
ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 504.064.36:550.53(476)

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕДОГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ЗОНАХ 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, Минск, Беларусь

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

На промплощадках и в зонах влияния промышленных предприятий формируются устойчивые педогео-химические аномалии, состав и контрастность которых зависят от характера производственных процессов. На территории предприятия машиностроительной отрасли педогеохимическая аномалия представлена медью и цинком, в меньшей степени никелем, хромом и свинцом. На заводе по производству цемента аномалия состоит из наличия в почвах цинка, свинца и кадмия. На предприятии, специализирующемся на литье чугуна и стали, в состав педогеохимической аномалии входят медь, цинк, хром, а также свинец, никель и мышьяк. Внутри данных аномалий выделяются ограниченные по площади ореолы загрязнения почв с более высоким содержанием и более широкой ассоциацией элементов-загрязнителей.

Образец цитирования:

Головатый С. Е., Савченко С. В., Самусик Е. А. Формирование педогеохимических аномалий в зонах воздействия промышленных предприятий // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 3. С. 94–103.

For citation:

Golovaty S. E., Savchenko S. V., Samusik E. A. Formation of pedogeochemical anomalies in zones impacts of industrial enterprises. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 3. P. 94–103 (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.

Елена Андреевна Самусик – аспирант кафедры экологического мониторинга и менеджмента.

Authors:

Sergey E. Golovaty, doctor sciences (agriculture), professor; head of the department of environmental monitoring and management.

sscience@yandex.ru

Svetlana V. Savchenko, PhD (geological and mineralogical); leading researcher.

svscience@rambler.ru

Elena A. Samusik, graduate student of the department of environmental monitoring and management.

e.samusik@mail.ru

Ключевые слова: педогеохимическая аномалия; загрязнители; валовое содержание тяжелых металлов; промышленное предприятие; ассоциация элементов-загрязнителей.

FORMATION OF PEDOGEOCHEMICAL ANOMALIES IN ZONES IMPACTS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

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

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

^b*Institute of Environmental Management of National Academy of Sciences of Belarus,
Skorina street, 10, 220114, Minsk, Belarus*

Corresponding author: S. E. Golovaty (sscience@yandex.ru)

On industrial sites and in the zones of influence of industrial enterprises, stable pedogeochemical anomalies are formed, the composition and contrast of which depend on the nature of production processes. On the territory of the machine-building industry, the pedogeochemical anomaly is represented by copper and zinc, to a lesser extent by nickel, chromium and lead. In the soils of the cement plant, the anomaly consists of zinc, lead and cadmium. At the enterprise specializing in cast iron and steel casting, the composition of the pedogeochemical anomaly includes copper, zinc, chromium, and also lead, nickel and arsenic. Within these anomalies, there are limited areas of halo contamination of soil with a higher content and a wider association of pollutant elements.

Key words: pedogeochemical anomaly; pollutants; gross content of heavy metals; industrial enterprise; association of pollutant elements.

Введение

Специфика промышленного производства способствует поступлению в окружающую среду широкого спектра химических веществ техногенного происхождения: тяжелых металлов, нефтепродуктов, ПАУ, ПХБ и др., которые накапливаются в почвах как на близлежащих к источнику загрязнения участках, так и отдаленных территориях. В частности, в почвах городов, в связи с наличием в их пределах значительного количества промышленных предприятий, идет интенсивное накопление тяжелых металлов, среднее содержание которых, рассчитанное за десятилетний период, превышает фоновые значения для цинка – в 3,3 раза, свинца – 2,4, меди – 1,7, никеля – в 1,4 раза [9].

Наибольшее накопление тяжелых металлов приурочено к зонам импактного воздействия, формирующихся на территориях около промышленных объектов, где в результате значительных потоков загрязнителей и их концентрации в почвах происходит формирование положительных педогеохимических аномалий различной площади и элементного состава. Характер аномалий зависит от особенностей технологических процессов, используемого сырья, выпускаемой на предприятии продукции, а также от физических и химических характеристик почв. На формирование аномалий влияют также свойства самих элементов, их объем и интенсивность привноса в почвы.

Поступление тяжелых металлов в окружающую среду в составе выбросов, сбросов, сырья или отходов происходит преимущественно в виде газов, аэрозолей или в составе сточных вод. Так, согласно [3; 13], в пыли чугунолитейного и электрометаллургического производства содержание кадмия достигает 1,04 и 182 мг/кг, свинца 332 и 2030–23 200, меди – 306 и 183–2064, никеля – 54,2 и 340, цинка – 1977 и 112 400 мг/кг соответственно, что в сотни и тысячи раз превышает нормативы для почв.

В пыли цементного производства содержание данных загрязнителей также высокое – от 0,21 до 219,1 мг/кг – кадмия, 642–3728,9 – свинца, 160–690,5 – цинка, от 31 до 1151 мг/кг – меди. При этом 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, ртути – 0,004–0,02, меди – 7,5–9,29, цинка – от 1,16 до 17,7 г/т.

С основным сырьем (глиной, мелом) в процесс производства цемента может поступать до 7,1–7,6 % меди, 8,8–15,0 – цинка, 28,3–44,0 – кадмия, 10,2–12,2 % – свинца, с пиритными огарками 92,1–93,0 % меди, 84,6–91,0 – цинка, 55,5–67,0 – кадмия, 87,6–89,6 – свинца, 49,6–55,9 % – ртути [3].

