
ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 504.064.36:550.53(476)

КАДМИЙ, ЦИНК И СВИНЕЦ В ПОЧВАХ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

С. Е. ГОЛОВАТЫЙ¹⁾, С. В. САВЧЕНКО²⁾, Е. А. САМУСИК¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

²⁾Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
ул. Скорины, 10, 220114, Минск, Беларусь

Оценка содержания валовых и подвижных форм кадмия, свинца и цинка в почвенном покрове на территории промышленных предприятий показала загрязнение почв этими элементами. Наиболее высокий уровень загрязнения почв цинком отмечен в зоне воздействия предприятия машиностроительного комплекса, где средняя концентрация металла превысила норматив для валового содержания в 7,5, а для подвижных форм – в 1,6 раза. Повышенное содержание в почвах валового кадмия отмечено на промплощадках в зоне воздействия предприятий по производству цемента и машиностроительного производства. Загрязнение почв подвижным свинцом характерно для предприятий, специализирующихся на литейном и цементном производстве, где среднее содержание элемента выше допустимого уровня в 4,1 и 1,7 раза соответственно.

Образец цитирования:

Головатый С. Е., Савченко С. В., Самусик Е. А. Кадмий, цинк и свинец в почвах в зоне воздействия промышленных предприятий // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2017. № 4. С. 70–80.

For citation:

Golovaty S. E., Savchenko S. V., Samusik E. A. Cadmium, zinc and lead in soils in the zone of influence of the industrial enterprises. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2017. No. 4. P. 70–80 (in Russ.).

Авторы:

Сергей Ефимович Головатый – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заведующий кафедрой экологического мониторинга и менеджмента.

Светлана Валентиновна Савченко – кандидат геолого-минералогических наук; ведущий научный сотрудник Института природопользования.

Елена Андреевна Самусик – аспирант кафедры экологического мониторинга и менеджмента.

Authors:

Sergey E. Golovaty, doctor of science (agriculture), professor; head of the department of environmental monitoring and management. sscience@yandex.ru

Svetlana V. Savchenko, PhD (geology and mineralogy); leading researcher of Institute of environmental management. svscience@rambler.ru

Elena A. Samusik, graduate student of the department of environmental monitoring and management. e.samusik@mail.ru

Ключевые слова: валовые и подвижные формы тяжелых металлов; загрязнение почв; элементы-загрязнители; промышленное предприятие; предельно допустимая концентрация.

CADMIUM, ZINC AND LEAD IN SOILS IN THE ZONE OF INFLUENCE OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISES

S. E. GOLOVATYI^a, S. V. SAVCHENKO^b, E. A. SAMUSIK^b

*^aBelarusian State University, International Sakharov Environmental Institute
Dolgobrodskaya street, 23/1, 220070, Minsk, Belarus*

*^bInstitute of environmental management of National Academy of Sciences of Belarus,
Skorina street, 10, 220114, Minsk, Belarus*

Corresponding author: : sscience@yandex.ru

Assessment of the total and mobile forms of cadmium, lead and zinc in a soil cover in the territory of the industrial enterprises has shown pollution of soils these elements. The highest level pollution of soils zinc is noted in a zone of influence of the enterprise of a machine-building com-plex where average concentration of metal has exceeded the standard for the total contents by 7,5 times, for mobile forms – by 1,6 times. The increased contents in soils of the total cadmium is not-ed at industrial sites in a zone of influence of the enterprises for production of cement and ma-chine-building production. Pollution of soils mobile lead is characteristic of the enterprises specializing in foundry and cement production where the average content of an element is higher than admissible level in 4,1 and 1,7 times respectively.

Key words: total and mobile forms of heavy metals; pollution of soils; elements pollutants; industrial enter-prise; threshold limit value.

Введение

Отличительным признаком загрязнения почв в зоне воздействия промышленных объектов является накопление в них многокомпонентной смеси химических веществ различной природы, среди которых ведущее место занимают тяжелые металлы. Наиболее значительное техногенное воздействие от их поступления испытывают почвы промплощадок предприятий, где расположено значительное количество различных источников загрязнения.

Тяжелые металлы, присутствующие в сырье или отходах производства, участвуют в водной и воздушной миграции и могут являться источником химического загрязнения почв преимущественно близлежащих территорий, формируя локальные участки загрязнения земель. Элементы, содержащиеся в промышленных выбросах, распространяются на значительные расстояния, формируя педогеохимические аномалии, удаленные от непосредственного источника загрязнения, что затрудняет его идентификацию. При этом особенности технологических процессов, выпускаемая на предприятии продукция и используемое при этом сырье напрямую связаны с интенсивностью накопления свинца, кадмия и цинка в почвах промплощадок и санитарно-защитных зон промышленных объектов.

Традиционно в практике оценки химического загрязнения земель используется определение в почвах валовых концентраций тяжелых металлов. Однако валовое содержание отражает общую картину накопления в землях элементов или их соединений и не всегда свидетельствует об опасности химического загрязнения почв, так как при этом не учитывается миграционная активность поллютантов и возможность их поступления в другие компоненты природной среды. Более информативным, с точки зрения экологических позиций, является анализ содержания подвижных форм металлов, дающий возможность оценить степень опасности избыточной концентрации элементов в почвах для экосистем и их отдельных компонентов.

Материалы и методы исследования

Изучение содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов проводили на территориях трех промышленных предприятий и в зоне их воздействия – предприятия по производству цемента, производству машин и комплектующих, а также по производству литейной продукции. Обследование почвенного покрова велось на свободных от застройки участках по всей территории промплощадки предприятия. При обосновании точек отбора проб почв учитывалась площадь свободной от застройки территории, ее функциональное использование, местоположение по отношению к источникам загрязнения, возможные пути миграции химических веществ и предполагаемые участки их аккумуляции.

