



Аллаярова Г.Р., Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Афонькина С.Р., Аухадиева Э.А.,
Курилов М.В., Мусабиров Д.Э., Зеленковская Е.Е., Фазлыева А.С.

Аккумуляция тяжёлых металлов в системе «почва – растение» на территории с развитой горнорудной промышленностью

ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа, Россия

Введение. Близкое расположение предприятий горнорудной промышленности к населённым пунктам способствует загрязнению почвенного покрова тяжёлыми металлами. Сельскохозяйственные культуры, выращиваемые на садово-огородных участках, накапливают химические элементы и являются промежуточным звеном в цепи «почва – растение – человек».

Цель работы – оценка уровня антропогенной нагрузки на территорию, прилегающую к горнорудному предприятию, на основе изучения транслокации металлов в системе «почва – растение».

Материалы и методы. С целью гигиенической оценки химического состава почвы и выращенной на ней овощной продукции методом атомно-абсорбционной спектрометрии определено содержание 7 микроэлементов. С помощью коэффициента концентрации химического вещества (K_c) и суммарного показателя загрязнения (Z_c) установлен уровень химического загрязнения почв. С использованием суммарного коэффициента антропогенной нагрузки ($K_{a.n.} = \sum C_i/PDU_i$) проведено ранжирование территории по степени загрязнённости овощей токсичными элементами. Интенсивность накопления металлов овощными культурами оценивали по коэффициенту биологического поглощения (A_b) и показателю биохимической активности вида (БХА).

Результаты. Почвенный покров на территории района загрязнён комплексом металлов, содержание валовых форм которых превышает ПДК до 1,9 раза, подвижных – до 4,6 раза. На расстоянии до 5 км вокруг горнорудного предприятия установлены максимальные показатели суммарного загрязнения почв ($Z_c = 44–65$). Свинец и цинк являются элементами «биологического накопления» для всех видов изученной овощной продукции, выращенной в зоне влияния горнорудного предприятия, в свёкле и моркови дополнительно концентрируется кадмий, в моркови – никель. В пробах овощей отмечены превышения допустимых уровней кадмия и свинца, наибольшее накопление тяжёлых металлов выявлено в южном, юго-восточном, северном и северо-западном направлениях от источника выбросов.

Заключение. С целью устранения токсического воздействия тяжёлых металлов, содержащихся в овощах, произведённых в зоне влияния горнорудных предприятий, рекомендуется включить в систему социально-гигиенического мониторинга дополнительный контроль содержания никеля и цинка.

Ключевые слова: почвенный покров; овощные культуры; микроэлементы; гигиеническая оценка; коэффициент биологического поглощения

Для цитирования: Аллаярова Г.Р., Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Афонькина С.Р., Аухадиева Э.А., Курилов М.В., Мусабиров Д.Э., Зеленковская Е.Е., Фазлыева А.С. Аккумуляция тяжёлых металлов в системе «почва – растение» на территории с развитой горнорудной промышленностью. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(11): 1203–1208. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-11-1203-1208>

Для корреспонденции: Аллаярова Гузель Римовна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», 450106, Уфа. E-mail: Guzel-all@mail.ru

Участие авторов: Аллаярова Г.Р. – концепция и дизайн исследования, статистическая обработка, написание текста и редактирование; Ларионова Т.К. – концепция и дизайн исследования, написание текста и редактирование; Даукаев Р.А. – концепция и дизайн исследования; Афонькина С.Р., Зеленковская Е.Е. – сбор данных литературы; Аухадиева Э.А. – статистическая обработка; Курилов М.В., Мусабиров Д.Э., Фазлыева А.С. – сбор и обработка материала. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Работа выполнена в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России», п. 4.1.3 «Совершенствование мониторинга за качеством и безопасностью пищевых продуктов на основе токсико-гигиенической оценки приоритетных контаминантов».

Поступила: 07.07.2021 / Принята к печати: 28.09.2021 / Опубликовано: 30.11.2021

Guzel R. Allayarova, Tatiana K. Larionova, Rustem A. Daukaev, Svetlana R. Afonkina,
Elvira A. Aukhadieva, Mikhail V. Kurilov, Dmitry E. Musabirov, Evgeniya E. Zelenkovskaya,
Anna S. Fazlieva

Accumulation of heavy metals in the soil – plant system in areas with the developed mining industry

Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation

Introduction. The proximity of mining enterprises to settlements contributes to the pollution of the soil cover with heavy metals. Crops grown in garden plots accumulate chemical elements and are an intermediate link in the “soil – plant – human” chain.

Purpose of the work. Assessment of the level of anthropogenic load on the territory adjacent to the mining enterprise, based on the study of the translocation of metals in the soil – plant system.

Materials and methods. For the purpose of hygienic assessment of the chemical composition of the soil and vegetable products grown on it, the content of 7 microelements was determined by atomic absorption spectrometry. With the help of the coefficient of concentration of a chemical substance (K_c) and the total indicator of pollution (Z_c), the level of chemical contamination of soils was determined. Using the total coefficient of anthropogenic load ($K_{a.n.} = \sum C_i/PDU_i$), the territory was ranked according to the contamination of vegetables with toxic elements. The rate of accumulation of metals by vegetable crops was assessed by the coefficient of biological absorption (A_b) and the index of biochemical activity of the species (BAS).