В отходах машиностроительного производства и строительном мусоре концентрации кадмия составляют 0,19 и 1,34 мг/кг, свинца – 16,5 и 22,9, меди – 31,8 и 43,6, никеля – 13,0 и 14,9, цинка – 110,7 и 122,4, хрома – 65,5 и 1127 мг/кг соответственно [3].

Таким образом, на территории и в зоне влияния промышленных объектов существуют условия для формирования локальных геохимических аномалий, которые представляют собой источники, объединенные одним территориальным выделом: территорией предприятия, ореолом загрязнения, состоящих из различных по площади и контрастности более мелких аномалий с индивидуальным набором элементов-загрязнителей, обусловленных точечными источниками загрязнения.

Объекты и методы исследований

Изучение педогеохимических аномалий проводилось на территории различных по специализации промышленных объектов (предприятие по производству цемента, предприятие по производству машин и оборудованию и литейное производство) и в зоне их влияния. При обследовании промплощадок учитывалась площадь свободной от застройки территории, ее функциональное использование, местоположение по отношению к источникам загрязнения, возможные пути поступления и миграции тяжелых металлов и предполагаемые участки их аккумуляции.

В основу работы положены результаты определения в почвах рН и валового содержания кадмия, цинка, свинца, меди, никеля, хрома и мышьяка. Процедура извлечения валовых форм химических элементов из почвенных образцов проводилась методом химического экстрагирования сильными кислотами ($\text{HF} + \text{HClO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{HCl}$) с последующим определением металлов на атомно-абсорбционном спектрофотометре.

Определение показателя рН производилось путем извлечения обменных катионов из почвы 1Н раствором хлористого калия при соотношении почвы и раствора 1:2,5 и последующем потенциометрическом определении рН с использованием стеклянного электрода.

Накопление в почвах химических веществ оценивалось по их относительной распространенности с использованием коэффициента концентрации (K_c), который представляет собой отношение установленной фактической концентрации элемента или показателя к его фоновому содержанию.

В качестве фона использовались данные по концентрации химических веществ на фоновых территориях, полученные при наблюдениях за химическим загрязнением земель в рамках НСМОС [9], для хрома и мышьяка – согласно [11].

На основе K_c рассчитывался суммарный коэффициент загрязнения (Z_c), позволяющий оценить степень загрязнения почв и контрастность образовавшейся в них педогеохимической аномалии [12]. В классическом варианте формула расчета Z_c имеет вид:

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1),$$

где n – число учитываемых аномальных элементов.

На основе Z_c проводится классификация земель по категориям в зависимости от степени опасности загрязнения почв: допустимое ($Z_c < 16$), умеренно опасное ($Z_c = 16–32$), опасное ($Z_c = 32–128$), чрезвычайно опасное ($Z_c > 128$) [5].

Дополнительно проводилось сравнение содержания элементов в почвах с санитарно-гигиеническими нормативами (ПДК (ОДК)) [1].

Результаты исследований и их обсуждение

Изучение возможности формирования на территории предприятия машиностроительной отрасли педогеохимических аномалий базировалось на комплексных исследованиях почв, в том числе их кислотно-щелочных условий, с которыми связаны процессы образования и устойчивости комплексных соединений металлов, условия их миграции и аккумуляции в почвенном покрове.

Как показала оценка показателя рН, на территории промплощадки сформировалась педогеохимическая аномалия со слабощелочными условиями почвенной среды, которая для верхних горизонтов почв по показателю рН в среднем равна 7,35. На отдельных локальных участках встречаются ореолы со слабокислой реакцией почвенного раствора. В нижележащих горизонтах слабощелочная реакция почв сохранилась (рН 7,52), что свидетельствует о радиальном распространении педогеохимической аномалии. Такое подщелачивание почв, согласно [2; 9; 14], является характерным для городских территорий, подвергающихся воздействию значительного количества различных источников загрязнения.

Оценка почв на территории предприятия машиностроительной отрасли свидетельствует, что средняя для почв промплощадки валовая концентрация кадмия в верхнем горизонте почв составляет 0,5 мг/кг с минимальным значением, равным 0,1 мг/кг, максимальным – 1,6 мг/кг, цинка – 414,2 мг/кг,

68,4 и 947,0 мг/кг, свинца – 34,2 мг/кг, 10,9 и 61,5 мг/кг, меди – 192,0 мг/кг, 25,4 и 774,0 мг/кг, никеля – 48,7 мг/кг, 12,1 и 112,1 мг/кг, хрома – 388,4 мг/кг, 23,1 и 915,0 мг/кг и мышьяка – 4,6 мг/кг, 0,3 и 7,1 мг/кг соответственно. По сравнению со средним многолетним значением, рассчитанным для почв городских территорий, почвы предприятия обогащены медью в 24,6 раза, цинком – 10,3, никелем – 9,5, свинцом – 2,7 и кадмием в 1,7 раза, что подтверждает значительную техногенную нагрузку на почвы со стороны промышленных объектов.