Почвенные образцы отбирали тростевым буром на глубине 0–5 см и 5–20 см. Всего отобрано 58 проб, из них 9 – в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) промышленных объектов. На участках исследования производился отбор объединенной почвенной пробы, которая формировалась с точечных проб почв. Точечные пробы отбирались методом «конверта» на участке не менее 5х5 м. При ограниченности площади или линейной конфигурации исследуемого участка отбор объединенной почвенной пробы производился по диагонали или другим способом методом отбора точечных проб, расположенных на расстоянии 2–3 м друг от друга [1].

Процедура извлечения валовых форм тяжелых металлов из почвенных образцов проводилась методом химического экстрагирования сильными кислотами ($\text{HF} + \text{HClO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{HCl}$) [2].

Подвижные формы изучаемых элементов определяли из вытяжки ацетатно-аммонийного буфера (ААБ, рН 4,8). Концентрацию элементов в экстрагентах определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре ААС-30 [2].

Обменную кислотность почвенного раствора определяли потенциометрически, в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26483-85).

Результаты исследования и их обсуждение

Современный почвенный покров в пределах территорий промышленных предприятий представлен преимущественно антропогенно-преобразованными почвами, в основе которых лежат перемешанные или насыпные грунты с высокой долей золы, бытового мусора, строительных отходов, образовавшиеся вследствие нивелировки рельефа и строительно-земляных работ. Для большинства участков характерны почвы, имеющие обогащенный органическим веществом верхний горизонт, образованный в результате естественных почвообразовательных процессов или, в большинстве случаев, привнесением органо-минеральных смесей. Присутствуют также территории, где распространены грунты без признаков генетических горизонтов с постоянной механической трансформацией приповерхностного слоя.

Предприятие по производству цемента. Основным сырьем предприятия по производству цемента выступает мергель, лессовидные супеси, песок и различные виды добавок. По данным [2], основное количество кадмия, свинца и цинка при производстве цемента может поступать в производственный процесс с пиритными огарками ($\text{Zn} - 84,6\text{--}91,0\%$, $\text{Cd} - 55,5\text{--}67,0\%$, $\text{Pb} - 87,6\text{--}89,6\%$) и основным сырьем (глиной, мелом) ($\text{Zn} - 8,8\text{--}15,0\%$, $\text{Cd} - 28,3\text{--}44,0\%$, $\text{Pb} - 10,2\text{--}12,2\%$). Результаты этих же исследований указывают на высокие концентрации данных элементов в пыли, образующейся при производстве цемента. Так, содержание кадмия может варьировать от 0,21 до 219,1 мг/кг, свинца – 642–3728,9, цинка – от 160 до 690,5 мг/кг.

Расчеты удельных выбросов тяжелых металлов, проведенные в [3], показали, что при производстве цемента кадмий, свинец и цинк, наряду с медью и ртутью, являются основными элементами-загрязнителями окружающей среды, в том числе и почвенного покрова. Удельные выбросы на различных стадиях производственного процесса и при различных системах очистки составляют для кадмия – от 0,005 до 0,16 г/т, свинца – 0,62 до 8,7, цинка – от 1,16 до 17,7 г/т.

Исследования, проведенные нами на территории предприятия, показали, что кислотность почв приповерхностного горизонта составляла в среднем $\text{pH}_{\text{KCl}} 8,30$ с разбросом значений от $\text{pH}_{\text{KCl}} 8,00$ до $\text{pH}_{\text{KCl}} 8,62$. Это позволило характеризовать реакцию почвенной среды на территории промплощадки как слабощелочную. Аналогичное подщелачивание почв характерно в целом для городских территорий, что обусловлено наличием на них различных стационарных и мобильных источников загрязнения [4].

В горизонте 5–20 см кислотность почв повышалась и на отдельных участках была на уровне $\text{pH}_{\text{KCl}} 5,45$, что более характерно для естественных почв. В частности, на территории Березинского биосферного заповедника встречаются преимущественно сильнокислые почвы с $\text{pH}_{\text{KCl}} 2,8\text{--}3,8$ [5]. Это же подтверждают исследования [6], согласно которым почвы сосняков имеют $\text{pH}_{\text{KCl}} 3,3$, березняков – $\text{pH}_{\text{KCl}} 3,5$.

Содержание гумуса в слое почв 0–5 см на промплощадке предприятия высокое и в среднем составило 3,10 %, с разбросом значений от 0,73 % до 7,6 %, что позволяет предположить наличие на большей части территории привнесенных органо-минеральных смесей. В слое 5–20 см содержание гумуса снижается и в среднем не превышает 2,7 %.

Исследования валового содержания тяжелых металлов в почвах промплощадки предприятия по производству цемента показали, что средние концентрации всех изученных металлов в приповерхностном горизонте почв превышали фоновый уровень: кадмия – в 3,5 раза, цинка – 12,0, свинца – в 4,9 раза (табл. 1). Максимальные концентрации элементов превышали фон от 9,2 для кадмия до 34,5 раза для цинка.