Results. The soil cover in the district is contaminated with a complex of metals, the content of gross forms of which exceeds the MPC by up to 1.9 times, mobile – up to 4.6 times. At a distance of up to 5 km around the mining enterprise, the maximum indicators of the total soil pollution ($Z_c = 44–65$) have been established. Lead and zinc are elements of “biological accumulation” for all types of studied vegetable products grown in the zone of influence of the mining enterprise;

cadmium is additionally concentrated in beets and carrots, and nickel in carrots. In vegetable samples, exceeding the permissible levels of cadmium and lead was noted. The most significant accumulation of heavy metals was found in the southern, southeastern, northern and northwestern directions from emissions.

Conclusion. *To eliminate the toxic effects of heavy metals in vegetables produced in the zone of influence of mining enterprises, it is recommended to include additional monitoring of nickel and zinc content in the social and hygienic monitoring system.*

Keywords: *soil cover; vegetables; trace elements; hygienic assessment; biological absorption coefficient*

For citation: Allayarova G.R., Larionova T.K., Daukaev R.A., Afonkina S.R., Aukhadieva E.A., Kurilov M.V., Musabirov D.E., Zelenkovskaya E.E., Fazlieva A.S. Accumulation of heavy metals in the soil – plant system in areas with the developed mining industry. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(11): 1203–1208. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-11-1203-1208> (In Russ.)

For correspondence: *Guzel R. Allayarova*, MD, PhD, Senior Researcher of Chemical analysis Department of Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, 450106, Russian Federation. E-mail: ufa.lab@yandex.ru

Information about the authors:

Allayarova G.R., <https://orcid.org/0000-0003-0838-3598> Larionova T.K., <https://orcid.org/0000-0001-9754-4685> Daukaev R.A., <https://orcid.org/0000-0002-0421-4802> Afonkina S.R., <https://orcid.org/0000-0003-0445-9057> Aukhadieva E.A., <https://orcid.org/0000-0002-6793-6992> Kurilov M.V., <https://orcid.org/0000-0002-2818-1558> Musabirov D.E., <https://orcid.org/0000-0003-2042-8162> Zelenkovskaya E.E., <https://orcid.org/0000-0001-7682-2703> Fazlieva A.S., <https://orcid.org/0000-0002-0037-6791>

Contribution: *Allayarova G.R.* – the concept and design of the study, statistical processing, writing the text and editing; *Larionova T.K.* – the concept and design of the study, writing the text and editing; *Daukaev R.A.* – the concept and design of the study; *Afonkina S.R., Zelenkovskaya E.E.* – collection of literature data; *Aukhadieva E.A.* – statistical processing; *Kurilov M.V., Musabirov D.E., Fazlieva A.S.* – collection and processing of material. *All authors* are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The work was carried out within the framework of the sectoral research program of the Federal Service for Supervision in Protection of the Rights of Consumer and Man Wellbeing (Rosпотребнадзор) for 2021–2025. “Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological well-being, health risk management and improving the quality of life of the population of Russia”, item 4.1.3 “Improving the monitoring of the quality and safety of food products based on the toxic and hygienic assessment of priority contaminants.”

Received: July 07, 2021 / Accepted: September 28, 2021 / Published: November 30, 2021

Введение

В результате деятельности предприятий горнорудной промышленности огромные территории подвергаются антропогенному загрязнению химическими элементами вследствие промышленных выбросов в атмосферу, образования отвалов пород, отстойников сточных вод и хвостохранилищ [1].

АО «Учалинский ГОК», производящее медный и цинковый концентрат, серный флотационный колчедан, – одно из крупнейших предприятий данного профиля в России. В состав горно-обогатительного комбината входят два рудника и обогатительная фабрика.

Производственная деятельность горнорудных предприятий приводит к дополнительному поступлению вредных веществ в окружающую среду, при этом происходит увеличение содержания подвижных форм металлов в почвах [2]. В результате многолетнего воздействия загрязнённого атмосферного воздуха химические элементы концентрируются, как правило, в поверхностном слое [3]. Почва является преградой на пути дальнейшей миграции металлов вследствие присущей ей способности к накоплению. В результате происходящих в ней различных процессов (сорбции, ионного обмена, соосаждения и комплексообразования) часть металлов удаляется из геохимических циклов [4].

По данным исследований российских учёных, с увеличением загрязнения почв тяжёлыми металлами происходит снижение темпов гумификации, нитрофикации и азотфиксации в связи с тем, что снижается количество микроорганизмов. Как следствие уменьшается количество образовавшегося в почве гумуса, что приводит к накоплению тяжёлых металлов в сельскохозяйственной продукции [5–10]. Растения являются промежуточным звеном поступления металлов из объектов окружающей среды в организм человека, при этом их избыток или недостаток вызывает нарушение обмена веществ, развитие дисэлементозов и других заболеваний [11].

