

УДК 504.61 : 502.521 : 546.3 (1–21)

АККУМУЛЯЦИЯ И МИГРАЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

А. С. Петухов*, Г. А. Кремлева, Г. А. Петухова, Н. А. Хритохин

Тюменский государственный университет (ул. Володарского, 6, Тюмень, Россия, 625003),
* revo251@mail.ru

Изучено содержание подвижной и кислоторастворимой формы тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) в почвах, а также их содержание в мать-и-мачехе (*Tussilago farfara* L.) вблизи различных промышленных предприятий г. Тюмени. Пробы почв и растений (по 6 проб) были отобраны на условно чистом участке, а также с участков вблизи металлургического, моторостроительного, нефтеперерабатывающего и аккумуляторного завода и автотрассы. Участие металлов в воздушно-пылевой миграции оценивали по их содержанию в мать-и-мачехе. Образцы листьев мать-и-мачехи отбирали на вышеуказанных участках и анализировали на содержание тяжелых металлов в двух вариантах: тщательно отмытые дистиллированной водой и без отмывания. Пробы анализировали методом атомно-абсорбционной спектрометрии. В изученных пробах почв г. Тюмени обнаружено превышение контрольных значений Cu, Zn, Fe, Mn и Pb до 6 раз. Содержание Pb в почве вблизи аккумуляторного завода превышало ПДК в 5,8 раза. Подвижность тяжелых металлов в почве убывала в следующем ряду: Mn > Zn > Cu > Fe. Наиболее высокие концентрации всех тяжелых металлов в почве и растениях выявлены в районе аккумуляторного и металлургического заводов. Аккумуляция изученных тяжелых металлов растениями убывала в ряду Fe > Zn > Cu > Mn > Pb > Cd. Значение фактора биоконцентрации тяжелых металлов в отмытой мать-и-мачехе убывало в ряду: Cu > Zn > Cd > Pb > Mn > Fe, а актуальная биогеохимическая подвижность – в ряду Fe > Cu > Zn > Pb > Cd > Mn. Вклад воздушно-пылевой миграции в общее накопление Cu, Zn, Fe, Mn растениями, оцененный по разности содержания металлов в растениях до и после обработки дистиллированной водой, составил от 10 до 73 %. В наибольшей степени атмосферная миграция была характерна для автотрассы и металлургического предприятия. Среди изученных тяжелых металлов Fe оказался наиболее связанным с аэротехногенной аккумуляцией растениями. Данные результаты указывают на важность растительного покрова как атмосферного фильтра и недопустимость применения растений из урбосреды в медицинских или сельскохозяйственных целях. Аэротехногенное накопление тяжелых металлов растениями свидетельствует о возможности дополнительного токсического действия загрязнителей в условиях городской среды, а также подчеркивает необходимость предварительной обработки растительных образцов в экологических исследованиях.

Ключевые слова: формы тяжелых металлов; воздушный перенос; *Tussilago farfara* L.; фактор биоконцентрации; аккумуляция; городская среда

Для цитирования: Петухов А. С., Кремлева Т. А., Петухова Г. А., Хритохин Н. А. Аккумуляция и миграция тяжелых металлов в почвах и растениях в условиях антропогенного загрязнения городской среды // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 3. С. 53–66. doi: 10.17076/eco1342

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Тюменской области № 20-45 720011.

A. S. Petukhov*, T. A. Kremleva, G. A. Petukhova, N. A. Khritokhin. HEAVY METAL ACCUMULATION AND MIGRATION IN SOILS AND PLANTS UNDER CONTAMINATION IN URBAN ENVIRONMENTS

*Tyumen State University (6 Volodarskogo St., 625003 Tyumen, Russia),
revo251@mail.ru

The concentrations of heavy metals (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) in labile and acid-soluble form in soils and their content in coltsfoot (*Tussilago farfara* L.) were studied in the surroundings of various industrial enterprises in Tyumen. Soil and plant samples (n=6 each) were collected in a control site and near a highway, an engine plant, an oil refinery, a battery factory, and a steel mill. The involvement of the metals in air-borne migration was estimated by their content in coltsfoot. Heavy metal content in coltsfoot leaves was analyzed in two variants: with and without washing with distilled water. Samples were analyzed by atomic absorption spectroscopy. Cu, Zn, Fe, Mn, and Pb content in soil samples exceeded the control up to 6-fold. Pb content in soils at the battery factory exceeded the MPC 5.8-fold. Heavy metal lability in soils decreased in the following order: Mn > Zn > Cu > Fe. The concentrations of all the metals both in soils and plants were the highest at the battery factory and the steel mill. Metal accumulation by plants decreased in the following order: Fe > Zn > Cu > Mn > Pb > Cd. The bioconcentration factor in washed coltsfoot leaves declined in the Cu > Zn > Cd > Pb > Mn > Fe sequence, while the actual biogeochemical mobility decreased in the Fe > Cu > Zn > Pb > Cd > Mn sequence. The contribution of Cu, Zn, Fe, and Mn air-borne transfer to their accumulation in plants, which was estimated by the difference of metal concentrations before and after washing, ranged from 10 to 73 %. Air-borne migration was the most pronounced at the highway and the steel mill. Iron accumulation in plants showed the greatest connection to air-borne industrial pollution as compared to other metals studied. These results indicate the importance of the air-filtering role of plants and prove that plants from urban habitats must not be used for medicinal or agricultural purposes. Accumulation of heavy metals from air-borne industrial pollution by plants is evidence of additional toxic effect of pollutants in the urban environment and suggests that plant samples for ecological research have to be pre-treated.

Keywords: forms of heavy metals; air-borne transfer; *Tussilago farfara* L., bioconcentration factor; accumulation; urban environment

For citation: Petukhov A. S., Kremleva T. A., Petukhova G. A., Khritokhin N. A. Heavy metal accumulation and migration in soils and plants under contamination in urban environments. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;3:53–66. doi: 10.17076/eco1342

Funding. The study was supported by a grant from RFBR and the Tyumen Region #20-45 720011.

Введение

Развитие промышленного производства привело к стремительному росту количества загрязнителей в окружающей среде. Тяжелые металлы (ТМ) являются распространенными загрязнителями и токсичны для всех живых организмов, включая растения, животных и человека [Rai et al., 2019].

Выбросы металлургических предприятий, неочищенные промышленные сточные воды, пестициды, удобрения – главные источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами [Zwolak et al., 2019]. Природные выбросы ТМ в атмосферу (извержение вулканов, лесные пожары) уступают антропогенным выбросам на несколько порядков [Wuana, Okiemen, 2011]. В результате накопления ТМ

в почве снижается ее плодородие, урожайность, микробиологическая активность. Высокая степень загрязнения ТМ характерна для 11 % почв на территории России [Barsova et al., 2019].

Растения поглощают ТМ из загрязненных почв и аккумулируют их [Rai et al., 2019]. Тяжелые металлы обладают кумулятивным эффектом и вызывают деградацию растительных сообществ, что ограничивает применение территорий для сельскохозяйственных целей. ТМ способны мигрировать из растений по пищевым цепочкам к животным и человеку, и это создает дополнительную опасность [Титов и др., 2014].