Таблица 1

Основные статистические параметры валового содержания тяжелых металлов в почвах промплощадки
в зоне воздействия цементного производства

Table 1

The main statistical parameters of the general content of heavy metals in soils of an industrial site in a zone
of impact of cement production

Показатель	Cd	Zn	Pb
Глубина отбора 0–5 см			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	<u>0,1–2,4*</u> 0,9	<u>21,1–424,0</u> 147,2	<u>9,0–65,3</u> 26,7
Встречаемость значений выше ПДК (ОДК), %	66,6	80,0	13,3
Максимальная кратность превышения ПДК (ОДК)	4,8	7,7	1,6
Глубина отбора 5–20 см			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	<u>0,1–0,9</u> 0,4	<u>13,1–139,4</u> 48,0	<u>7,6–25,3</u> 13,1
Встречаемость значений выше ПДК (ОДК), %	20,0	26,7	0
Максимальная кратность превышения ПДК (ОДК)	1,8	2,5	0,6
Фоновое содержание [7]	0,26	12,3	5,4
ПДК (ОДК)	0,50 [8]	55,0 [8]	40,0 [9]

* над чертой – минимальное и максимальное содержание, под чертой – среднее содержание

Сравнение полученных данных с санитарно-гигиеническими нормативами свидетельствует, что среднее содержание цинка и кадмия в слое 0–5 см почв превышали допустимый уровень в 2,7 и 1,8 раза соответственно. По сравнению с гигиеническими нормативами в 80,0 % случаев почвы загрязнены цинком с наибольшим значением (7,7 ОДК), 66,6 % – кадмием с максимальным значением (4,8 ОДК) и 13,3 % – свинцом с наибольшим значением, достигающим 1,6 ПДК.

С глубиной (горизонт 5–20 см) валовое содержание металлов снижалось от 2,0 раз для свинца до 3,1 раза для цинка, что свидетельствует о незначительной вертикальной миграцией элементов. Доля загрязненных проб также снижалась и составляла для цинка 26,7 % с максимальным значением (2,5 ОДК), кадмия – 20,0 % (1,8 ОДК) соответственно. Содержание свинца в горизонте 5–20 см не превышало установленных нормативов.

Оценка корреляционной зависимости между валовым содержанием изученных элементов показала на тесную корреляционную связь между ними с коэффициентом корреляции $r = 0,96–0,98$. В то же время корреляционная зависимость между содержанием элементов и кислотностью почвенной среды низкая с коэффициентом корреляции $r = 0,3$, с содержанием гумуса – низкая отрицательная с коэффициентом корреляции $r = -0,2$. Это подтверждает техногенный характер поступления и аккумуляцию элементов в почве, обусловленные наличием значительного количества источников выделения загрязняющих веществ на территории промышленного объекта.

Исследования подвижных форм металлов на территории и в зоне воздействия цементного производства выявили интенсивное накопление в почве всех исследованных металлов. Средняя и максимальная концентрации подвижного свинца в верхнем горизонте почв превышает фон в 8,6 и 22,9 раза соответственно, цинка – 8,9 и 24,1, кадмия – 7,0 и 18 раз (табл. 2).

По сравнению с ПДК, 46,7 % проб почв загрязнены подвижным цинком с наибольшим значением, равным 2,6 ПДК и 2/3 проб – свинцом, с максимальным значением, равным 4,6 ПДК. При этом среднее для промплощадки содержание свинца также превысило гигиенический норматив в 1,7 раза. Для подвижного кадмия превышения над гигиеническим нормативом, разработанным для промышленных территорий, ни на одном участке не зафиксировано.

Оценка корреляционной зависимости между содержанием подвижных форм элементов свидетельствует о тесной корреляционной связи между содержанием свинца и цинка в почве, коэффициент корреляции $r = 0,9$. Однако корреляционная связь между вышеуказанными элементами и кадмием незначительная ($r = 0,2$), и отличалась от данных, полученных для валовых форм изученных элементов.

Количество подвижных форм кадмия от валовой концентрации в слое почвы 0–5 см достигла в среднем 72,5 %, изменяясь на различных участках от 17,9 до 74,8 %. Доля же подвижных форм цинка и свинца в 2 раза ниже и в среднем не превысила 32,6 и 38,6 % соответственно, что закономерно при

подщелачивании почв, для которых характерна низкая миграционная активность большинства металлов. Это подтверждает и корреляционный анализ, который свидетельствует, что коэффициент корреляции между кислотностью почвы и содержанием подвижных форм свинца и цинка низкий и составляла $r = 0,3$, для кадмия данный показатель отрицательный. В то же время содержание подвижных форм кадмия в почве коррелировал с содержанием органического вещества, коэффициент корреляции между которыми составил $r = 0,6$.

Таблица 2

Основные статистические параметры содержания подвижных форм тяжелых металлов в почвах промплощадки в зоне воздействия цементного производства

Table 2

The main statistical parameters of maintenance of mobile forms of heavy metals in soils of an industrial site in a zone of impact of cement production

Показатель	Cd	Zn	Pb
Глубина отбора 0–5 см			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	$\frac{0,1-1,8^*}{0,7}$	$\frac{2,7-130,0}{48,0}$	$\frac{0,2-27,5}{10,3}$
Встречаемость значений выше ПДК, %	0	46,7	66,7
Максимальная кратность превышения ПДК	0,5	2,6	4,6
Глубина отбора 5–20 см			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	$\frac{0,1-0,4}{0,2}$	$\frac{0,4-40,8}{10,9}$	$\frac{0,1-7,6}{2,4}$
Встречаемость значений выше ПДК, %	0	0	13,3
Максимальная кратность превышения ПДК	0,1	0,8	1,3
Фоновое содержание [10]	0,10	5,40	1,20
ПДК	3,5 [11]	50,0 [11]	6,0 [8]

* над чертой – минимальное и максимальное содержание, под чертой – среднее содержание

С глубиной содержание подвижных форм металлов снижалось в 3,5–4 раза, что доказывает низкую вертикальную миграцию изучаемых металлов. Доля подвижных форм элементов от валового содержания также снизилась до 13,3–51,3 %.