Сравнение валового содержания тяжелых металлов в почвах промлощадки с их фоновыми концентрациями (в качестве фоновых концентраций использовались данные наблюдений за химическим загрязнением земель на фоновых территориях НСМОС за 2015 г.) позволяет констатировать наличие на территории предприятия площадной положительной высококонтрастной педогеохимической аномалии, состоящей из широкой ассоциации элементов, которая образует следующий ряд: $\text{Cu}_{41,7}\text{--Zn}_{33,7}\text{--Ni}_{13,2}\text{--Cr}_{10,8}\text{--Pb}_{6,3}\text{--As}_{3,1}\text{--Cd}_{1,9}$. По коэффициенту концентрации $Z_c=104,7$ промлощадка относится к территориям с опасным уровнем загрязнения почв, что требует постоянного контроля за ее эколого-геохимическим состоянием.

Оценка данной педогеохимической аномалии с использованием гигиенических нормативов, определяющих опасность загрязнения почв для биоты и человека, подтвердила ее наличие, при этом аномалия, рассчитанная с использованием ПДК (ОДК), имеет следующий вид: $\text{Zn}_{7,5}\text{--Cu}_{5,8}\text{--Cr}_{3,9}\text{--Ni}_{2,4}$.

Внутри данной аномалии выделяются ограниченные по площади ореолы загрязнения почв с более высоким содержанием поллютантов, приуроченные к локальным источникам поступления загрязняющих веществ, расположенным на территории данного промышленного объекта. В состав каждого ореола в качестве основных металлов-загрязнителей почв входят медь и цинк, содержание которых в разы и десятки раз превышает концентрации других элементов (табл. 1).

Таблица 1

Локальные педогеохимические аномалии на территории предприятия по производству машин и оборудования

Table 1

Local pedogeochemical anomalies in the territory of the enterprise for the production of machinery and equipment

Местоположение аномалии	Ассоциация элементов-загрязнителей
Территория в зоне воздействия цеха по производству дизельных корпусов и энергоцеха	$\text{Cu}_{168,3}\text{--Zn}_{77,0}\text{--Cr}_{22,3}\text{--Ni}_{13,2}\text{--Pb}_{10,4}\text{--Cd}_{3,8}\text{--As}_{3,7}$
Газон в зоне воздействия котельной	$\text{Zn}_{74,3}\text{--Cu}_{53,7}\text{--Pb}_{11,4}\text{--Ni}_{10,1}\text{--Cd}_{6,2}\text{--Cr}_{5,5}\text{--As}_{3,1}$
Газон в зоне воздействия станции регенерации масел и железнодорожных путей	$\text{Zn}_{28,7}\text{--Cu}_{21,9}\text{--Ni}_{9,3}\text{--Pb}_{6,3}\text{--Cr}_{4,2}\text{--Cd}_{2,3}\text{--As}_{1,9}$
Территория в зоне воздействия механического цеха	$\text{Cu}_{42,9}\text{--Zn}_{39,5}\text{--Ni}_{30,3}\text{--Cr}_{20,5}\text{--Pb}_{5,1}\text{--As}_{4,7}\text{--Cd}_{3,8}$

Приоритетность остальных поллютантов индивидуальна на каждом участке исследований и обусловлена характером источника загрязнения. По суммарному коэффициенту загрязнения Z_c , равному от 97,7 до 292,7, данные участки относятся к территориям с опасным и чрезвычайно опасным уровнем загрязнения земель.

Наиболее высококонтрастная педогеохимическая аномалия с $Z_c=292,7$, в составе которой преобладают медь и цинк, в меньшем количестве – хром, свинец и никель, а также кадмий и мышьяк, сформировалась в зоне воздействия нескольких источников загрязнения. Содержание элементов здесь значительно выше фоновых значений – от 3,7 раза для мышьяка до 168,3 раза – для меди.

По сравнению с почвами промлощадки, концентрация меди в почвах данного ореола загрязнения выше в 4,0 раза, цинка – 2,3, хрома – 2,1, кадмия – 2,0, свинца – 1,6 и мышьяка – 1,2 раза. Значение никеля аналогично среднему, рассчитанному для почв территории промышленного объекта.

Менее контрастная аномалия с преобладанием меди, цинка, никеля и хрома с $Z_c=140,8$, выявлена на участке около механического цеха, складов и химчистки. Содержание металлов на данном участке выше фона от 3,8 раза для кадмия до 42,9 раза – для меди. В то же время, по сравнению со средними значениями, рассчитанными для почв территории предприятия, здесь наблюдаются повышенные концентрации только отдельных элементов: никеля – 2,3 раза, кадмия – 2,0, хрома – в 1,9 раза, мышьяка – 1,5 и цинка в 1,2 раза.

В перечень приоритетных загрязняющих веществ, характерных для других ореолов загрязнения, сформировавшихся на промплощадке, входят медь, цинк, свинец и никель. Содержание хрома, кадмия и мышьяка в них незначительное.

С глубиной педогеохимическая аномалия, сформировавшаяся на территории предприятия, сохраняется, однако ее контрастность и микроэлементный состав уменьшается, что подтверждает техногенный характер ее происхождения, не связанный с составом почв и почвообразующих пород.