Одни тяжелые металлы в растениях, например, Cu, Zn, Fe, Mn, могут быть жизненно важными, регулировать различные аспекты метаболизма [Andresen et al., 2018]. В то же время другие (Pb, Cd, Hg) имеют высокую токсичность и не обладают установленными биохимическими функциями [Kupper, Andresen, 2016]. Все ТМ могут быть токсичными в определенной дозе, так как они способны замещать другие микроэлементы, связываться с биомолекулами и вызывать окислительные процессы [Edelstein, Ben-Hur, 2018]. Действие ТМ усугубляется длительным периодом выведения из организмов и экосистем.

Кроме корневого поглощения, ТМ могут поступать в растения через листья (фолиарный транспорт) с аэротехногенной пылью. Фолиарное поглощение состоит из неметаболической стадии проникновения металлов через кутикулу и метаболических процессов накопления, протекающих против градиента концентрации [Shahid et al., 2016]. Часть микроэлементов, захваченных листьями, может быть смыта дождевой водой. Однако еще часть ТМ проникают глубже в листья растений через устьица, чечевички и разрывы в кутикуле. Установлено, что Pb легко смывается водой с поверхности листьев, в то время как Cu, Zn и Cd смываются в гораздо меньшей степени, и это говорит об их более глубоком проникновении в листья [Oliva, Raitio, 2003]. Поглощение ТМ листьями растений также зависит от факторов структуры листьев: угла наклона листьев, площади их поверхности и плотности устьиц. Высокая влажность воздуха и атмосферные осадки способствуют проникновению ТМ из атмосферы в листья растений [Shahid et al., 2016]. Однако в целом проблема аэротехногенной аккумуляции ТМ растениями остается малоизученной, и многие исследователи считают вклад этого переноса пренебрежимо малым [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989].

Содержание ТМ в почвах г. Тюмени и Тюменского района ранее определено в некоторых работах [Берсенева, 2015; Шигабаева, 2015], однако не было учтено загрязнение вблизи металлургического и нефтеперерабатывающего заводов. Кроме того, не найдено работ, исследующих содержание тяжелых металлов в растениях г. Тюмени. Ранее было определено содержание ТМ (V, Mn, Ni, Cu, Zn, Pb) в антропогенных отложениях ряда городов Уральского региона, включая Тюмень [Seleznev, Rudakov, 2019]. Наиболее полная геохимическая характеристика почв г. Тюмени приведена в исследовании [Konstantinova et al., 2019]. Состав уличной пыли г. Тюмени определен в работе [Konstantinova et al., 2020], однако ее влияние на растительный покров не изучено.

Целью настоящей работы стало изучение распределения подвижной и кислоторастворимой форм тяжелых металлов в системе «почва – растение», а также оценка возможности воздушно-пылевой миграции металлов на территории г. Тюмени.

Материалы и методы

Материал для исследования (с учетом розы ветров) был отобран в конце июля 2019 года в районе города Тюмени на следующих участках (рис. 1):

- 1) контроль – участок на удалении 5 километров от антропогенного загрязнения;
- 2) автотрасса Тюмень – Омск – 30 км от г. Тюмени, удаление от автотрассы не более 30 метров;
- 3) предприятие «Тюменские моторостроители» – г. Тюмень, участок на удалении 200 метров от предприятия;
- 4) Антипинский нефтеперерабатывающий завод (НПЗ) – г. Тюмень, участок на удалении 200 метров от предприятия;
- 5) район аккумуляторного завода – г. Тюмень, участок на удалении 200 метров от предприятия;
- 6) УГМК (Уральская горно-металлургическая компания) – г. Тюмень, участок на удалении 200 метров к югу от предприятия вблизи автотрассы.

Площадь участков составляла не менее 100 м². Пробы почвы отбирали методом конверта на глубину 10 см, масса пробы не менее 2 кг [ГОСТ 17.4.4.02-2017]. После этого воздушно-сухую массу почвы перетирали, просеивали через сито 1 мм, затем усредняли квартованием до отдельных навесок массой 5 г (анализ подвижных форм) и 2 г (анализ кислоторастворимых форм). Подвижные формы металлов (Cu,

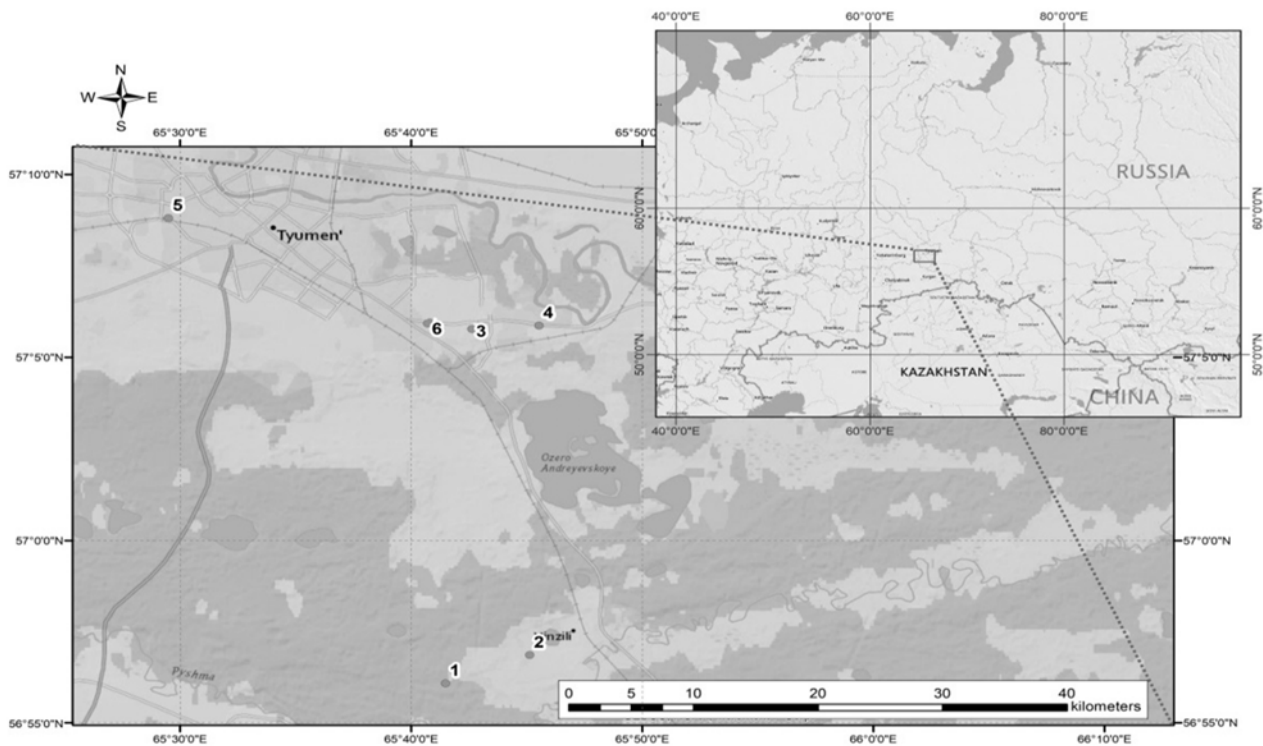


Рис. 1. Карта отбора проб в районе исследования
 Fig. 1. Sampling map

Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) анализировали с использованием вытяжек из почв ацетатно-аммонийным буферным раствором (pH = 4,8; определение подвижных форм металлов) [М-МВИ-80-2008]. Кислоторастворимые формы металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) извлекали с помощью 5M HNO₃ [РД 52.18.191-89]. Измерения проводили на оборудовании Центра коллективного пользования ТюмГУ «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии (прибор ContrAA 700, Analytic Jena, Германия).