Наиболее высокое содержание валовых и подвижных форм металлов характерно для отдельных участков, где сосредоточено значительное количество источников загрязнения: цех помола цемента, газораспределительная станция, цех аспирации, отделение мела и помола угля. На остальной территории содержание кадмия, свинца и цинка значительно ниже, что свидетельствует о локальном характере загрязнения почв, приуроченного непосредственно к источникам выбросов загрязняющих веществ.

Это подтверждает и изучение земель в санитарно-защитной зоне предприятия, где среднее валовое содержание цинка в слое 0–5 см почв низкое и составило 28,3 мг/кг, подвижных форм – 4,1 мг/кг. Концентрация валовых форм кадмия не превысила 0,1 мг/кг, содержание подвижных форм элемента – ниже чувствительности метода. Содержание свинца в этой зоне также было в среднем в 2 раза ниже по сравнению с почвами промплощадки: среднее валовое содержание элемента составило 25,4 мг/кг, подвижных форм – 4,8 мг/кг. При этом максимальное значение валового свинца превысило ПДК для почв жилых зон в 1,7 раза, подвижного – в 1,9 раза.

Предприятие машиностроительного производства. Основным источником поступления загрязняющих веществ в окружающую среду на предприятии машиностроения могут выступать выбросы в атмосферу от стационарных и мобильных источников, производственные отходы, а также функционирующие на территории предприятия гальваническое и литейное производство.

Так, согласно данным [3], в отходах машиностроительного производства и строительном мусоре содержится значительное количество цинка, концентрация которого превышает норматив для почв в 2,2 и 2,0 раза соответственно. Содержание кадмия и свинца в отходах незначительное, однако при их постоянном воздействии на близлежащие территории находящиеся в них металлы могут накапливаться в почвах, что приведет к формированию участков значительного загрязнения почвенного покрова.

Процессы гальванизации также способствуют поступлению металлов в окружающую среду, приводя к загрязнению почв. Выборочное обследование почв в зонах воздействия локальных очистных

сооружений на территории ряда промышленных предприятий г. Минска показало, что содержание кадмия в почвах достигало 14,4 мг/кг, цинка – 3427, свинца – 193 мг/кг почвы, что в десятки и сотни раз превысило допустимые для данных элементов уровни [12].

Расчеты ориентировочного поступления тяжелых металлов в атмосферный воздух с выбросами при выплавке стального и чугуна, выполненные с использованием удельных показателей выбросов и объемов производства литей, показали, что наибольших объемов выбросов следует ожидать для цинка – от 1 до 4 т в год, свинца – 100–400 кг, кадмия – 4–15 кг [13; 14].

Комплексные исследования почв, проведенные нами на территории предприятия машиностроительной отрасли, позволили установить, что кислотность почв в среднем для верхних горизонтов почв составила рНКС1 7,35, изменяясь от рНКС1 5,51 до рНКС1 7,82, что характеризует реакцию почвенной среды как слабощелочную, на отдельных участках – как среднекислую. Такое подщелачивание почв является характерным для городских территорий [4].

Среднее содержание гумуса в слое почвы 0–5 см, как и на предыдущем исследованном промышленном объекте, высокое – 4,7 %, и изменяется от 1,9 % до 9,0 %. В слое 5–20 см содержание гумуса снижалось незначительно и в среднем составляло 3,86 %, варьируя от 1,1 до 14,2 %.

Оценка почв по содержанию тяжелых металлов показала, что почвы на промплощадке предприятия машиностроительной отрасли загрязнены цинком, в меньшей степени – кадмием и свинцом (табл. 3, 4).

Таблица 3

Основные статистические параметры валового содержания тяжелых металлов в почвах промплощадки в зоне воздействия машиностроительного производства

Table 3

The main statistical parameters of the general content of heavy metals in soils of an industrial site in a zone of influence of the enterprise of machine-building production

Показатель	Cd	Zn	Pb
Глубина отбора 0–5 см			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	<u>0,1–1,6*</u> 0,5	<u>68,4–947,0</u> 48,0	<u>10,9–61,5</u> 10,3
Встречаемость значений выше ПДК (ОДК), %	44,4	100,0	33,3
Максимальная кратность превышения ПДК (ОДК)	3,2	17,2	1,4
Глубина отбора 5–20 см			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	<u>0,1–1,3</u> 0,5	<u>41,4–1021,0</u> 311,1	<u>8,48–77,8</u> 26,8
Встречаемость значений выше ПДК (ОДК), %	37,5	77,8	22,2
Максимальная кратность превышения ПДК (ОДК)	2,5	18,6	1,9
Фоновое содержание [10]	0,26	12,3	5,4
ПДК (ОДК)	0,50 [8]	55,0 [8]	40,0 [9]

* над чертой – минимальное и максимальное содержание, под чертой – среднее содержание

Так, средние валовые концентрации вышеуказанных элементов в верхнем горизонте почв промплощадки значительно превышали фоновый уровень – от 1,9 раз для кадмия до 33,7 раза для цинка. Максимальные концентрации превышали фон в 6,2 раза для кадмия, 77,0 – для цинка и 11,4 раза – для свинца.

Сравнение фактических данных с ПДК (ОДК) химических веществ в почве свидетельствует о значительном загрязнении почв на изученной промплощадке цинком, повышенные концентрации которого отмечены во всех отобранных образцах почв. При этом его среднее содержание в слое почв 0–5 см превышало допустимый уровень в 7,5 раза, максимально – в 17,2 раза. Средневзвешенная концентрация кадмия в почве находилась на уровне ПДК, разработанного для почв промышленных территорий. По сравнению с санитарно-гигиеническими нормативами, 44,4 % проб почв загрязнены кадмием с наибольшим значением, равным 3,2 ОДК и 1/3 проб – свинцом, с максимальным значением, равным 1,4 ПДК.