Оценка корреляционной зависимости между содержанием в педогеохимической аномалии изученных металлов выявила тесную корреляционную связь между цинком и кадмием с коэффициентом корреляции $r = 0,91$, цинка с медью и свинцом, а также свинца и кадмия, хрома и никеля с $r = 0,79–0,87$ (рис. 1). Средняя корреляционная зависимость ($+0,5 < r < +0,7$) отмечена для меди с кадмием, свинцом и хромом, а также для хрома и цинка, что подтверждает техногенную природу сформировавшихся в почвах аномалий.

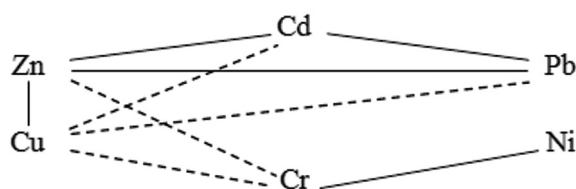


Рис. 1. Ассоциация элементов-загрязнителей в почвах на территории предприятия по производству машин и оборудования (сплошная линия – $r > 0,7$, штриховая линия – $0,5 < r < 0,7$).

Fig. 1. Association of pollutant elements in soils on the territory of the enterprise for the production of machinery and equipment (solid line – $r > 0,7$, dashed line – $0,5 < r < 0,7$)

На удалении от источников загрязнения, расположенных на промплощадке предприятия, содержание тяжелых металлов в почвах снижается, поэтому сформировавшаяся в периферийной зоне педогеохимическая аномалия состоит из следующей последовательности: $Zn_{4,6}-Ni_{2,3}-Cu_{2,5}-Pb_{2,0}-As_{1,7}$. При этом, в отличие от промплощадки предприятия, с глубиной контрастность аномалии увеличивается. Сравнение фактического содержания металлов с санитарно-гигиеническими нормативами свидетельствует о наличии на данном участке аномального количества мышьяка – $As_{1,25}$.

Исследования почв в зоне воздействия цементного завода показали, что химический состав образующихся там отходов и выбросов существенно влияет на содержание в почвах тяжелых металлов и кислотно-щелочные характеристики почв, определяющие условия аккумуляции и рассеивания химических элементов в почвенном покрове.

В связи с интенсивным подщелачиванием земель, обусловленным цементным производством, на территории промплощадки предприятия сформировалась устойчивая педогеохимическая аномалия, характеризующаяся повышенной щелочностью почв: показатель pH здесь в верхнем горизонте составляет в среднем 8,30 с разбросом значений от pH 8,00 до 8,62. По кислотно-щелочным условиям почвы на большей части территории относятся к среднещелочным, на двух территориально ограниченных участках – к сильнощелочным [10]. На некотором удалении от источников выбросов цементной пыли встречаются участки с нейтральной реакцией почвенного раствора. Аналогичное подщелачивание почв характерно в целом для городских территорий, однако в большинстве случаев городские почвы являются нейтральными или слабощелочными с pH не более 7,5 [2].

В нижележащих горизонтах кислотно-щелочные условия почв и характер аномалии изменяются незначительно, за исключением отдельных участков, где почвы из слабощелочных переходят в группу слабокислых с pH 5,45, что более характерно для естественных, чем для антропогенно-трансформированных почв [6].

Исследования валового содержания тяжелых металлов в почвах промплощадки предприятия по производству цемента свидетельствуют, что средняя концентрация кадмия в верхнем горизонте почв составляет 0,9 мг/кг с разбросом значений от 0,1 до 2,4 мг/кг, цинка – 147,2 мг/кг, 21,1 и 424,0 мг/кг, свинца – 26,7 мг/кг, 9,0 и 65,3 мг/кг, меди – 7,0 мг/кг, 2,0 и 12,1 мг/кг, никеля – 7,2 мг/кг, 4,3 и 9,9 мг/кг, хрома – 17,9 мг/кг, 10,6 и 25,1 мг/кг и мышьяка – 11,2 мг/кг, 4,4 и 36,0 мг/кг соответственно. По сравнению с почвами городов, на территории предприятия почвы имеют повышенное содержание цинка – в 3,7 раза, кадмия – 3,1, свинца – 2,1 и никеля – в 1,4 раза, что значительно ниже, чем на предприятии по производству машин и оборудования.

Сравнение концентраций валовых форм металлов в почвах с фоновыми значениями свидетельствует о наличии на территории предприятия площадной положительной педогеохимической аномалии, состоящей из трех элементов: $Zn_{12,0}-Pb_{4,9}-Cd_{3,5}$. По коэффициенту концентрации $Z_c=18,4$ промплощадка относится к территориям с умеренно опасным уровнем загрязнения почв, что не является критическим для промышленных территорий.

Сравнение средних концентраций элементов в почвах промплощадки с гигиеническими нормативами также позволяет констатировать наличие на территории предприятия аномалии, состоящей из кадмия, цинка и мышьяка: $Zn_{2,7}-Cd_{1,8}-As_{1,1}$. При этом ее контрастность ниже, чем при оценке загрязнения земель с использованием фоновых значений.

Внутри данной аномалии, преимущественно в центре, выделяются локальные ореолы загрязнения с более высоким содержанием и более широкой ассоциацией поллютантов, чем на территории промплощадки в целом. При этом состав аномалий существенно различается и зависит от характера источников загрязнения (табл. 2).