На всех участках была отобрана надземная часть мать-и-мачехи (*Tussilago farfara* L., 1753). Выбор растений обусловлен широким распространением этого вида в районах исследования. Визуально значительного пылевого загрязнения на растениях не наблюдалось. Мать-и-мачеху анализировали с использованием двух вариантов пробоподготовки: одну часть отобранных растений тщательно промывали дистиллированной водой и высушивали, вторую – высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре без обработки дистиллированной водой. Затем вне зависимости от предварительной подготовки растения растирали в ступке и озоляли при 500 °С в течение 3 часов. Анализ содержания металлов

(Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) проводили извлечением 5 M HNO₃ из золы растений [Методические..., 1992]. Содержание ТМ в золе растений пересчитывали на сухую массу растений, используя зольность.

Для контроля качества результатов использовали измерения стандартных растворов металлов с известной концентрацией. Результаты измерений находились в диапазоне от 85 до 110 % относительно аттестованного значения. Пробоподготовка почв и растений проводилась в двух параллелях, измерения выполняли в трех повторностях. Погрешность определения содержания подвижной и кислоторастворимой форм ТМ в почвах оценивали согласно методикам анализа [М-МВИ-80-2008; РД 52.18.191-89]. По результатам измерений содержания ТМ в растениях к среднему арифметическому результату рассчитан доверительный интервал (P = 0,95; n = 6).

Для оценки способности растений аккумулировать ТМ был рассчитан фактор биоконцентрации (ФБК) как отношение содержания металла в сухой массе растения (Сраст) к содержанию его кислоторастворимой формы в почве (Спочвы кисл.) [Liu et al., 2009]:

$$\text{ФБК} = \frac{\text{Сраст}}{\text{Спочвы кисл.}}$$

Кроме этого, рассчитали актуальную биогеохимическую подвижность элементов (B_x) как отношение содержания металла в сухой массе растения (Сраст) к содержанию его подвижной формы в почве (Спочвы подв.) [Минкина и др., 2017]:

$$B_x = \frac{\text{Сраст}}{\text{Спочвы подв.}}$$

Для исключения возможного вклада аэро-техногенной аккумуляции ТМ расчет ФБК и B_x проводили только для мать-и-мачехи, отмытой дистиллированной водой.

Полученные результаты были подвергнуты стандартной статистической обработке в программе Statistica 10 при уровне значимости $p \leq 0,05$. Проведен анализ попарных корреляций между изученными показателями, при этом статистически значимыми считали корреляции со значением коэффициента $R > 0,53$ ($p \leq 0,05$).

Результаты исследования

Характеристика содержания металлов в почвах

Подвижная форма ТМ в почве считается наиболее доступной для поглощения растениями. Содержание подвижной формы Cd во всех проанализированных пробах находилось в пределах от 0,08 до 0,16 мг/кг (табл. 1). Содержание кислоторастворимой формы Cd во всех изученных районах было на уровне 0,27–0,33 мг/кг (табл. 1). В исследовании

2013 года показано, что содержание Cd в промышленной зоне Тюменского аккумуляторного завода и завода пластмасс составляет 0,01–0,20 мг/кг [Берсенева, 2015].

Содержание подвижной формы Cu во всех исследованных почвах находилось в диапазоне от 0,50 до 0,72 мг/кг, отличий от контроля на исследованных участках не было (табл. 1). Концентрация кислоторастворимой формы Cu изменялась от 3,7 до 16,6 мг/кг (табл. 1). На всех участках, за исключением автотрассы, было зарегистрировано обогащение почвы кислоторастворимой формой Cu на 12–80 % по сравнению с контрольным участком (табл. 1). В другом исследовании почв г. Тюмени содержание Cu изменялось в диапазоне от 11 до 28 мг/кг [Шигабаева, 2015], что близко к полученным нами результатам. Близкое содержание Cu в почвах зарегистрировано в Йошкар-Оле [Воскресенская и др., 2013]. Среднее содержание Cu в почвах и антропогенных отложениях г. Тюмени ранее оценивали в 30 и 40 мг/кг соответственно [Konstantinova et al., 2019; Seleznev, Rudakov, 2019].

Доля подвижной формы Cu от кислоторастворимой формы находилась в диапазоне от 3 до 15 %. Это указывает на низкую подвижность Cu в почве, вероятно за счет адсорбции на глинистых минералах, комплексообразования с гуминовыми кислотами или адсорбции на гидроксидах Fe и Mn [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989].

Содержание подвижной формы Fe в исследованных почвах г. Тюмени изменялось от 49 до 207 мг/кг (табл. 1). Максимальная концентрация Fe обнаружена в почве с контрольного участка.

Таблица 1. Содержание (среднее значение \pm погрешность определения) тяжелых металлов (мг/кг) в почвах г. Тюмени в 2019 году

Table 1. Heavy metals content (mg·kg⁻¹) in soils of Tyumen in 2019

	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Контроль Control	0,08 \pm 0,02 0,27 \pm 0,09	0,58 \pm 0,17 5,93 \pm 1,42	207 \pm 62 28500 \pm 5700	60 \pm 18 171 \pm 41	4,30 \pm 1,29 7,34 \pm 1,61	1,16 \pm 0,35 16,5 \pm 4,12
Автотрасса Highway	0,13 \pm 0,04 0,33 \pm 0,11	0,55 \pm 0,20 3,69 \pm 0,88	172 \pm 52 25700 \pm 5140	71 \pm 21 390 \pm 94	4,35 \pm 1,30 7,23 \pm 1,59	3,62 \pm 1,09 15,6 \pm 3,90
Мотор. завод Engine-building plant	0,16 \pm 0,05 0,30 \pm 0,10	0,50 \pm 0,15 9,77 \pm 2,34	68 \pm 20 44000 \pm 8800	105 \pm 45 276 \pm 66	5,19 \pm 1,56 8,14 \pm 1,79	4,48 \pm 1,34 28,0 \pm 7,00
НПЗ Oil refinery	0,13 \pm 0,04 0,28 \pm 0,09	0,72 \pm 0,22 6,67 \pm 1,60	102 \pm 31 43700 \pm 8740	68 \pm 20 282 \pm 68	1,51 \pm 0,45 7,29 \pm 1,60	2,44 \pm 0,73 19,2 \pm 4,80
Аккумуляторный завод Battery manufacturing plant	0,13 \pm 0,04 0,35 \pm 0,11	0,50 \pm 0,15 16,6 \pm 3,98	49 \pm 15 95000 \pm 19000	96 \pm 19 448 \pm 108	34,9 \pm 10,5 54,6 \pm 12,0	3,20 \pm 0,96 45,5 \pm 11,4
УГМК UMMC	0,14 \pm 0,04 0,31 \pm 0,10	0,61 \pm 0,18 10,8 \pm 2,59	180 \pm 54 53500 \pm 10700	110 \pm 33 435 \pm 104	4,89 \pm 1,47 7,61 \pm 1,67	7,28 \pm 2,18 36,7 \pm 9,18

Примечание. Верхняя строка – подвижные формы, нижняя строка – кислоторастворимые формы.

Note. The top line refers to labile forms, the bottom line refers to acid soluble forms.