Вышеизложенное обуславливает актуальность изучения накопления и миграции тяжёлых металлов в системе «почва – растение» для выращивания безопасных и качественных сельскохозяйственных культур на территориях с развитой горнорудной промышленностью.

Цель работы – оценка уровня антропогенной нагрузки на территорию, прилегающую к горнорудному предприятию, на основе изучения транслокации металлов в системе «почва – растение».

Задачи исследования: определить содержание микроэлементов (Cu, Zn, Ni, Hg, As, Pb, Cd) в почве и продукции растениеводства; дать эколого-гигиеническую характеристику

почвенного покрова и выращиваемых овощных культур; рассчитать коэффициент концентрации химического вещества и суммарный показатель загрязнения почв; вычислить суммарный коэффициент антропогенной нагрузки; выявить интенсивность накопления химических элементов с помощью коэффициента биологического поглощения (A_c) и показателя биохимической активности вида (БХА).

Материалы и методы

Эколого-гигиенические исследования, проведённые в Учалинском районе Республики Башкортостан, включали изучение почвы и произрастающих на ней сельскохозяйственных культур (морковь, свёкла столовая, картофель). Территория изучаемого района была поделена на четыре зоны географического расположения населённых пунктов относительно АО «Учалинский ГОК» с учётом рельефа местности, розы ветров, удалённости до 5; 5–10; 11–20 и более 20 км. В качестве фоновой изучена территория на 30-километровом удалении, не подверженная влиянию выбросов предприятия.

Отбор образцов почвы ($n = 138$) и овощных культур ($n = 750$) произведён на приусадебных участках и в коллективных садах специалистами ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека». Исследования проб почвы и овощных культур проведены в аккредитованном Испытательном центре института в соответствии с действующими нормативными документами. Содержание химических элементов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборах с пламенной и термической атомизацией. Результаты сравнивали с Техническим регламентом Таможенного союза¹ и Санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами².

Оценку уровня химического загрязнения почв тяжёлыми металлами проводили по суммарному показателю загрязнения (Z_c), по формуле:

$$Z_c = \sum (K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n - 1), \quad (1)$$

где: n – число определяемых суммируемых веществ; K_{ci} – коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения (отношение его валового содержания (C) к фоновому (C_{ϕ})).

¹ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции».

² Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Таблица 1 / Table 1

Содержание валовых форм металлов (мг/кг) в почвах Учалинского района в зависимости от расположения относительно горно-обогатительного предприятия

The content of gross forms of metals (mg/kg) in the soils of the Uchalinsky district, depending on the location relative to the mining and processing enterprise

Направление Direction	Расстояние, км Distance, km	Pb	Cd	Hg	As	Cu	Zn	Ni
		ПДК / ОДК (мг/кг) Maximum permissible concentrations (MPC) / approximate permissible concentrations (APC), mg/kg						
		- / 130.0	- / 2.0	2.1 / -	- / 10.0	- / 132.0	- / 220.0	- / 80.0
Юг, юго-восток South, Southeast	До 5.0 / Before 5.0	3.82 ± 0.45	3.66 ± 0.28	1.670 ± 0.214	7.07 ± 1.54	216.2 ± 18.2	262.7 ± 52.3	93.84 ± 4.52
	5.0–10.0	3.59 ± 0.40	1.74 ± 0.25	0.856 ± 0.022	3.66 ± 0.47	136.3 ± 12.3	191.7 ± 24.5	64.40 ± 3.57
	11.0–20.0	3.12 ± 0.34	2.58 ± 0.14	1.228 ± 0.145	0.06 ± 0.01	117.5 ± 18.4	291.1 ± 22.4	77.28 ± 3.61
Запад, юго-запад West, Southwest	До 5.0 / Before 5.0	6.94 ± 2.12	3.24 ± 0.22	1.421 ± 0.014	4.22 ± 0.33	178.6 ± 21.0	227.2 ± 42.6	88.32 ± 3.45
	5.0–10.0	7.41 ± 1.24	2.76 ± 0.67	0.607 ± 0.245	0.59 ± 0.14	126.8 ± 17.6	96.4 ± 11.9	40.48 ± 3.23
	11.0–20.0	3.51 ± 0.38	2.28 ± 0.27	0.498 ± 0.031	0.51 ± 0.05	96.5 ± 4.5	130.7 ± 10.7	30.84 ± 2.75
Северо-восток Northeast	До 5.0 / Before 5.0	2.89 ± 0.28	0.90 ± 0.12	0.469 ± 0.035	0.34 ± 0.03	84.6 ± 2.6	156.2 ± 12.3	27.60 ± 2.61
	5.0–10.0	8.03 ± 2.10	1.62 ± 0.64	1.232 ± 0.114	0.40 ± 0.06	150.4 ± 8.6	248.5 ± 27.8	69.92 ± 9.51
	11.0–20.0	6.40 ± 0.44	0.30 ± 0.03	0.210 ± 0.035	0.43 ± 0.04	122.2 ± 12.4	213.0 ± 24.6	34.96 ± 2.54
Север, северо-запад North, Northwest	До 5.0 / Before 5.0	5.69 ± 0.98	0.45 ± 0.09	0.202 ± 0.037	0.40 ± 0.08	115.3 ± 11.1	204.5 ± 31.5	30.15 ± 4.25
	11.0–20.0	2.57 ± 0.08	2.64 ± 0.05	2.153 ± 0.028	10.32 ± 1.46	244.4 ± 24.7	305.3 ± 34.6	88.32 ± 9.34
	Более 20.0 / More 20.0	1.79 ± 0.14	1.92 ± 0.08	0.193 ± 0.047	0.62 ± 0.18	23.5 ± 2.6	127.8 ± 8.7	27.60 ± 1.17
	Более 20.0 / More 20.0	1.70 ± 0.14	1.73 ± 0.26	0.200 ± 0.021	0.22 ± 0.05	120.5 ± 8.6	105.5 ± 7.5	25.70 ± 2.34