Таблица 2

Локальные педогеохимические аномалии на территории предприятия по производству цемента

Table 2

Local pedogeochemical anomalies on the territory of a cement production plant

Местоположение аномалии	Ассоциация элементов-загрязнителей
Территория в зоне воздействия отделения мела и помола угля	$Zn_{34,5}-Pb_{12,1}-Cd_{9,2}-As_{5,5}-Ni_{2,6}-Cu_{2,5}$
Газон в зоне воздействия цеха помола цемента	$Zn_{21,2}-Pb_{7,4}-Cd_{6,9}-As_{6,8}-Ni_{2,7}-Cu_{2,6}$
Территория в зоне воздействия газораспределительной станции	$As_{24,0}-Zn_{20,7}-Pb_{9,0}-Cd_{8,1}-Ni_{2,2}-Cu_{2,1}$
Территория в зоне воздействия участка силоса и железнодорожных путей	$Zn_{14,2}-As_{6,6}-Pb_{4,4}-Cd_{2,7}-Ni_{2,4}-Cu_{1,9}$

Наиболее контрастный ореол загрязнения с преобладанием в составе мышьяка и цинка с $Z_c = 105,8$ сформировался на участке в зоне воздействия газораспределительной станции. Содержание металлов здесь превышает фоновые концентрации от 2,1 раза для меди до 24,0 раза – для мышьяка. По суммарному коэффициенту загрязнения данный участок относится к территориям с опасным загрязнением почв в отличие от почв промплощадки в целом, уровень загрязнения которых классифицируется как умеренно опасный.

Концентрации мышьяка на данном участке в 3,2 раза, кадмия – 2,3, свинца – 1,8, цинка – 1,7, меди – 1,4 раза выше, чем в среднем на территории завода. Содержание хрома и никеля сопоставимо с их концентрацией в почвах предприятия в целом.

Идентичная по составу, но менее контрастная по загрязнению, территория с $Z_c = 27,2$ околнута в зоне воздействия участка силоса и железнодорожных путей, где содержания поллютантов превышают фон от 1,9 до 14,2 раза. По суммарному коэффициенту загрязнения она относится к категории с умеренно опасным загрязнением почв.

Совершенно иная по компонентному составу аномалия с $Z_c = 61,4$ выявлена в зоне воздействия нескольких источников поступления в почвы загрязняющих веществ (отделения мела и помола угля). Она представлена широким перечнем элементов-загрязнителей, приоритетным из которых является цинк, в меньшей степени – свинец, кадмий, мышьяк, никель и медь. Содержание металлов здесь превышает фоновые значения – от 2,5 раза для меди до 34,5 раза – для цинка.

По сравнению со средними значениями, рассчитанными для почв территории предприятия, здесь наблюдаются повышенные концентрации цинка – в 2,9 раза, кадмия – 2,7, свинца – 2,4, меди – 1,6, хрома – 1,4 и никеля – в 1,3 раза. Концентрации мышьяка ниже, чем на территории завода.

Аналогичный состав педогеохимической аномалии с $Z_c = 42,6$ имеет участок в зоне воздействия цеха помола цемента, где содержание металлов превышает фон от 2,6 раз для меди до 21,2 раз – для цинка. По сравнению со средними концентрациями для почв завода, здесь отмечается накопление цинка – в 1,8 раза, кадмия – 2,0, меди – 1,7, свинца – 1,5, хрома и никеля – в 1,4 раза. Концентрации мышьяка, как и на предыдущем участке, ниже, чем в среднем в почвах промплощадки.

С глубиной контрастность, площадь и химический состав аномалии, сформировавшейся на территории предприятия, снижается, что подтверждает ее техногенное происхождение, не связанное с естественными процессами почвообразования.

Оценка корреляционной зависимости между валовым содержанием изученных элементов подтвердила тесную корреляционную связь между свинцом, цинком и кадмием с коэффициентом корреляции $r = 0,95–0,98$, а также медью и никелем с $r = 0,90$ (рис. 2). Средняя корреляционная зависимость ($+0,5 < r < +0,7$) характерна для меди с кадмием, свинцом, цинком и хромом, а также для хрома и никеля. Это подтверждает взаимосвязь между поступлением металлов в почву и их аэротехногенным привносом, обусловленным наличием на предприятии по производству цемента значительного количества источников загрязнения.

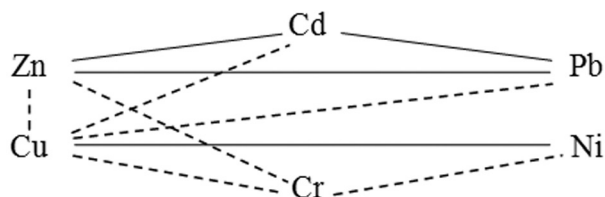


Рис. 2. Ассоциация элементов-загрязнителей в почвах на территории предприятия по производству цемента

Fig. 2. Association of pollutant elements in soils on the territory of a cement production plant

На удалении от промплощадки завода содержание валовых форм тяжелых металлов в верхнем слое почв снижается, за исключением мышьяка, в связи с чем сформировавшаяся здесь педогеохимическая аномалия представлена следующим рядом: $As_{9,4}–Pb_{4,7}–Zn_{2,3}–Ni_{1,4}$. Сравнение концентрации элементов с гигиеническими нормативами выявила на данной территории моноэлементную аномалию, представленную мышьяком.