Концентрация кислоторастворимой формы Fe была в диапазоне от 25 700 до 95 000 мг/кг, или 2,6–9,5 % в составе исследованных почв (табл. 1). Содержание Fe в почвах оценивают в 3–5 % [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989], с кларком в 3,8 % [Rudnick, Gao, 2003]. В почвах Забайкальского края оно составляет 2,8–5,4 % [Копылова, Лескова, 2016], в почвах из района контроля, автотрассы, моторостроительного завода и НПЗ – 2,6–4,4 %. В районе аккумуляторного завода и УГМК содержание Fe составляло 9,5 и 5,3 % соответственно, превышая контроль в 1,8 и 3,3 раза. Возможно, это связано с пылевыми выбросами металлургического предприятия в процессе выплавки стали, а также со сточными водами аккумуляторного завода при производстве железо-никелевых и свинцово-кислотных аккумуляторов. Однако данные о составе выбросов исследуемых предприятий в литературе отсутствуют.

Доля подвижной формы Fe от кислоторастворимой во всех пробах была крайне низкой (от 0,05 до 0,72 %). Железо в почве находится преимущественно в виде малорастворимых оксидов и гидроксидов [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989]. Однако отходы металлургического и аккумуляторного завода содержат кислотные компоненты, что может увеличить подвижность Fe в почве за счет повышения ее кислотности.

Содержание подвижной формы Mn в исследованных пробах изменялось от 60 до 110 мг/кг (табл. 1) и было повышенным во всех районах по сравнению с контролем. При этом наиболее высокие концентрации найдены вблизи УГМК и аккумуляторного завода – превышение контроля на 75–80 %. Содержание кислоторастворимой формы Mn изменялось от 171 до 450 мг/кг (табл. 1). На всех исследованных участках обнаружено превышение контроля. Вероятно, это может быть связано с использованием карбонильных соединений Mn в качестве присадок для автомобильного топлива. Наиболее высокое содержание Mn было в почвах из района аккумуляторного и металлургического заводов (430–450 мг/кг). Это может быть обусловлено применением Mn при легировании стали и его воздушным переносом. Другое исследование почв г. Тюмени выявило варьирование концентрации Mn от 400 до 930 мг/кг [Шигабаева, 2015]. В антропогенных отложениях Тюмени содержание Mn изменялось от 170 до 770 мг/кг [Seleznev, Rudakov, 2019].

Доля подвижной формы Mn во всех исследованных пробах была высокой и составила от 18 до 35 %. Марганец образует стабильные аквакомплексы и различные водорастворимые соли [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989], что

может объяснять высокий процент подвижных форм Mn в почве.

Концентрация подвижной формы Pb изменялась в пределах от 1,5 до 35 мг/кг (табл. 1). На большинстве участков содержание Pb в почве было на уровне контроля (1,5–5 мг/кг). Содержание Pb в почве вблизи аккумуляторного завода (35 мг/кг) превышало контроль в 8 раз и ПДК подвижной формы Pb (6 мг/кг) [СанПиН 1.2.3685-21]. Вероятно, полученный результат объясняется производством свинцово-кислотных аккумуляторов.

Концентрация кислоторастворимой формы Pb на большинстве исследуемых участков находилась на уровне контроля (табл. 1). Содержание Pb в районе аккумуляторного завода составило 55 мг/кг, что коррелирует с высоким содержанием подвижной формы. В исследовании 2015 года содержание Pb в почве из района аккумуляторного завода составило 158 мг/кг [Шигабаева, 2015], а в другом исследовании содержание Pb в почве вблизи этого предприятия изменялось в пределах от 70 до 1000 мг/кг [Берсенева, 2015]. Медианное содержание Pb в почвах г. Тюмени ранее оценивали в 20 мг/кг [Konstantinova et al., 2019], а в антропогенных отложениях – 46 мг/кг [Seleznev, Rudakov, 2015]. Доля подвижной формы Pb в районе аккумуляторного завода составила 64 %, что может создать опасность для поглощения свинца растениями.

Содержание подвижной формы Zn в исследованных пробах находилось в пределах от 1,2 до 7,3 мг/кг и превышало контроль на всех участках как минимум в 2 раза (табл. 1). В районе металлургического завода обнаружено наиболее высокое содержание Zn с превышением контроля в 6 раз. Концентрация кислоторастворимой формы Zn в почвах г. Тюмени изменялась в диапазоне от 15 до 45 мг/кг (табл. 1). Аналогичное содержание Zn в почвах описано ранее в г. Тюмени [Шигабаева, 2015], а также в районе Среднеуральского медеплавильного завода [Трубина, Воробейчик, 2013]. Среднее содержание Zn в почвах и антропогенных отложениях г. Тюмени ранее оценивали в 80 и 120 мг/кг соответственно [Konstantinova et al., 2019; Seleznev, Rudakov, 2019]. Содержание Zn в почве превышало контроль вблизи всех изученных промышленных предприятий в 1,2–2,7 раза. Содержание Zn в почве из района НПЗ оказалось близким к ранее опубликованным [Боев и др., 2019]. Доля подвижных форм Zn в почве составила от 7 до 23 %, что согласуется с данными о низком сродстве Zn к гумусовым кислотам по сравнению с другими ТМ [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989].

Содержание различных ТМ в почвах положительно коррелировало друг с другом: Cu-Fe – $r=0,96$, Cu-Zn – $r=0,97$, Mn-Fe – $r=0,61$, Mn-Zn – $r=0,68$, Fe-Zn – $r=0,92$. Данные взаимосвязи свидетельствуют о комплексном характере загрязнения почв тяжелыми металлами.

Таким образом, техногенное воздействие предприятий г. Тюмени привело к увеличению по сравнению с контролем содержания Cu (до 2,8 раза), Fe (до 3,3 раза), Mn (до 2,6 раза), Zn (до 2,8 раза), Pb (до 7,4 раза). Среди изученных районов основным фактором повышения содержания ТМ в почвах стала близость к аккумуляторному и металлургическому заводам. Наименьший вклад вносит воздействие автотранспорта, изолированное от влияния промышленной зоны. Накопление ТМ почвами г. Тюмени относительно контрольного участка убывало в ряду: $Mn > Fe > Zn > Cu > Pb > Cd$. По доле подвижных форм в почвах исследуемые металлы можно расположить в следующий ряд: $Fe < Cu < Zn < Mn$. Содержание ТМ в почвах г. Тюмени соответствует полученным

нами результатам в 2017–2018 годах [Петухов и др., 2020].

Характеристика содержания металлов в мать-и-мачехе

Содержание Cu в мать-и-мачехе в 2019 году находилось в диапазоне от 7 до 13 мг/кг (рис. 2, а). Аккумуляция Cu (в 1,5 раза относительно контроля) была зафиксирована только в районе металлургического завода, на остальных исследованных участках содержание Cu оставалось на контрольном уровне. Анализ мать-и-мачехи, предварительно отмытой дистиллированной водой, выявил более низкое (до 35 %) содержание Cu в растениях в районе автотрассы, НПЗ и металлургического завода по сравнению с контролем. Вероятно, снижение содержания Cu в отмытых растениях вызвано оседанием коллоидных частиц медьсодержащих аэрозолей на поверхности листьев мать-и-мачехи в промышленной среде.