С целью ранжирования исследуемого района по уровню антропогенной нагрузки от горнорудного предприятия сопоставляли средние значения токсичных элементов – свинца (C_{Pb}), кадмия (C_{Cd}), мышьяка (C_{As}) и ртути (C_{Hg}) в овощной продукции с их предельно допустимыми уровнями (ПДУ). Суммарный коэффициент антропогенной нагрузки ($K_{ан.} = C_{Pb}/ПДУ_{Pb} + C_{Cd}/ПДУ_{Cd} + C_{As}/ПДУ_{As} + C_{Hg}/ПДУ_{Hg}$) рассчитывали по каждому направлению.

Интенсивность накопления овощными культурами химических элементов оценивали с помощью коэффициента биологического поглощения (A_x), представляющего собой отношение содержания элемента в золе растения к его валовому содержанию в почве. Кроме того, рассчитывали показатель биохимической активности вида (БХА), представляющий собой суммарную величину, получающуюся при сложении коэффициентов биологического поглощения отдельных микроэлементов: $БХА = \sum A_x$.

Статистические расчёты производили с помощью программного пакета IBM Statistics 21.0 (IBM, США). Проверку распределения на нормальность осуществляли с помощью критерия Колмогорова – Смирнова. Полученные при анализе данные обрабатывали с помощью однофакторного дисперсионного анализа. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

Изучено распределение элементов в почве и сельскохозяйственных культурах для определения зон влияния АО «Учалинский ГОК» как источника загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами.

Степень загрязнения почвы химическими элементами определяли, сравнивая концентрацию элемента в валовой (табл. 1) и подвижной (табл. 2) формах с ПДК/ОДК.

Таблица 2 / Table 2

Содержание подвижных форм металлов (мг/кг) в почвах Учалинского района в зависимости от расположения относительно горно-обогатительного предприятия

The content of mobile forms of metals (mg/kg) in the soils of the Uchalinsky district, depending on the location relative to the mining and processing enterprise

Направление Direction	Расстояние, км Distance, km	Pb	Cu	Zn	Ni
		ПДК / ОДК (мг/кг) / MPC / APC (mg/kg)			
		6.0 / -	3.00 / -	23.0 / -	4.0 / -
Юг, юго-восток South, Southeast	До 5.0 / Before 5.0	0.26 ± 0.03	7.11 ± 0.43	102.93 ± 7.10	8.46 ± 0.56
	5.0–10.0	0.15 ± 0.01	3.23 ± 0.38	89.49 ± 3.54	2.85 ± 0.08
	11.0–20.0	0.25 ± 0.02	6.16 ± 0.30	49.53 ± 0.61	4.79 ± 0.84
Запад, юго-запад West, Southwest	До 5.0 / Before 5.0	0.35 ± 0.06	4.02 ± 0.42	64.55 ± 1.80	3.96 ± 0.54
	5.0–10.0	0.31 ± 0.06	3.54 ± 0.38	35.40 ± 1.72	3.73 ± 0.22
	11.0–20.0	0.30 ± 0.05	2.80 ± 0.34	18.49 ± 0.92	3.54 ± 0.16
Северо-восток Northeast	До 5.0 / Before 5.0	0.35 ± 0.04	0.81 ± 0.04	13.45 ± 0.74	3.52 ± 0.18
	5.0–10.0	0.12 ± 0.03	10.22 ± 0.68	87.91 ± 6.64	4.81 ± 0.41
	11.0–20.0	0.16 ± 0.07	7.15 ± 0.52	57.18 ± 1.16	3.89 ± 0.17
Север, северо-запад North, Northwest	До 5.0 / Before 5.0	0.16 ± 0.05	7.04 ± 0.46	36.08 ± 1.12	3.52 ± 0.16
	11.0–20.0	0.16 ± 0.07	7.15 ± 0.52	57.18 ± 1.16	3.89 ± 0.17
	Более 20.0 / More 20.0	0.16 ± 0.05	7.04 ± 0.46	36.08 ± 1.12	3.52 ± 0.16
Север, северо-запад North, Northwest	До 5.0 / Before 5.0	0.16 ± 0.07	8.42 ± 0.38	105.73 ± 8.28	6.34 ± 0.64
	11.0–20.0	0.44 ± 0.08	4.00 ± 0.28	41.30 ± 0.34	2.11 ± 0.32
	Более 20.0 / More 20.0	0.36 ± 0.08	3.92 ± 0.30	40.78 ± 0.35	2.10 ± 0.32