В слое 5–20 см валовое содержание металлов в почве было незначительно ниже по сравнению с горизонтом 0–5 см. Установлено, что в этом слое доля загрязненных проб была несколько ниже и составляла для цинка 77,8 %, кадмия – 37,5 и свинца 22,2 %. При этом максимальное содержание цинка, равное 18,6 ОДК, было выше, чем в слое почв 0–5 см, кадмия и свинца ниже и составляло 2,5 ОДК и 1,9 ПДК соответственно.

Оценка корреляционной зависимости между валовым содержанием кадмия, цинка и свинца указывает на тесную корреляционную связь между кадмием и цинком; кадмием и свинцом с коэффициентом корреляции $r = 0,9$, а также свинцом и цинком с коэффициентом корреляции $r = 0,8$. В то же время корреляционная зависимость между накоплением элементов и содержанием гумуса была невысокой и составляла для свинца $r = 0,2$, для цинка $r = 0,5$. Зависимость между кислотностью почв и содержанием в ней тяжелых металлов отсутствовала.

Результаты изучения подвижных форм кадмия, цинка и свинца в почвах в зоне воздействия предприятия машиностроительного производства свидетельствует, что средняя и максимальная концентрации подвижного кадмия в горизонте почв 0–5 см превышает фон в 3,0 и 9,0 раз, свинца – 3,3 и 14,6 раза соответственно (табл. 4). Содержание цинка в почвах промплощадки, по сравнению с фоном, было очень высокое: средняя, минимальная и максимальная концентрации элемента превышают фоновый уровень в 18,7 раза, 3,2 и 57,7 раза соответственно.

Таблица 4

Основные статистические параметры содержания подвижных форм тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия машиностроительного производства

Table 4

The main statistical parameters of maintenance of mobile forms of heavy metals in soils in a zone of influence of the enterprise of machine-building production

Показатель	Cd	Zn	Pb
Глубина отбора 0–5 см			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	$\frac{0,1-0,9}{0,3}$	$\frac{17,1-311,8}{101,1}$	$\frac{0,1-17,5}{3,9}$
Встречаемость значений выше ПДК (ОДК), %	0	33,3	11,1
Максимальная кратность превышения ПДК (ОДК)	0,3	6,2	2,9
Глубина отбора 5–20 см			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	$\frac{0,08-0,7}{0,3}$	$\frac{6,1-331,8}{75,6}$	$\frac{0,1-16,8}{3,4}$
Встречаемость значений выше ПДК (ОДК), %	0	22,2	11,1
Максимальная кратность превышения ПДК	0,2	6,6	2,8
Фоновое содержание [10]	0,10	5,40	1,20
ПДК	3,5 [11]	50,0 [11]	6,0 [8]

Установлена тесная корреляционная зависимость между концентрацией подвижных форм металлов в почве. Коэффициент корреляции между кадмием и свинцом, а также цинком и свинцом составил $r = 0,8$, между кадмием и цинком – $r = 0,9$.

Исследования показали, что основным элементом-загрязнителем почв промплощадки предприятия машиностроительного производства являлся цинк, на отдельных участках – свинец. Загрязнения почв кадмием ни на одном из участков не зафиксировано. По сравнению с ПДК, около 30 % проб почв, отобранных из горизонта 0–5 см, загрязнены цинком и 11 % проб – свинцом. При этом среднее и максимальное содержание цинка превысило гигиенический норматив в 2,0 и 6,2 раза соответственно. Максимальное для промплощадки содержание валового свинца также выше ПДК, разработанного для промышленных объектов, в 2,9 раза. Среднее содержание подвижного кадмия в верхнем слое почв ниже норматива для подвижных форм элемента.

Количество подвижных форм исследованных элементов в горизонте почвы 0–5 см не очень высокое. Наибольшей подвижностью характеризовался кадмий, доля подвижных форм которого от валовых концентраций составила 54,2 %. Доля подвижных форм цинка не превышала 24,4 %, свинца – 11,5 %. Невысокая миграционная активность является характерной особенностью слабощелочных почв. Это подтвердил корреляционный анализ: коэффициенты корреляции между кислотностью почв и изучаемыми элементами крайне низкий, для цинка – отрицательный. Тесной корреляционной зависимости между содержанием гумуса и накоплением подвижных форм элементов также не выявлено. Коэффициент корреляции в этом случае составляет для свинца $r = 0,2$, кадмия – $r = 0,3$ цинка – $r = 0,5$.

Отличительной особенностью территории предприятия являлось увеличение с глубиной концентрации подвижного цинка и практически неизменные концентрации кадмия и свинца. Так, содержа-

ние подвижного цинка на глубине в среднем достигло 1,5 ПДК, с максимальным значением, равным 6,6 ПДК, что выше, чем в слое 0–5 см, и может быть связано с большей подвижностью цинка в киллой среде горизонта 5–20 см.

Наиболее высокое содержание валовых и подвижных форм цинка в почве на промплощадке предприятия характерно для территорий, где расположены такие источники загрязнения, как участок изготовления комплектующих, котельная, станция регенерации масел. В районе котельной также наблюдалось накопление в почвах кадмия и свинца.