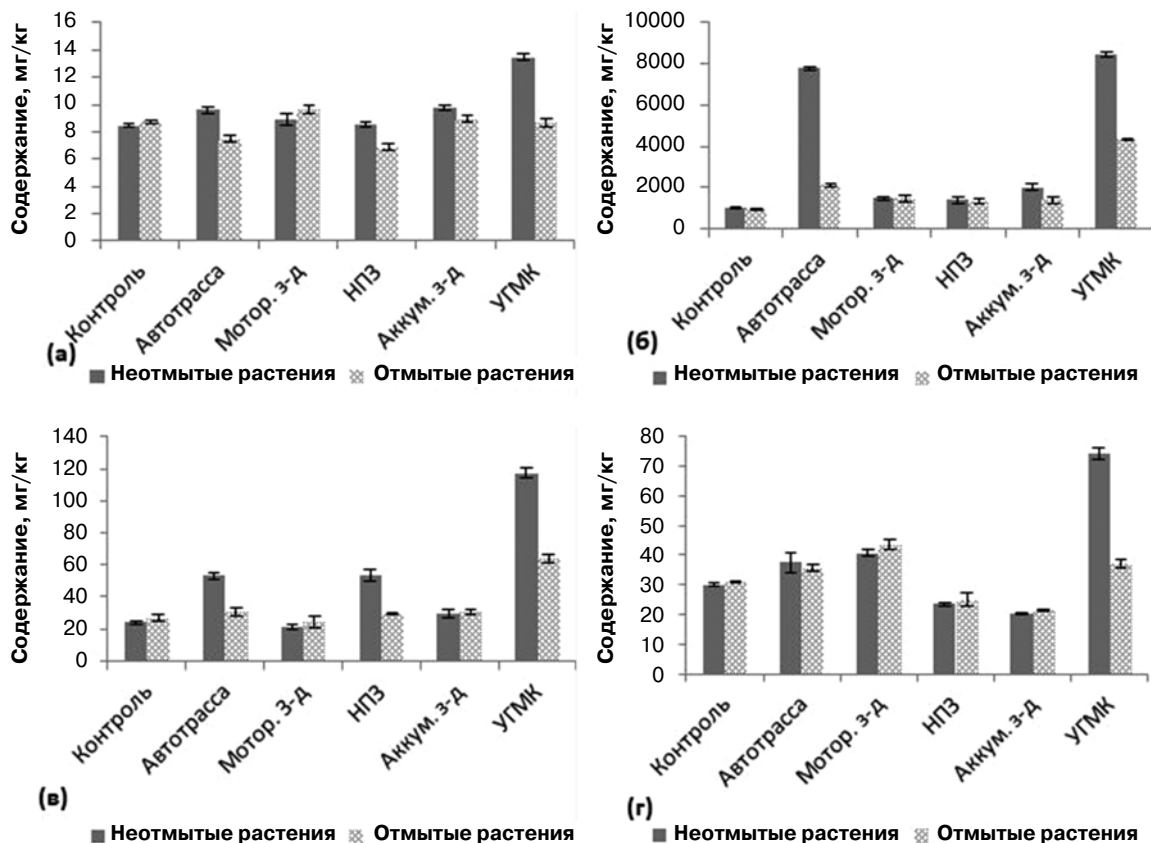


Рис. 2. Содержание (мг/кг) Cu (а), Fe (б), Mn (в), Zn (г) в мать-и-мачехе из районов исследования (среднее значение \pm доверительный интервал; $p = 0,95$; $n = 6$)

Fig. 2. Concentration (mg/kg) of Cu (a), Fe (б), Mn (в), Zn (г) in coltsfoot from the study area (mean value \pm confidence interval; $p = 0.95$; $n = 6$)

Содержание Си в отмытой мать-и-мачехе вблизи металлургического завода оказалось на уровне условно чистого участка. Это может указывать на преимущественно атмосферный путь аккумуляции Си на поверхности растений, а не на поглощение из почвы. Ранее в другом исследовании обнаружено снижение содержания Си в хвое ели и сосны на 30–60 % после обработки хлороформом [Oliva, Raitio, 2003]. Содержание Си в мать-и-мачехе остается на уровне 2017–2018 годов [Petukhov et al., 2020].

Близкое содержание Си получено при анализе растений вблизи Новочеркасской ГРЭС [Chaplygin et al., 2018]. Содержание Си в растениях оказалось сравнимым с содержанием этого элемента в лекарственных растениях на расстоянии 7 км от Среднеуральского медеплавильного завода [Трубина, Воробейчик, 2013]. В целом близкие концентрации Си ранее найдены в травах в районе бывших рудников в Словении [Glavac et al., 2017].

Содержание Fe в мать-и-мачехе находилось в диапазоне от 1013 до 8489 мг/кг (рис. 2, б). Сравнение с содержанием ТМ в мать-и-мачехе в 2017–2018 году указывает на тенденцию к увеличению содержания Fe в растениях [Petukhov et al., 2020]. Близкое содержание Fe в травах ранее зарегистрировано в Египте [Galal, Shehata, 2015] и Малайзии [Sulaiman, Hamzah, 2018]. Наибольшее содержание Fe было на участке УГМК – отличие от контроля более чем в 8 раз. Высокое содержание Fe обнаружено в растениях вблизи автотрассы. Это может быть обусловлено применением ферроцена и других Fe-содержащих антидетонационных присадок к бензину и дизельному топливу [Фурсов, Панкратов, 1996].

Накопление Fe мать-и-мачехой в районе автотрассы и металлургического завода осуществлялось, по всей вероятности, преимущественно аэрозольным путем, поскольку содержание Fe в отмытых растениях оказалось соответственно в 3,6 и 2 раза ниже по сравнению с неотмытыми. Анализ уличной пыли г. Тюмени выявил высокое содержание Fe [Konstantinova et al., 2020]. Однако даже с учетом аэрозольного оседания Fe на поверхности растений содержание Fe в мать-и-мачехе вблизи автотрассы и УГМК было самым высоким среди всех изученных участков. Содержание Fe в отмытой мать-и-мачехе вблизи аккумуляторного завода оказалось на 45 % ниже, чем в неотмытой, в то время как для контроля, НПЗ и моторостроительного завода такого отличия не выявлено. Вероятно, это указывает на преимущественное поступление Fe в растения на этих участках из почвы. Аккумуляция Fe свыше 1000 мг/кг ранее

описана в растениях из техногенных районов Забайкальского края [Копылова, 2010]. Аккумуляция в 6000 мг/кг зарегистрирована в загрязненном ТМ районе Ирана [Nouri et al., 2009]. Снижение содержания Fe на 40–50 % после обработки хлороформом было обнаружено в хвое сосны и ели [Oliva, Raitio, 2003].

Содержание Mn в мать-и-мачехе в 2019 году находилось в диапазоне от 21 до 117 мг/кг (рис. 2, в). Ранее в 2017–2018 годах содержание Mn в мать-и-мачехе изменялось от 17 до 156 мг/кг [Petukhov et al., 2020]. Повышенное относительно контроля содержание Mn в растениях обнаружено в районе автотрассы, НПЗ и УГМК (в 2,2; 2,2 и 4,8 раза соответственно). Как и содержание Си, содержание Mn в отмытых растениях в районе автотрассы, НПЗ и УГМК оказалось ниже по сравнению с неотмытыми на 40–45 %. Как и для Си, этот эффект был наиболее выражен в районе металлургического предприятия. Содержание Mn в отмытых растениях вблизи автотрассы и НПЗ оказалось на уровне контроля, а в районе металлургического завода – выше в 2,6 раза. Это указывает на воздушный перенос и оседание Mn на поверхности растений. Однако даже в отмытых растениях вблизи металлургического предприятия содержание Mn оказалось повышенным, что свидетельствует и о пути поглощения Mn из почвы. Близкое содержание Mn ранее обнаружено в растениях в Новочеркасске [Chaplygin et al., 2018], а также в Египте [Galal, Shehata, 2015].