Источником загрязнения почв тяжелыми металлами на предприятиях, специализирующихся на литье чугуна и стали, может являться пыль чугунолитейного и электрометаллургического производства, котельные установки, склад горюче-смазочных материалов, железнодорожный и автомобильный транспорт.

Как и на других исследованных промплощадках, кислотность почв территории, попадающей в зону воздействия литейного производства, крайне низкая и составляет в среднем 7,51 с разбросом значений от pH 6,74 до 8,14, что характеризует реакцию почвенной среды от нейтральной до среднещелочной [10].

Как показала оценка микроэлементного состава почвенного покрова в пределах промплощадки предприятия, здесь фиксируется интенсивное накопление широкого спектра загрязняющих веществ. Разброс значений кадмия в верхнем слое почв составил от 0,1 мг/кг до 2,4 мг/кг со средним значением, равным 0,3 мг/кг. Для цинка данные показатели достигают 38,8 мг/кг, 1208,5 и 146,7 мг/кг соответственно, свинца – 9,6 мг/кг, 218,2 и 36,2 мг/кг, меди – 9,0 мг/кг, 218,2 и 69,7 мг/кг, никеля – 3,8 мг/кг, 50,0 и 14,2 мг/кг, хрома – 54,0 мг/кг, 1332,0 и 361,6 мг/кг и мышьяка – 0,8 мг/кг, 9,3 и 3,5 мг/кг соответственно. По сравнению с городской территорией почвы промплощадки предприятия обогащены медью в 8,9 раза, цинком – 3,6, никелем и свинцом – в 2,8 раза. Содержание кадмия находится на уровне концентраций данного элемента в городских почвах.

Сравнение валового содержания изученных поллютантов в почвах с фоновыми величинами свидетельствует о наличии на промплощадке литейного завода среднеконтрастной педогеохимической аномалии с $Z_c = 44,9$, состоящей из следующего ряда элементов: $Cu_{15,2}–Zn_{11,9}–Cr_{10,0}–Pb_{6,7}–Ni_{3,8}–As_{2,3}$. По суммарному коэффициенту загрязнения земли предприятия относится к территориям с опасным уровнем загрязнением почв.

Если оценивать загрязнение почв промплощадки с использованием санитарно-гигиенических нормативов, то контрастность и микроэлементный состав аномалии, как и на других промышленных предприятиях, несколько снижается: $Cr_{3,6}–Zn_{2,7}–Cu_{2,1}$.

Более контрастные, ограниченные по площади, ореолы повышенного содержания поллютантов формируются в зоне воздействия конкретного источника загрязнения, при этом содержание и перечень входящих в них металлов выше, чем в целом на территории предприятия (табл. 3).

Таблица 3

Локальные педогеохимические аномалии на территории литейного производства

Table 3

Local pedogeochemical anomalies in the foundry

Местоположение аномалии	Ассоциация элементов-загрязнителей
Газоны в зоне воздействия литейного цеха	$Zn_{98,3}-Cu_{43,8}-Pb_{40,1}-Cr_{16,9}-Ni_{13,5}-Cd_{9,2}-As_{6,2}$
	$Cu_{47,4}-Cr_{37,0}-Zn_{14,5}-Pb_{4,7}-Ni_{3,1}-As_{1,8}-Cd_{1,2}$
Газон в зоне воздействия литейного цеха, цеха шихты и формовочных материалов	$Cu_{30,0}-Cr_{19,2}-Zn_{14,2}-Pb_{6,7}-Cd_{4,2}-Ni_{3,8}-As_{1,6}$
Территория в зоне воздействия скрапоразделочного цеха	$Pb_{21,0}-Cr_{20,3}-Cu_{16,4}-Zn_{13,7}-Ni_{6,1}-As_{2,2}-Cd_{1,9}$
Территория в зоне воздействия гаражей	$Cu_{25,6}-Cr_{16,0}-Pb_{12,6}-Zn_{9,9}-Ni_{3,9}-As_{1,8}-Cd_{1,2}$
Газон в зоне воздействия градирни	$Cu_{25,3}-Zn_{9,9}-Pb_{4,9}-Ni_{4,4}-Cr_{4,0}-Cd_{1,5}-As_{1,2}$

Наиболее выраженные высококонтрастные аномалии с $Z_c = 222,0$ и $Z_c = 103,7$, представленные преимущественно цинком, медью и свинцом, а также медью и хромом, сформировались в почвах в зоне воздействия непосредственно литейного производства с разбросом значений от 1,2 до 98,3 раз превышающих фоновый уровень. При этом содержание вышеперечисленным металлов в них значительно выше, чем остальных элементов.

По сравнению со средними значениями, рассчитанными для почв территории литейного завода, в первой из аномалий наблюдаются повышенное содержание цинка – в 8,2 раза, кадмия – 8,0, свинца – 6,0, никеля – 3,5, меди – 2,9, мышьяка – 2,6 и хрома – в 1,7 раза. Концентрации остальных элементов в пределах или ниже значений, установленных для почв на территории завода в целом. Во второй аномалии концентрации хрома превышает среднее для промплощадки значение в 3,7 раза, меди – 3,1 и цинка – в 1,2 раза, остальных элементов – в пределах или ниже установленных значений.

