-375 mg/kg. The research results showed a linear dependence of the grass vegetation pollution by technogenic Zn on the content of mobile Zn in the soil. The technogenic Pb pollution of vegetation deviates from the linear dependence on the content of mobile Pb, its absorption by plants is somewhat less intense than in the case of Zn. This difference can be explained by the different roles of these metals in the vital activity of plants. The vegetation in areas characterized by a high content of HM mobile species at a depth of more than 10 cm, was found to be the most polluted by Zn and Pb. This may indicate that soil solutions from deep soil layers enriched with mobile species of these metals are a significant source of contamination of the herbaceous vegetation of HM.

Key words: heavy metals, mobile species, dynamics, vertical migration, immobilization.