В санитарно защитной зоне предприятия накопление в почвах валовых и подвижных форм кадмия и свинца не отмечено: среднее содержание составило в слое почв 0–5 см для кадмия составило 0,1 и 0,08 мг/кг, свинца – 22,8 и 0,4 мг/кг соответственно, что подтверждает локальный характер загрязнения почв данными веществами. В то же время валовое содержание цинка в поверхностном горизонте почв достигло допустимого уровня, составив 56,3 мг/кг, с глубиной повысившись до 1,5 ОДК. Подвижные формы цинка составили 13,5 мг/кг, с глубиной также повысившись незначительно. Аналогичное распределение по почвенному профилю характерно для кадмия, концентрация которого в слое 5–20 см, по сравнению со слоем 0–5 см, увеличивалось в 2 раза.

Предприятие литейного производства. Источником загрязнения почв тяжелыми металлами на предприятиях, специализирующихся на литье чугуна и стали, может являться пыль чугунолитейного и электрометаллургического производства, содержание кадмия в которой, согласно [13], составляют 1,04 и 182 мг/кг, свинца 332 и 2030–23200 мг/кг, цинка – 1977 и 112400 мг/кг соответственно, что в сотни и тысячи раз превышает нормативы для почв. В связи с этим попадание загрязненной металлами пыли на почвенный покров близлежащих к источнику загрязнения территорий может привести к загрязнению земель за короткий промежуток времени.

Как и в других исследованных промплощадках, кислотность почв в зоне воздействия литейного производства крайне низкая и составила в среднем pH_{KCl} 7,51, с разбросом значений от pH_{KCl} 6,74 до 8,14, что позволило характеризовать реакцию почвенной среды как нейтральную и слабощелочную.

Содержание гумуса в 20-сантиметровом слое почвы, как и в почвах других исследуемых промплощадок, высокое – 4,20 %, с разбросом значений от очень низкого – 0,74 % до высокого – 14,55 %.

Изучение содержания кадмия, цинка и свинца в почвенном покрове на территории предприятия, специализирующемся на выплавке чугунных изделий, показало существенное накопление в почвах валовых форм вышеуказанных элементов, а также повышенное содержание подвижных форм цинка и свинца (табл. 5).

Таблица 5

Основные статистические параметры валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия литейного производства (горизонт 0–20 см)

Table 5

The main statistical parameters of the general contents and mobile forms of heavy metals in soils in a zone of influence of the enterprise of foundry production (the horizon of 0–20 cm)

Показатель	Cd	Zn	Pb
Валовое содержание			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	<u>0,1–2,4</u> 0,3	<u>38,8–1208,5</u> 146,7	<u>9,6–218,2</u> 36,2
Встречаемость значений выше ПДК (ОДК), %	7,1	82,1	21,4
Максимальная кратность превышения ПДК (ОДК)	4,8	21,9	6,8
Фоновое содержание [7]	0,26	12,3	5,4
ПДК (ОДК)	0,50 [8]	55,0 [8]	40,0 [9]
Подвижные формы			
Фактическое содержание химического элемента, мг/кг	–	<u>9,9–422,2</u> 61,4	<u>2,6–145,0</u> 24,5
Встречаемость значений выше ПДК (ОДК), %	–	75,0	92,9
Максимальная кратность превышения ПДК (ОДК)	–	8,4	24,1
Фоновое содержание в почвах Беларуси [10]	0,10	5,40	1,20
ПДК	3,5 [11]	50,0 [11]	6,0 [8]

* над чертой – минимальное и максимальное содержание, под чертой – среднее содержание

Изучение валового содержания тяжелых металлов в почвах в зоне воздействия литейного производства показало, что средние концентрации металлов в слое почв 0–20 см превышают фоновый уровень: кадмия – в 1,2 раза, цинка – 11,9, свинца – в 6,7 раза. Максимальное значение элементов выше фона от 9,2 раза для кадмия до нескольких десятков раз для цинка и свинца.

Сравнение полученных данных с установленными для валовых форм элементов нормативами показало, что среднее содержание кадмия и свинца в почве не превышало допустимый уровень, содержание цинка составило 2,7 ОДК. По сравнению с гигиеническими нормативами, более 4/5 проб загрязнены цинком с максимальным значением, равным 21,9 ОДК, 21,4 % – свинцом с максимальным значением, достигающим 6,8 ПДК, и 7,1 % – кадмием с наибольшим значением, доходящего до 4,8 ОДК.

Оценка корреляционной зависимости между валовым содержанием кадмия, цинка и свинца выявила тесную корреляционную связь между кадмием и цинком с коэффициентом корреляции $r = 0,9$, кадмием и свинцом $r = 0,8$, свинцом и цинком $r = 0,8$. В то же время корреляционная зависимость между накоплением элементов и pH_{KCl} было незначительная, с коэффициентом корреляции для всех элементов $r = 0,1$. Зависимость между содержанием гумуса в почве промплощадки предприятия и накоплением в ней тяжелых металлов практически отсутствует.

Оценка подвижности элементов свидетельствует, что в слое почвы 0–20 см промплощадки содержание подвижного цинка превысило фоновый уровень от 1,8 до 78,2 раза. Средняя, минимальная и максимальная концентрация свинца превысила фон в 20,4, 2,2 и 120,8 раза соответственно. Содержание кадмия было ниже чувствительности метода. Корреляционная связь между концентрациями свинца и цинка в почве тесная и составила $r = 0,7$.

Сравнение полученных данных с санитарно-гигиеническими нормативами показало, что среднее содержание подвижного цинка превысило допустимый уровень в 1,2, а свинца – в 4,1 раза. Максимальная зафиксированная в почвах концентрация подвижного цинка достигла 8,4 ПДК, свинца – 24,2 ПДК. Доля почвенных проб, загрязненных цинком была выше допустимого уровня и составила 75 %, свинцом – более 92 %.

Оценка доли подвижных форм элементов от их валовых форм выявила высокую подвижность свинца, которая в среднем составила 64,0 %, более низкую подвижность цинка – 44,8 %. При этом корреляционной связи между накоплением в почве подвижных форм металлов и pH_{KCl} среды, а также содержанием в почве гумуса не выявлено.