Таблица 3 / Table 3

Содержание микроэлементов в овощных культурах, мг/кг сырой массы
The content of trace elements in vegetable crops, mg/kg of raw weight

Микроэлемент Trace element	ПДУ Remote control	Объект исследования Object of the study					
		морковь carrot		свёкла столовая beetroot		картофель potatoes	
		min-max	среднее average	min-max	среднее average	min-max	среднее average
Pb	0.5	0.020–0.450	0.013	0.002–0.180	0.061	0.002–0.847	0.156
Cd	0.03	0.004–0.060	0.017	0.005–0.115	0.036	0.002–0.036	0.012
Cu	–	0.27–2.73	0.74	0.40–1.87	0.77	0.65–1.99	0.95
Zn	–	1.20–3.17	1.94	3.05–7.50	5.35	1.68–3.59	2.61
Ni	–	0.20–0.59	0.31	0.10–0.44	0.24	0.07–0.92	0.33
Hg	0.02	0.0006–0.0045	0.0023	0.001–0.014	0.003	0.001–0.004	0.002
As	0.2	0.0013–0.0119	0.0043	0.001–0.010	0.003	0.001–0.004	0.002

Дана оценка уровня металлов в овощных культурах (морковь, свёкла, картофель) как наиболее часто употребляемых в пищу и адекватно отражающих степень загрязнения почв. Концентрации химических элементов в овощах представлены в табл. 3.

Обсуждение

В почвах на территории, прилегающей к горно-обогатительному комбинату, содержатся цинк, медь, никель, уровни которых в подвижных формах превышают соответствующие ПДК/ОДК, причём их распределение зависит как от расстояния до источника загрязнения, так и от направления. Концентрация меди в 3,4 раза выше ПДК выявлена к северо-востоку от АО «Учалинский ГОК» на расстоянии 5–10 км, цинка (4,6 ПДК) – на расстоянии до 5 км к северо-западу. Максимальное содержание никеля (2,1 ПДК) отмечено в юго-восточном направлении на расстоянии до 5 км от предприятия.

Содержание валовых форм меди в почвах превышает ОДК в 1,1–1,9 раза; цинка – в 1,1–1,4; кадмия – в 1,1–1,8; никеля – в 1,1–1,2. Максимальное содержание валовой формы меди (1,9 ОДК), цинка (1,4 ОДК), мышьяка (1 ОДК) и ртути (1 ПДК) зарегистрировано в 5-километровой зоне северо-западного направления.

Полученные данные согласуются с результатами исследований загрязнения металлами почв в окрестностях карьеров по добыче различных полезных ископаемых, в том числе медно-цинковых руд [1].

Такие учёные, как В.В. Добровольский [12], М.А. Глазковская [13], В.А. Ковда [14], А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас [15], считают, что при оценке загрязнения почв металлами более целесообразно ориентироваться на их фоновые значения. От содержания в почве питательных элементов, гумуса, вторичных минералов, окислительно-восстановительных условий и рН среды (генетических свойств почвы) зависит токсичность элементов. Уровни веществ, превышающие их естественное (фоновое) содержание в 5–10 и более раз, считаются токсичными [16].

Содержание в почве валовой формы всех изученных нами элементов превышает фоновый уровень. Максимальная концентрация свинца выше фона в 10,3 раза, кадмия – в 6,1, меди – в 5,2, цинка – в 4,3, никеля – в 5,1, ртути – в 15,4, мышьяка – в 33,3 раза. Это свидетельствует о значительном влиянии горнорудного техногенеза на состояние окружающей среды.

Для характеристики техногенного загрязнения почв тяжёлыми металлами степень загрязнения оценивали по

величине суммарного показателя концентрации Z_c , максимальная величина которого ($Z_c = 44–65$), соответствующая опасной категории загрязнения почв, установлена для территории, расположенной вокруг АО «Учалинский ГОК» на расстоянии до 5 км. При таком загрязнении рекомендовано выращивание технических культур без получения из них пищевых продуктов и кормов. Необходим обязательный контроль содержания загрязняющих веществ в растениях, используемых для питания и кормов. При умеренно опасной категории почв ($Z_c = 21–29$), на расстоянии от 5 до 10 км от предприятия, возможно выращивать любые культуры при условии контроля качества продукции растениеводства. Уровень загрязнения остальных территорий оценён как допустимый ($Z_c = 7–12$) и рекомендуется для выращивания любых культур. По показателю Z_c возможно выявить общее загрязнение почв тяжёлыми металлами, даже если концентрация каждого из них не превышает ОДК/ПДК.