Контрастная педогеохимическая аномалия с $Z_c = 73,7$, в составе которой преобладает медь, хром и цинк, в меньшем количестве – свинец, кадмий, никель и мышьяк, сформировалась в зоне воздействия нескольких источников загрязнения (литейного цеха, цеха шихты и формовочных материалов). Содержание металлов здесь выше фоновых значений – от 1,6 раза для мышьяка до 30,0 раза – для меди. При этом концентрации кадмия на данном участке в 3,7 раза, меди – 2,0, хрома – 1,9 и цинка – в 1,2 раза выше, чем в среднем на территории предприятия.

На участке в зоне воздействия скрапоразделочного цеха концентрации металлов в педогеохимической аномалии выше фоновых значений от 1,9 раза для кадмия до 21,0 раза для свинца с суммарным коэффициентом загрязнения Z_c , равным 75,6. По отношению к почвам предприятия в целом почвы данной территории отличаются повышенным содержанием свинца – в 3,1 раза, хрома – 2,0, кадмия – 1,7, никеля – 1,6 и цинка – в 1,2 раза.

Медь как основной элемент-загрязнитель присутствует в ореолах загрязнения в почвах около гаражей и градирни, при этом педогеохимические аномалии с $Z_c = 65,0$ и $Z_c = 45,2$ относятся к территориям с опасным уровнем загрязнения почв. Содержание металлов здесь выше фоновых значений – от 1,2 для кадмия и мышьяка до 25,6 раза для меди. При этом концентрации свинца в почвах около гаражей в 1,9 раза, меди – 1,7, хрома в 1,6 раза выше, чем на территории предприятия в целом. Для почв газона около градирни характерно повышенное по сравнению с территорией завода содержание меди и кадмия – в 1,7 и 1,3 раза соответственно.

Оценка корреляционных связей между элементами, распространенными в почвах на территории завода, подтвердила тесную корреляционную зависимость между свинцом, цинком, кадмием и никелем с коэффициентом корреляции $r = 0,72-0,89$, а также медью и хромом с $r = 0,78$, мышьяком с никелем и цинком с $r = 0,72$ и $0,80$ соответственно (рис. 3). Средняя корреляционная зависимость отмечена для мышьяка с кадмием и свинцом, меди с цинком и никелем, а также для меди и кадмия, что обусловлено воздействием литейного производства на почвенный покров близлежащей территории.

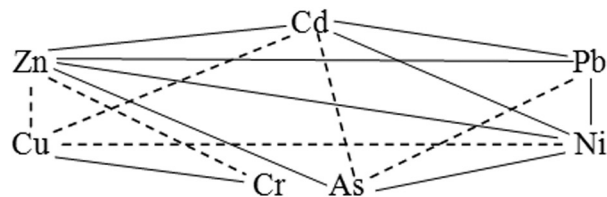


Рис. 3. Ассоциация элементов-загрязнителей в почвах на территории литейного производства

Fig. 3. Association of pollutant elements in soils in the territory foundry

На удалении от промплощадки предприятия валовое содержание исследованных металлов снижается незначительно, сформировавшаяся здесь педогеохимическая аномалия представлена следующим рядом: $\text{Cr}_{7,1}\text{--Cu}_{7,0}\text{--Zn}_{5,1}\text{--Pb}_{3,2}\text{--Ni}_{2,4}\text{--As}_{2,2}$. Сравнение концентрации элементов с гигиеническими нормативами выявила на данной территории полиэлементную аномалию, представленную цинком, хромом и мышьяком.

Заключение

В связи с наличием на территории промышленных объектов большого количества источников загрязнения педогеохимические аномалии, формирующиеся на промплощадках, в большинстве случаев отличаются полиэлементным составом и характеризуются повышенным накоплением определенной группы химических веществ, обуславливающих состав геохимической аномалии.

Как свидетельствуют проведенные исследования, на промплощадках изученных промышленных объектов формируются устойчивые педогеохимические аномалии, состав и контрастность которых зависят от характера источника загрязнения. Высококонтрастная педогеохимическая аномалия, сформировавшаяся на территории предприятия машиностроительной отрасли, имеет следующий состав: $\text{Cu}_{41,7}\text{--Zn}_{33,7}\text{--Ni}_{13,2}\text{--Cr}_{10,8}\text{--Pb}_{6,3}\text{--As}_{3,1}\text{--Cd}_{1,9}$.

На предприятии по производству цемента педогеохимическая аномалия состоит только из трех элементов: $\text{Zn}_{12,0}\text{--Pb}_{4,9}\text{--Cd}_{3,5}$. На заводе, специализирующемся на литье чугуна и стали, сформировалась педогеохимическая аномалия, состоящая из следующего ряда элементов-загрязнителей: $\text{Cu}_{15,2}\text{--Zn}_{11,9}\text{--Cr}_{10,0}\text{--Pb}_{6,7}\text{--Ni}_{3,8}\text{--As}_{2,3}$.