Наиболее высокие концентрации валового и подвижного цинка на территории предприятия отмечены в зоне воздействия литейного цеха, цеха шихты и формовочных материалов, гаражей и других источников загрязнения, где его содержание в почвах превысило допустимый уровень в несколько раз, на отдельных участках – в десятки раз. На этих же участках отмечено загрязнение почв свинцом.

Загрязнение почв цинком отмечено не только на территории предприятия, но и в его санитарно-защитной зоне. Средняя концентрация валового цинка достигла 62,7 мг/кг или 1,1 ОДК, максимальная – 1,4 ОДК. Среднее содержание свинца и кадмия не превысило нормативы для данных элементов, составив 17,4 и 0,1 мг/кг соответственно.

Содержание подвижного цинка в среднем в санитарно защитной зоне составило 23,6 мг/кг или 1,0 ПДК, с максимальным значением, составляющем 1,6 ПДК. Содержание подвижного свинца также превысило гигиенический норматив на разных участках от 1,3 до 2,9 раза. Концентрации кадмия, как и на территории промплощадки, была ниже чувствительности метода.

Заключение

Оценка валового содержания кадмия, цинка и свинца в зоне воздействия промышленных предприятий выявила загрязнение почв цинком и кадмием, в меньшей степени – свинцом. Сравнение полученных данных с санитарно-гигиеническими нормативами показало, что среднее содержание цинка в почвах в зоне воздействия машиностроительного производства превысило допустимый уровень в 7,5 раза, цементного и литейного производства – в 2,7 раза. Доля загрязненных проб почв составила от 80,0 % на промплощадке литейного производства до 100 % – на предприятии машиностроительного комплекса. Максимальные концентрации цинка составили от 7,7 до 21,9 ОДК.

Загрязнение почв валовым кадмием менее выражено. На предприятии по производству цемента данным элементом загрязнено 66,6 % проб со средним значением, равным 1,8 ОДК. В зоне воздействия машиностроительного и литейного производства доля загрязненных проб составила 44,4 и 7,1 % проб соответственно, при этом среднее содержание элемента не превысило допустимый уровень. Максимальные значения концентрации кадмия превысили ОДК от 3,2 до 4,8 раза.

Загрязнение почв свинцом незначительное и носит фрагментарный характер. Доля проб почв, где валовое содержание свинца превысило гигиенический норматив, составила в зоне воздействия литейного производства – 21,4 %, на предприятии по производству цемента – 13,3 %, машиностроительного

комплекса – 33,3 %. При этом средние валовые концентрации металла ниже установленного для промплощадок гигиенического норматива. Наибольшая концентрация свинца отмечена в зоне воздействия литейного производства, где его содержание составило 6,8 ПДК.

Оценка подвижных форм металлов выявила загрязнение почв преимущественно цинком и свинцом и отсутствие загрязнения кадмием. Среднее содержание подвижных форм цинка в зоне воздействия литейного производства превысило гигиенический норматив в 1,2 раза, машиностроительного производства – 1,6 раза, цементного производства – не достигло предельно допустимого уровня. Доля почвенных проб, загрязненных цинком, составила на предприятии машиностроения – 33 %, предприятии по производству цемента – 47 %, литейном производстве – 75 %. Максимальные зафиксированные концентрации металла в почвах промплощадок изученных промышленных объектов составили от 2,6 до 8,4 ПДК.

Наибольшее загрязнение почв подвижным свинцом отмечено на предприятии, специализирующемся на литейном и цементном производстве, где среднее содержание элемента превысило норматив в 4,1 и 1,7 раза соответственно. На предприятии машиностроения среднее содержание свинца ниже гигиенического норматива. Доля проб почв, загрязненных свинцом, выше ПДК составила на предприятии машиностроения – 11 %, предприятии по производству цемента – 66 %, литейном производстве – 92 %. Наибольшие отмеченные в почвах концентрации подвижного свинца достигли от 2,9 до 24,2 ПДК.

В санитарно-защитных зонах исследованных промышленных объектов концентрации подвижных форм кадмия и цинка, по сравнению с промплощадками предприятий, незначительные и не превышали гигиенических нормативов, установленных для жилых зон. В то же время в почвах СЗЗ предприятия, специализирующегося на литейном производстве, концентрации подвижного свинца превысили гигиенический норматив на разных участках от 1,3 до 2,9 раза. Содержание цинка в среднем составило 1,0 ПДК, с максимальным значением – 1,6 ПДК.