Содержание Pb в мать-и-мачехе в 2019 году находилось на уровне 5 мг/кг, и статистически значимых отличий не было выявлено. Близкое содержание Pb в растениях обнаружено в районе автотрассы в Египте [Galal, Shehata, 2015], а также в Малайзии [Sulaiman, Hamzah, 2018].

В 2019 году содержание Cd в мать-и-мачехе находилось на уровне 0,14 мг/кг, статистических отличий не выявлено. Близкие значения содержания Cd в растениях получены в Новочеркасске [Chaplygin et al., 2018] и Малайзии [Sulaiman, Hamzah, 2018]. Результаты определения Pb и Cd в 2019 году подтверждаются и ранее проведенным исследованием 2017–2018 года [Petukhov et al., 2020].

Содержание Zn в мать-и-мачехе в 2019 году находилось в пределах от 20 до 74 мг/кг (рис. 2, г). Аналогичные концентрации Zn регистрировались в большей части растений на территории бывшей шахты в Словении [Glavac et al., 2017]. Кроме того, содержание Zn в растениях было аналогично результатам предыдущих лет (17–72 мг/кг) [Petukhov et al., 2020]. Повышенное содержание Zn относительно контрольного участка обнаружено вблизи

автотрассы и моторостроительного завода (на 25 и 33 % соответственно). Особенно высокое содержание Zn отмечено в районе металлургического завода – превышение контроля почти в 2,5 раза. Однако после обработки мать-и-мачехи дистиллированной водой содержание его в растениях оказалось в 2 раза ниже и отличие от контроля составило только 20 %. Вероятно, вблизи металлургического предприятия наблюдается распространение Zn-содержащих аэрозолей. Для остальных исследованных районов содержание Zn в отмытых и неотмытых растениях различалось несущественно. Таким образом, аккумуляция ТМ растениями из различных районов г. Тюмени убывала в ряду $Fe > Zn > Cu > Mn > Pb > Cd$.

Корреляционный анализ выявил положительные корреляции между содержанием в неотмытой мать-и-мачехе Cu и Zn ($r = 0,87$), Cu и Fe ($r = 0,78$), Cu и Mn ($r = 0,90$). Аналогичные корреляции получены для пар Mn-Fe ($r = 0,79$),

Mn-Zn ($r = 0,82$) и Fe-Zn ($r = 0,74$). В то же время для мать-и-мачехи, обработанной дистиллированной водой, такие корреляции были нехарактерны, статистически значимая взаимосвязь обнаружена только между содержанием Fe и Mn ($r = 0,96$). Вероятно, данные корреляции указывают на комплексное поступление ТМ из окружающей среды в растения воздушным переносом.

Содержание Zn в неотмытых растениях положительно коррелировало с подвижной формой Zn в почве ($r = 0,88$). Содержание Mn в отмытых растениях коррелировало с подвижной формой Mn в почве ($r = 0,70$).

Фактор биоконцентрации тяжелых металлов в растениях

Результаты расчета фактора биоконцентрации (ФБК) и актуальной биогеохимической подвижности (B_x) представлены в таблице 2.

Таблица 2. Фактор биоконцентрации тяжелых металлов в отмытой мать-и-мачехе

Table 2. Heavy metals bioconcentration factor in the washed coltsfoot

	Cu		Mn		Fe		Pb		Cd		Zn	
	ФБК BCF	B_x	ФБК BCF	B_x	ФБК BCF	B_x	ФБК BCF	B_x	ФБК BCF	B_x	ФБК BCF	B_x
Контроль Control	1,48	15,0	0,16	0,45	0,033	4,56	0,78	1,33	0,42	1,66	1,88	26,8
Автотрасса Highway	2,03	13,6	0,08	0,43	0,083	12,4	0,79	1,31	0,42	1,06	2,28	9,83
Мотор. завод Engine-building plant	0,99	19,1	0,09	0,23	0,033	21,6	1,21	1,90	0,42	0,89	1,56	9,72
НПЗ Oil refinery	1,03	9,49	0,10	0,43	0,031	13,2	1,13	5,42	0,42	1,09	1,30	10,2
Аккумуляторный завод Battery manufacturing plant	0,54	18,1	0,07	0,32	0,015	28,3	0,17	0,27	0,41	1,07	0,47	6,64
УГМК UMMC	0,80	14,3	0,15	0,58	0,081	24,1	1,28	1,99	0,42	0,96	1,01	5,11

Примечание. Полужирным шрифтом выделены значения ФБК и $B_x > 1$.

Note. BCF values and $B_x > 1$ are given in bold.

Тяжелые металлы можно расположить в следующий ряд по биодоступности (снижению среднего значения ФБК): $Zn > Cu > Pb > Cd > Mn > Fe$. Несмотря на высокое содержание Fe в почвах и растениях, лишь небольшая доля переходит из почвы в растения, что обуславливает низкое значение ФБК для Fe. Это не полностью соответствует ряду по убыванию доли подвижных форм ТМ в почве: $Mn > Zn > Cu > Fe$ и, вероятно, указывает, что

содержание подвижных форм ТМ в почве не является решающим фактором, влияющим на накопление в растениях. Например, растения способны поглощать необходимые для жизнедеятельности ТМ из почвы белками-переносчиками по активному механизму, против градиента электрохимического потенциала [Титов и др., 2014]. Ранее в другом исследовании также выявлено высокое значение ФБК для Cu [Bose, Bhattacharyya, 2008; Sulaiman, Hamzah, 2018].

При расчете актуальной биогеохимической подвижности получен ряд $Fe > Cu > Zn > Pb > Cd > Mn$, который в целом аналогичен ряду изменения ФБК, за исключением Fe, в связи с низким содержанием его подвижных форм в почве относительно содержания в растениях. Этот результат более адекватно отображает полученную картину по аккумуляции металлов растениями. Анализ актуальной биогеохимической подвижности (B_x) выявил, что все изученные металлы, за исключением марганца, характеризуются существенным накоплением ($B_x > 1$) [Минкина и др., 2017]. Высокая биогеохимическая подвижность Cu и Zn отмечена при анализе трав и почв г. Архангельска [Корельская, Попова, 2012]. Наиболее низкая биогеохимическая подвижность марганца среди изученных металлов получена при анализе амброзии полыннолистной (*Ambrosia artemisiifolia* L.), полыни австрийской (*Artemisia austriaca* Pall ex. Wild), тысячелистника благородного (*Achillea nobilis* L.), цикория обыкновенного (*Cichorium intybus* L.) и пижмы обыкновенной (*Tanacetum vulgare* L.) в период 2000–2013 годов в районе Новочеркасской ГРЭС [Минкина и др., 2017].