По коэффициенту концентрации Z_c , который составляет для почв предприятия, специализирующегося на литейном производстве – 44,9, для предприятия машиностроительной отрасли – 104,7, данные промплощадки относятся к территориям с опасным уровнем загрязнения почв, что требует постоянного контроля за их эколого-геохимическим состоянием. Почвы на промплощадке цементного завода имеют $Z_c = 18,4$, свидетельствующем об умеренно опасном уровне загрязнения почв, что не является критическим для промышленных территорий.

Внутри аномалий выделяются локальные ореолы загрязнения с более высоким содержанием и более широкой ассоциации поллютантов, при этом набор элементов в них индивидуален и зависит от характера источника загрязнения и преобладающих на предприятии производственных процессов.

Оценка корреляционных связей между элементами подтвердила тесную корреляционную зависимость между свинцом, цинком и кадмием в почвах промплощадок всех промышленных объектов, что подтверждает техногенный характер их происхождения, обусловленный промышленным производством.

Библиографические ссылки

1. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве: ГН 2.1.7.12-1-2004, утв. пост. Главн. гос. санит. врача Республики Беларусь 25.02.2004. № 28.
2. Хомич В. С., Какарека С. В., Кухарчик Т. И. и др. Городская среда: геоэкологические аспекты. Минск, 2013.
3. Какарека С. В., Хомич В. С., Кухарчик Т. И. и др. Выбросы тяжелых металлов в атмосферу: опыт оценки удельных показателей. Минск, 1998.
4. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь: метод. указания / под ред. И. М. Богдевича. Минск, 2006.
5. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами. М., 1982.
6. Натаров В. М., Лукашев О. В., Савченко В. В. Комплексный геохимический фоновый мониторинг в Березинском биосферном заповеднике. Минск, 2013.

7. Нормативы предельно допустимых концентраций валового содержания ртути и мышьяка в землях (включая почвы), расположенных в границах населенных пунктов, для различных типов территориальных зон по преимущественному функциональному использованию территорий населенных пунктов: Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь 04.08.2010 №107.
8. 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: Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь 19.11.2009 № 125.
9. Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь. URL: <http://www.ecoinfo.by/uploads/archive/Book2015/1-soil-25-11.pdf> (дата обращения: 11.03.2018).
10. Орлов Д. С. Химия почв. М., 1992.
11. Петухова Н. Н., Кузнецов В. А. Геохимическое состояние почвенного покрова Беларуси // Природные ресурсы. 1999. № 4. С. 40–49.
12. Саёт Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. Т. Геохимия окружающей среды. М., 1990.
13. 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.
14. Хомич В. С., Какарека С. В., Кухарчик Т. И. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси. Минск, 2004.

References

1. The list of maximum permissible concentrations (MPC) and approximately permissible concentration (ODC) of chemical substances in the soil: GN 2.1.7.12-1-2004 approved by the decision of the chief State doctor of the Republic of Belarus.
2. Khomich V. S., Kakareka S. V., Kuharchik T. I., et al. [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, 2013 (in Russ.).
3. Kakareka S. V., Khomich V. S., Kuharchik T. I., et al. [Emissions of heavy metals into the atmosphere: the experience of assessing the specific indicators]. Minsk, 1998 (in Russ.).
4. Bogdevich I. M. (ed.) [Large-scale agrochemical and radiological survey of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus]. Minsk, 2006 (in Russ.).
5. [Methodological recommendations on the geochemical assessment of urban pollution by chemical elements]. Moscow, 1982.
6. Natarov V. M., Lukashev O. V., Savchenko V. V. [Comprehensive geochemical background monitoring in the Berezinsky Biosphere Reserve]. Minsk, 2013.
7. Norms of the maximum permissible concentrations of the total content of mercury and arsenic in land (including soils) located within the boundaries of settlements for different types of territorial zones for the predominant functional use of the territories of settlements: Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus on 04.08.2010 № 107.
8. Norms of maximum allowable concentrations of mobile forms of nickel, copper and lead content in lands (including soils) located within the boundaries of populated areas for different types of territorial zones for the predominant functional use of the territories of settlements: Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus on 19.11.2009 No. 125.
9. National environmental monitoring system in the Republic of Belarus. [Electronic resource]. URL: <http://www.ecoinfo.by/uploads/archive/Book2015/1-soil-25-11.pdf>. (date of access: 11.03.2018).
10. Orlov D. S. [Soil chemistry]. Moscow, 1992 (in Russ.).
11. Petukhova N. N., Kuznetsov V. A. [Geochemical state of the soil cover of Belarus]. *Natural Resources*. 1999. No 4. P. 40–49.
12. Sayet Yu. E., Revish B. A., Yanin E. P. [Geochemistry of the environment]. Moscow, 1990.
13. Khomich V. S., Kakareka S. V., Kuharchik T. I. [Spatial structure, levels and sources of soil contamination in Minsk]. *Natural Resources*. 2003. No. 4. P. 42–53 (in Russ.).
14. Khomich V. S., Kakareka S. V., Kuharchik T. I. [Ecogeochemistry of urban landscapes of Belarus]. Minsk, 2004.

Статья поступила в редколлегию 28.06.2018
Received by editorial board 28.06.2018