Для выявления влияния выбросов предприятия на контаминацию растительной продукции проанализированы овощи, выращенные на приусадебных участках, расположенных на различном удалении от АО «Учалинский ГОК». Максимальное загрязнение кадмием установлено в свёкле (3,8 ПДУ) и картофеле (1,2 ПДУ), выращенных на почвах, расположенных к юго-востоку на расстоянии до 5 км от источника загрязнения. Повышенный уровень кадмия (1,9 ПДУ) обнаружен в моркови, выращенной в том же направлении, но на большем расстоянии от предприятия (11–20 км). Превышение ПДУ свинца в картофеле (в 1,7 раза) выявлено в северо-восточном направлении на расстоянии 11–20 км от предприятия.

Сравнительный статистический анализ показал, что проанализированные образцы овощной продукции имеют значимые различия по содержанию цинка ($F = 46,882$; $p < 0,05$) и кадмия ($F = 3,840$; $p < 0,05$). Среднее значение цинка ($5,35 \pm 0,39$) в свёкле выше, чем в моркови ($1,94 \pm 0,17$), а содержание кадмия ($0,036 \pm 0,010$) в свёкле больше, чем в картофеле ($0,012 \pm 0,004$) ($p = 0,0001$). По содержанию других металлов в овощах значимых различий не выявлено. Содержание цинка и кадмия в овощах представлено на рис. 1, 2.

Ранжирование территории Учалинского района проведено по уровню загрязнённости металлами продукции растениеводства. Наибольшему накоплению тяжёлых металлов в растениеводческой продукции подвержены южное и юго-восточное ($K_{ан} = 1,34$), северное и северо-западное ($K_{ан} = 1,03$) направления Учалинского района, где сосредоточены Ново-Учалинское, Мулдашевское и Калкановское месторождения руд.

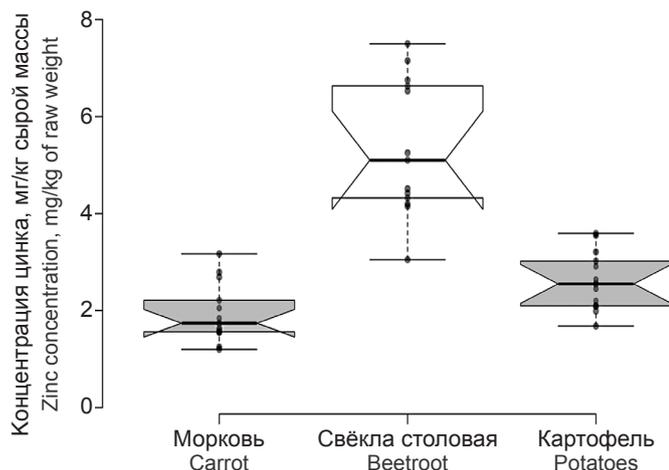


Рис. 1. Содержание цинка в овощной продукции.

Fig. 1. The content of zinc in vegetable products.

Для оценки степени накопления металлов в овощной продукции произведён расчёт коэффициента биологического поглощения (по А.И. Перельману, 1975), который позволяет судить о степени доступности элемента для растений и его поведении в системе «почва – растение». Составлены ряды интенсивности биологического поглощения, в которых элементы располагаются в порядке убывания поглощения их растениями.

Ряды биологического поглощения имеют следующий вид:

для свёклы столовой $\frac{Zn, Cd, Pb}{3,00; 2,96; 1,50} > \frac{As, Ni, Cu, Hg}{0,95; 0,83; 0,74; 0,56}$;

для моркови $\frac{Pb, Ni, Cd, Zn}{3,22; 1,66; 1,17; 1,06} > \frac{As, Cu, Hg}{0,81; 0,71; 0,50}$;

для картофеля $\frac{Pb, Zn}{4,06; 1,35} > \frac{Cu, Cd, Ni, As, Hg}{0,93; 0,86; 0,78; 0,67; 0,48}$.

Элементы, коэффициент биологического поглощения которых превышает 1, называются элементами «биологического накопления». Среди них в свёкле накапливаются цинк, кадмий и свинец, в моркови – свинец, никель, кадмий и цинк, в картофеле – свинец и цинк. Оставшиеся элементы в каждом виде овощей только захватываются, а не накапливаются. Они относятся к элементам среднего биологического захвата ($A_x < 1$).