Библиографические ссылки

1. Правила и порядок определения загрязнения земель (включая почвы) химическими веществами / Технический кодекс установившейся практики ТКП 17.03-02-2013 (02120) [Электронный ресурс]. 2017. URL: http://tnpa.ecoinv.by/index.php?option=com_rsfiles&view=files&layout=view&tmpl=component&path=%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B8%2F%D0%A2%D0%9A%D0%9F_17.03-02-2013.pdf (дата обращения: 03.10.2017).
2. Реестр методик выполнения измерений в области экологического контроля: в 3 ч. / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Минск, 2006.
3. *Какарека С. В., Хомич В. С., Кухарчик Т. И. и др.* Выбросы тяжелых металлов в атмосферу: опыт оценки удельных показателей. Минск, 1998.
4. *Хомич В. С., Какарека С. В., Кухарчик Т. И.* Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси. Минск, 2004.
5. Геохимическое изучение ландшафтов Березинского биосферного заповедника / под ред. К. И. Лукашева. Минск, 1985.
6. *Натаров В. М., Лукашев О. В., Савченко В. В.* Комплексный геохимический фоновый мониторинг в Березинском биосферном заповеднике. Минск, 2013.
7. Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecoinfo.by/uploads/archive/Book2015/1-soil-25-11.pdf> (дата обращения: 11.10.2017).
8. Гигиенические нормативы 2.1.7.12-1- 2004. Перечень предельно допустимых кон-центраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве. [Электронный ресурс]. URL: <http://iso14000.by/library/low/earth/223> (дата обращения: 11.10.2017).
9. Нормативы предельно допустимых концентраций подвижных форм никеля, меди и валового содержания свинца в землях (включая почвы), расположенных в границах населенных пунктов, для различных видов территориальных зон по преимущественному функциональному использованию территорий населенных пунктов: Утв. Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 19.11.2009. № 125.
10. *Мечковский С. А., Чертко Н. К., Заневская Ю. В.* Оценка техногенного загрязнения дерново-подзолистых почв на основе подвижных форм хрома // География и природные ресурсы. 1999. № 1. С. 128–130.
11. Предельно допустимые концентрации подвижных форм хрома, цинка, кадмия в почвах (землях) различных функциональных зон населенных пунктов, промышленности, транспорта, связи, энергетики, обороны и иного назначения: Утв. Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 06.11.2008. № 187.
12. *Хомич В. С., Какарека С. В., Кухарчик Т. И. и др.* Пространственная структура, уровни и источники загрязнения почв г. Минска // Природные ресурсы. 2003. № 4. С. 42–53.
13. Методические рекомендации по идентификации и оценке источников выбросов тяжелых металлов : Утв. приказом Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 12 декабря 2003 г., № 503: Сб. нормативных документов по вопросам охраны окружающей среды. Минск, 2004. Вып. 47. С. 63–98.
14. Atmospheric Emission Inventory Guidebook. A Joint EMEP CORINAIR Production / Prepared by the EMEP Task Force on Emission Inventories. – 3rd edition. URL: <http://www.reports.eea.eu.int/EMEP-CORINAIR4/en>. (data of access: 11.11.2006).

Referenes

1. [Rules and an order of definition of pollution of lands (including soils) chemicals / the Technical code of the established practice of ТКР 17.03-02-2013 (02120)]. 2017. Access mode: http://tnpa.ecoinv.by/index.php?option=com_rsfiles&view=files&layout=view&tmpl=component&path=%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B8%2F%D0%A2%D0%9A%D0%9F_17.03-02-2013.pdf (date of access: 10.03.2017) (in Russ.).
2. [The register of techniques of performance of measurements in the field of environmental control: in 3 sect. / Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of Republic of Belarus]. Minsk, 2006 (in Russ.).
3. Kakareka S. V., Homich V. S., Kukharchik T. I., et al. [Emissions of heavy metals in the atmosphere: experience of assessment of specific indicators]. Minsk, 1998 (in Russ.).
4. Homich, V. S., Kakareka S. V., Kukharchik T. I. [Ekogeokhimiya of city landscapes of Belarus]. Minsk, 2004 (in Russ.).
5. Lukashev K. I. (ed). [Geochemical studying of landscapes Berezinsky biospheric заповедни]. Minsk, 1985 (in Russ.).
6. Natarov V. M., Lukashev O. V., Savchenko V. V. [Complex geochemical background monitoring in the Berezinsky biospheric reserve]. Minsk, 2013 (in Russ.).
7. [The national system of monitoring of the environment in Republic of Belarus]. URL: <http://www.ecoinfo.by/uploads/archive/Book2015/1-soil-25-11.pdf> (date of access: 10.11.2017) (in Russ.).
8. [Hygienic standards 2.1.7.12-1 – 2004. The list of maximum permissible concentration (maximum allowable concentration) and the approximately admissible concentration (AAC) of chemical substances in the soil]. URL: <http://iso14000.by/library/low/earth/223> (date of access: 10.11.2017) (in Russ.).
9. [Standards of threshold limit values of mobile forms of nickel, copper and gross content of lead in the lands (including soils) located in borders of settlements for different types of territorial zones on primary functional use of territories of settlements: Approved by the Resolution of the Ministry of Health of Republic of Belarus 11.19.2009. No. 125] (in Russ.).
10. Mechkovsky S. A., Chertko N. K., Zanevskaya Yu. V. [Otsenka of technogenic pollution of cespitose and podsolic soils on the basis of mobile forms of chrome]. *Geography and natural resources*. 1999. No. 1. P. 128–130 (in Russ.).
11. [Threshold limit values of mobile forms of chrome, zinc, cadmium in soils (lands) of various functional zones of settlements, the industries, transport, communication, power, defense and other appointment: the Ministries of Health of Republic of Belarus Approved by the Resolution 11.06.2008. No. 187] (in Russ.).
12. Homich V. S., Kakareka S. V., Kukharchik T. I., et al. [Spatial structure, levels and sources of pollution of soils of Minsk]. *Natural resources*. 2003. No. 4. P. 42–53 (in Russ.).
13. [Methodical recommendations about identification and assessment of sources of emissions of heavy metals: УТВ. the order of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of Republic of Belarus of December 12, 2003, No. 503. *Collection of normative documents concerning environmental protection*]. Minsk, 2004. Issue 47. P. 63–98 (in Russ.).
14. Atmospheric Emission Inventory Guidebook. A Joint EMEP CORINAIR Production / Prepared by the EMEP Task Force on Emission Inventories. 3rd edition. URL: <http://www.reports.eea.eu.int/EMEP-CORINAIR4/en> (data of access: 11.11.2006).

Статья поступила в редколлегию 28.11.2017
Received by editorial board 28.11.2017