Для количественного отображения общей способности изученных овощных культур к концентрированию химических элементов нами рассчитан показатель биогеохимической активности вида (БХА), предложенный А.Д. Айвазян (1974), основанный на оценке общего накопления микроэлементов в золе растения. БХА определяет основные различия в интенсивности вовлечения микроэлементов в биологический круговорот различными видами сельскохозяйственной продукции и даёт возможность оценить общую интенсивность биотехногенной аккумуляции в условиях конкретного ландшафта [17]. Он зависит от состава и количества микроэле-

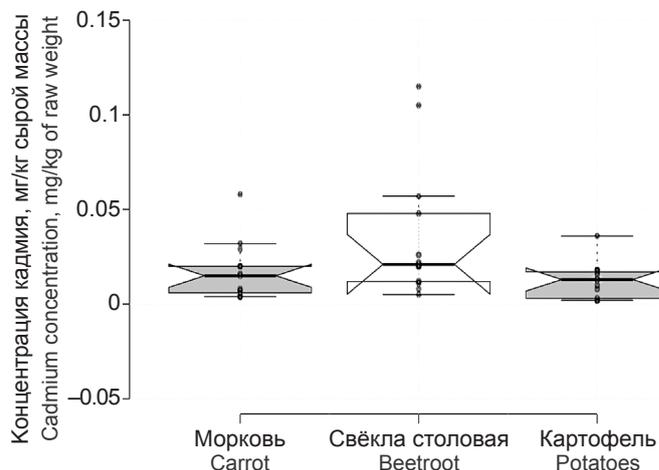


Рис. 2. Содержание кадмия в овощной продукции.

Fig. 2. Content of cadmium in vegetable products.

ментов, наиболее энергично поглощаемых растением. Проведённый анализ показал, что наибольшая биогеохимическая активность характерна для свёклы (БХА = 10,55), морковь и картофель обладают одинаковой активностью (БХА = 9,14).

Заключение

Почвенный покров населённых пунктов, расположенных вблизи предприятия горнорудной промышленности, загрязнён комплексом металлов, содержание валовых форм которых превышает ПДК до 1,9 раза, подвижных – до 4,6 раза.

Сельскохозяйственные культуры, произведённые на приусадебных участках в зоне промышленного загрязнения, накапливают повышенное количество тяжёлых металлов (до 2,5 ПДУ), с удалением от источника выбросов загрязнённость растительного материала снижается (до 0,2 ПДУ), что характеризует растениеводческую продукцию как эффективный индикатор пригодности почв для сельскохозяйственного использования.

Свинец и цинк являются элементами «биологического накопления» для всех видов изученной овощной продукции, выращенной в зоне влияния горнорудного предприятия, в свёкле и моркови дополнительно концентрируется кадмий, в моркови – никель.

В пробах овощей отмечены превышения допустимых уровней кадмия и свинца, наибольшее накопление тяжёлых металлов выявлено в южном, юго-восточном, северном и северо-западном направлениях от источника выбросов.

Таким образом, наиболее загрязнёнными являются территории в пятикилометровой зоне вокруг АО «Учалинский ГОК», для которых установлены максимальные показатели суммарного загрязнения почв ($Z_c = 44-65$), обусловленные высокими уровнями содержания цинка, меди, никеля и кадмия. Для данной территории рекомендовано включить в систему социально-гигиенического мониторинга дополнительный контроль содержания никеля и цинка в растениеводческой продукции.

Литература

- Семенова И.Н., Биктимерова Г.Я., Ильбулова Г.Р., Исанбаева Г.Т. Содержание тяжёлых металлов в почве окрестностей карьеров Челябинской области. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; (2–1): 561–5.
- Лисецкий Ф.Н., Чендев Ю.Г. Загрязнение почвы тяжёлыми металлами в зоне Курской магнитной аномалии. *Научные труды федерального научного центра гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана*. 2004; (10): 286–91.
- Белан Л.Н., Амирова З.К., Валиуллина А.У., Шамсутдинова Л.Р., Хакимова А.А. Тяжёлые металлы в почве индустриального, рекреационного и селитебного назначения в городе Уфе. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015; 17(6): 169–73.
- Водяницкий Ю.Н., Рогова О.Б. Цинк в почвах Череповецкой техногеохимической аномалии. В кн.: *Тезисы докладов II съезда общества почвоведов. Книга 1*. СПб.; 1996: 151–2.
- Бабейкова Н.О., Главати О.А. Экологические последствия загрязнения кадмием грунтов и почвенных вод. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2001; (1): 39–48.

6. Курамшин Э.М., Курамшина Н.Г., Нуртдинова Э.Э., Имашев У.Б. Геохимическая оценка загрязнения тяжёлыми металлами городских почв Башкортостана. *Башкирский химический журнал*. 2015; 22(2): 74–9.
7. Осипова Н.А., Язиков Е.Г., Янкович Е.П. Тяжёлые металлы в почве и овощах как фактор риска для здоровья человека. *Фундаментальные исследования*. 2013; (8–3): 681–6.
8. Сульдина Т.И. Содержание тяжёлых металлов в продуктах питания и их влияние на организм. *Рациональное питание, пищевые добавки и биостимуляторы*. 2016; (1): 136–40.
9. Хотимченко С.А., Бессонов В.В., Багрянцева О.В., Гмошинский И.В. Безопасность пищевой продукции: новые проблемы и пути решений. *Медицина труда и экология человека*. 2015; (4): 7–14.
10. Шур П.З., Зайцева Н.В. Оценка риска здоровью при обосновании гигиенических критериев безопасности пищевых продуктов. *Анализ риска здоровью*. 2018; (4): 43–56. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.4.05>
11. Tinkov A.A., Filippini T., Ajsuvakova O.P., Aaseth J., Gluhcheva Y.G., Ivanova J.M., et al. The role of cadmium in obesity and diabetes. *Sci. Total Environ*. 2017; 601–602: 741–55. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.224>
12. Добровольский Г.В. Биосферные циклы тяжёлых металлов и регуляторная роль почвы. *Почвоведение*. 1997; (7): 431–41.
13. Глазовская М.А. *Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР*. М.; 1988.
14. Ковда В.А. *Биогеохимия почвенного покрова*. М.: Наука; 1985.
15. Кабата П.А., Пендиас Х. *Микроэлементы в почвах и растениях*. Пер. с англ. М.: Мир; 1989.
16. Хабиров И.К., Асылбаев И.Г., Якупов И.Ж., Якупова Р.А., Рафиков Б.В., Шакиров Ю.С. Оценка степени химического загрязнения почвенного покрова экосистем Южного Урала. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2009; (6): 402–8.
17. Айвазян А.Д. *Геохимические особенности флоры ландшафтов юго-западного Алтая*. М.; 1974.

References

1. Semenova I.N., Biktimerova G.Ya., P'bulova G.R., Isanbaeva G.T. Contents of heavy metals in soil around quarries Chelyabinsk region. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015; (2–1): 561–5. (in Russian)
2. Lisetskiy F.N., Chendev Yu.G. Soil contamination with heavy metals in the zone of the Kursk magnetic anomaly. *Nauchnye trudy federal'nogo nauchnogo tsentra gigiyeny im. F.F. Erismana*. 2004; (10): 286–91. (in Russian)
3. Belan L.N., Amirova Z.K., Valiullina A.U., Shamsutdinova L.R., Khakimova A.A. Heavy metals in soils of industrial, recreational and residential areas in Ufa city. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2015; 17(6): 169–73. (in Russian)
4. Vodyanitskiy Yu.N., Rogova O.B. Zinc in the soils of the Cherepovets technogeochemical anomaly. In: *Abstracts of the II Congress of the Society of Soil Scientists. Book I/Tezisy dokladov II s'ezda obshchestva pochvedovedov. Kniga 1*. St. Petersburg; 1996: 151–2. (in Russian)
5. Babeykova N.O., Glavati O.A. Environmental consequences of cadmium contamination of soils and soil waters. *Ekotekhnologiya i resursoberezhenie*. 2001; (1): 39–48. (in Russian)
6. Kuramshin E.M., Kuramshina N.G., Nurtidinova E.E., Imashev U.B. Geochemical assessment of heavy metal pollution urban soils of Bashkortostan. *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal*. 2015; 22(2): 74–9. (in Russian)
7. Osipova N.A., Yazikov E.G., Yankovich E.P. Heavy metals in soil and vegetables as a risk factor for health of consumers. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013; (8–3): 681–6. (in Russian)
8. Suldina T.I. The content of heavy metals in food and their effects on the body. *Ratsional'noe pitaniye, pishchevye dobavki i biostimulyatory*. 2016; (1): 136–40. (in Russian)
9. Khotimchenko S.A., Bessonov V.V., Bagryantseva O.V., Gmoshinskiy I.V. Safety of food products: new problems and ways of solution. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2015; (4): 7–14. (in Russian)
10. Shur P.Z., Zaytseva N.V. Health risk assessment when giving grounds for hygienic criteria of food products safety. *Анализ риска здоровью*. 2018; (4): 43–56. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.4.05> (in Russian)
11. Tinkov A.A., Filippini T., Ajsuvakova O.P., Aaseth J., Gluhcheva Y.G., Ivanova J.M., et al. The role of cadmium in obesity and diabetes. *Sci. Total Environ*. 2017; 601–602: 741–55. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.224>
12. Dobrovolskiy G.V. Biosphere cycles of heavy metals and the regulatory role of soil. *Pochvovedenie*. 1997; (7): 431–41. (in Russian)
13. Glazovskaya M.A. *Geochemistry of Natural and Technogenic Landscapes of the USSR [Geokhimiya prirodnykh i tekhnogennykh landshaftov SSSR]*. Moscow; 1988. (in Russian)
14. Kovda V.A. *Biogeochemistry of the Soil Cover [Biogeokhimiya pochvennogo pokrova]*. Moscow: Nauka; 1985. (in Russian)
15. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton, Fla.: CRC Press; 1984.
16. Khabirov I.K., Asylbaev I.G., Yakupov I.Zh., Yakupova R.A., Rafikov B.V., Shakirov Yu.S. Assessment of the degree of chemical pollution of the soil cover of the ecosystems of the Southern Urals. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009; (6): 402–8. (in Russian)
17. Ayvazyan A.D. *Geochemical Features of the Flora of the Landscapes of the Southwestern Altai [Geokhimicheskie osobennosti flory landshaftov yugo-zapadnogo Altaya]*. Moscow; 1974. (in Russian)