Значение фактора биоконцентрации и актуальная биогеохимическая подвижность Cu, Mn, Zn и Cd в растениях из городской среды в большинстве случаев было на уровне или ниже контроля. Это указывает на то, что содержание ТМ в растениях изменялось не пропорционально содержанию в почве, а, напротив, с некоторым «запозданием», несмотря на относительное увеличение содержания металлов по сравнению с контролем в растениях и почвах в большинстве случаев. Вероятно, растения в условиях промышленного загрязнения вырабатывают механизмы устойчивости к накоплению ТМ и способны к исключению их поглощения. Однако значение ФБК Cu и Zn в районе автотрассы оказалось выше контрольного уровня. Содержание Cu и Zn в почве вблизи автотрассы является наименьшим среди изученных участков. Таким образом, можно предположить, что в условиях дефицита Cu и Zn в окружающей среде мать-и-мачеха активирует механизмы активного накопления этих жизненно важных микроэлементов.

Значение ФБК Fe в районе автотрассы и УГМК было выше, чем на контрольном участке, что коррелирует с высокими темпами аккумуляции Fe растениями. Наиболее явно эта картина получена при анализе актуальной биогеохимической подвижности Fe, которая оказалась выше контрольного значения на всех участках. Ранее в другом исследовании по

расчетам ФБК обнаружена наибольшая среди всех ТМ биодоступность Fe для растений [Bose, Bhattacharyya, 2008]. Аналогичная ситуация получена по ФБК и биогеохимической подвижности Pb. В силу своей высокой токсичности свинец даже в небольших концентрациях способен преодолевать барьеры защитных систем растений и накапливаться в них.

Выводы

В изученных пробах почв г. Тюмени выявлено превышение контрольных значений по содержанию Fe, Cu, Mn и Zn на всех изученных участках, а также Pb в районе аккумуляторного завода. Накопление ТМ почвами г. Тюмени убывало в ряду: $Mn > Fe > Zn > Cu > Pb > Cd$. Доля подвижных форм тяжелых металлов в почве убывала в следующем ряду: $Mn > Zn > Cu > Fe$. Наиболее высокие концентрации всех тяжелых металлов в почве и растениях зафиксированы в районе аккумуляторного и металлургического заводов.

Аккумуляция изученных тяжелых металлов растениями из различных районов г. Тюмени убывала в ряду $Fe > Zn > Cu > Mn > Pb > Cd$. Между содержанием подвижной формы Zn и Mn в почвах и растениях зарегистрированы положительные корреляции. Значение фактора биоконцентрации тяжелых металлов в отмытой мать-и-мачехе убывало в ряду: $Cu > Zn > Cd > Pb > Mn > Fe$, а актуальная биогеохимическая подвижность – в ряду: $Fe > Cu > Zn > Pb > Cd > Mn$. Анализ полученных значений фактора биоконцентрации выявил склонность мать-и-мачехи к исключению тяжелых металлов.

Вклад атмосферной миграции Cu, Zn, Fe и Mn в общее содержание металлов (наряду с поглощением из почвы) в растениях составляет от 10 до 73 %. В наибольшей степени такая миграция была характерна для Fe. Эффект воздушно-пылевого накопления в большей степени зависел не от свойств металла, а от района исследования. Наиболее явно этот эффект проявлялся в районе автотрассы и металлургического завода.

Литература

Берсенева А. Г. Содержание тяжелых металлов в почвах на территориях промышленных предприятий города Тюмени // Вестник КрасГАУ. 2015. № 6. С. 41–44.

Боев В. В., Барановская Н. В., Боев В. А., Джамбаев М. Т., Шахова Т. С., Жорняк Л. В. Изменение элементного состава верхнего горизонта почв под

воздействием предприятий нефтегазопереработки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг природных ресурсов. 2019. № 330. С. 179–189. doi: 10.18799/24131830/2019/11/2364

Воскресенская О. Л., Воскресенский В. С., Алябышева Е. А. Накопление тяжелых металлов почвой и растениями в местах сбора и временного хранения твердых бытовых отходов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 40–46.

ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 440 с.

Копылова Л. В. Аккумуляция железа и марганца в листьях древесных растений в техногенных районах Забайкальского края // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12, № 1. С. 709–712.

Копылова Л. В., Лескова О. А. Содержание железа в некоторых природных объектах в условиях антропогенной нагрузки (Забайкальский край) // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 6. С. 1–8.

Корельская Т. А., Попова Л. Ф. Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове селитебного ландшафта города Архангельска // Арктика и Север. 2012. № 7. С. 1–17.

М-МВИ-80-2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии. СПб., 2008.

Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Центральный институт агрохимического обслуживания сельского хозяйства. М., 1992.

Минкина Т. М., Манджиева С. С., Чаплыгин В. А., Мотузова Г. В., Бурачевская М. В., Бауэр Т. В., Сушкова С. Н., Невидомская Д. Г. Влияние аэротехногенных выбросов на содержание тяжелых металлов в травянистых растениях Нижнего Дона // Почвоведение. 2017. № 6. С. 759–768. doi: 10.7868/S0032180X17060077

Петухов А. С., Кремлева Т. А., Хридохин Н. А., Петухова Г. А., Кайдунова П. И. Содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) в почвах г. Тюмени // Вестник НВГУ. 2020. № 1. С. 127–135. doi: 10.36906/2311-4444/20-1/19

РД 52.18.191-2018. Массовая доля кислоторастворимых форм металлов в пробах почв, грунтов и донных отложений. Методика измерений методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Обнинск, 2019.

СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62296).

Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 194 с.

Трубина М. Р., Воробейчик Е. Л. Содержание тяжелых металлов в лекарственных растениях в зоне аэротехногенного воздействия Среднеуральского медеплавильного завода // Растительные ресурсы. 2013. Т. 49, № 2. С. 203–222.

Фурсов В. М., Панкратов Е. А. Топливная композиция // Патент России № RU 2064966 С1. 1996.

Шигабаева Г. Н. Тяжелые металлы в почвах некоторых районов г. Тюмени // Вестник ТюмГУ. Экология и природопользование. 2015. Т. 2, № 2. С. 92–102.

Andresen E., Peiter E., Kupper H. Trace metal metabolism in plants // J. Exp. Bot. 2018. Vol. 69, no. 5. P. 909–954. doi: 10.1093/jxb/erx465

Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review // Environmental Pollution. 2019. No. 249. P. 200–207. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.020

Bose S., Bhattacharyya A. K. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge // Chemosphere. 2008. No. 70. P. 1264–1274. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.07.062

Chaplygin V., Minkina T., Mandzhieva S., Burachevskaya M., Sushkova S., Antonenko E., Poluektov E., Kurchakova V. The effect of technogenic emissions on the heavy metals accumulation by herbaceous plants // Environ. Monit. Assess. 2018. No. 190. P. 124. doi: 10.1007/s10661-018-6489-6

Edelstein M., Ben-Hur M. Heavy metals and metalloids: sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops // Scientia Horticulturae. 2018. No. 234. P. 431–444. doi: 10.1016/j.scienta.2017.12.039

Galal T. M., Shehata H. S. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution // Ecological Indicators. 2015. No. 48. P. 244–251. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.013

Glavac N. K., Djogo S., Razis S., Kreft S., Veber M. Accumulation of heavy metals from soils in medicinal plants // Arh Hig Rada Toksikol. 2017. No. 68. P. 236–244. doi: 10.1515/aiht-2017-68-2990

Konstantinova E., Minkina T., Konstantinov A., Sushkova S., Antonenko E., Kurasova A., Loiko S. Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city, Russia // Environ. Geochem. Health. 2020. No. 44. P. 409–432. doi: 10.1007/s10653-020-00692-2

Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S., Konstantinov A., Rajput V. D., Sherstnev A. Urban soil geochemistry of an intensively developing Siberian city: a case study of Tyumen, Russia // J. Environ. Manag. 2019. No. 239. P. 366–376. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.095

Kupper H., Andresen E. Mechanisms of metal toxicity in plants // Metallomics. 2016. No. 8. P. 269–285. doi: 10.1039/C5MT00244C

Liu W. X., Liu J. W., Wu M. Z., Li Y., Zhao Y., Li S. R. Accumulation and translocation of toxic heavy metals in

winter wheat (*Triticum aestivum* L.) growing in agricultural soil of Zhengzhou, China // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2009. No. 82(3). P. 343–350. doi: 10.1007/s00128-008-9575-6

Nouri J., Khorasani N., Lorestani B., Karami M., Hassani A. H., Yosefi N. Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential // *Environ. Earth Sci.* 2009. No. 59. P. 315–323. doi: 10.1007/s12665-009-0028-2

Oliva S. R., Raitio H. Review of cleaning techniques and their effects on the chemical composition of foliar samples // *Boreal Environ. Res.* 2003. No. 8. P. 263–270.

Petukhov A. S., Kremleva T. A., Petukhova G. A., Khritokhin N. A. Translocation of heavy metals in herbs under urban anthropogenic pollution conditions // *Environmental Processes*. 2020. No. 7. P. 1173–1184. doi: 10.1007/s40710-020-00470-3

Rai P. K., Lee S. S., Zhang M., Tsang Y. F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management // *Environ. Int.* 2019. No. 125. P. 365–385. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.067

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise of Geochemistry*. 2003. No. 3. P. 1–64. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4

Seleznev A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones // *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* 2019. No. 14. P. 95–104. doi: 10.26471/cjees/2019/014/062

Shahid M., Dumat C., Khalid S., Shreck E., Xiong T., Niazi N. K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake // *J. Hazardous Mater.* 2016. No. 365. P. 36–58. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.063

Sulaiman F. R., Hamzah H. A. Heavy metals accumulation in suburban roadside plants of a tropical area (Jengka, Malaysia) // *Ecological Processes*. 2018. No. 7. P. 28. doi: 10.1186/s13717-018-0139-3

Wuana R. A., Okieimen F. E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation // *ISRN Ecology*. 2011. doi: 10.5402/2011/402647

Zwolak A., Sarzynska M., Szpyrka E., Stawarczyk K. Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: a review // *Water Air Soil Pollut.* 2019. No. 230. P. 164. doi: 10.1007/s11270-019-4221-y

References

Andresen E., Peiter E., Kupper H. Trace metal metabolism in plants. *J. Exp. Bot.* 2018;69(5):909–954. doi: 10.1093/jxb/erx465

Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review. *Environmental Pollution*. 2019;249:200–207. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.020

Berseneva A. G. The content of heavy metals in soils on the territory of the industrial enterprises in Tyumen.

Vestnik KrasGAU = The Bulletin of KrasGAU. 2015;6:41–44. (In Russ.)

Boev V. V., Baranovskaya N. V., Boev V. A., Dzhambaev M. T., Shakhova T. S., Zhornyyak L. V. Change of elemental composition of soil upper horizon under the influence of oil and gas refining enterprises. *Izvestiya Tomskogo politekh. universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330:179–189. doi: 10.18799/24131830/2019/11/2364 (In Russ.)

Bose S., Bhattacharyya A. K. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge. *Chemosphere*. 2008;70:1264–1274. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.07.062

Chaplygin V., Minkina T., Mandzhieva S., Burachevskaya M., Sushkova S., Antonenko E., Poluektov E., Kumacheva V. The effect of technogenic emissions on the heavy metals accumulation by herbaceous plants. *Environ. Monit. Assess.* 2018;190:124. doi: 10.1007/s10661-018-6489-6

Edelstein M., Ben-Hur M. Heavy metals and metalloids: sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*. 2018;234:431–444. doi: 10.1016/j.scienta.2017.12.039

Fursov V. M., Pankratov E. A. Fuel composition. Russian patent No. RU 2064966 C1. 1996. (In Russ.)

Galal T. M., Shehata H. S. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological Indicators*. 2015;48:244–251. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.013

Glavac N.K., Djogo S., Razis S., Kreft S., Veber M. Accumulation of heavy metals from soils in medicinal plants. *Arh Hig Rada Toksikol.* 2017;68:236–244. doi: 10.1515/aiht-2017-68-2990

GOST 17.4.4.02-2017. Environmental protection. Soils. Methods of sampling and samples treatment for chemical, bacteriological, helminthological analysis. (In Russ.)

Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Moscow: Mir; 1989. 440 p. (In Russ.)

Konstantinova E., Minkina T., Konstantinov A., Sushkova S., Antonenko E., Kurasova A., Loiko S. Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city, Russia. *Environ. Geochem. Health*. 2020;44:409–432. doi: 10.1007/s10653-020-00692-2

Konstantinova E., Minkina T., Sushkova S., Konstantinov A., Rajput V. D., Sherstnev A. Urban soil geochemistry of an intensively developing Siberian city: a case study of Tyumen, Russia. *J. Environ. Manag.* 2019;239:366–376. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.095

Kopylova L. V. Accumulation of iron and manganese in leaves of woody plants in technogenic areas of the Zabaykalsky Krai (Trans-Baikal Territory). *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010;12(1):709–712. (In Russ.)

Kopylova L. V., Leskova O. A. Iron content in some natural objects in the conditions of anthropogenic load (Trans-Baikal Territory). *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2016;6:1–8. (In Russ.)

Korel'skaya T. A., Popova L. F. Heavy metals in the soil-vegetation cover of the residential landscape of the city of Arkhangelsk. *Arktika i Sever = Arctic and North*. 2012;7:1–17 (In Russ.)

Kupper H., Andresen E. Mechanisms of metal toxicity in plants. *Metallomics*. 2016;8:269–285. doi: 10.1039/C5MT00244C

Liu W. X., Liu J. W., Wu M. Z., Li Y., Zhao Y., Li S. R. Accumulation and translocation of toxic heavy metals in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) growing in agricultural soil of Zhengzhou, China. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2009;82(3):343–350. doi: 10.1007/s00128-008-9575-6

M-MVI-80-2008. Methodology for the measurement of elements concentration in samples of soils and bottom sediments by atomic emission and atomic absorption spectroscopy. St. Petersburg; 2008. (In Russ.)

Methodology for the heavy metal determination in the agricultural soils and plants. Central Research Institute of Agrochemical Services for Agriculture. Moscow; 1992. (In Russ.)

Minkina T. M., Mandzheva S. S., Chaplygin V. A., Motuzova G. V., Burachevskaya M. V., Bauer T. V., Sushkova S. N., Nevidomskaya D. G. Effect of aerotechnogenic emissions on the content of heavy metals in herbaceous plants of the Lower Don Region. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2017;6:759–768. doi: 10.7868/S0032180X17060077 (In Russ.)

Nouri J., Khorasani N., Lorestani B., Karami M., Hassani A. H., Yosefi N. Accumulation of heavy metals in soil and uptake by plant species with phytoremediation potential. *Environ Earth Sci*. 2009;59:315–323. doi: 10.1007/s12665-009-0028-2

Oliva S. R., Raitio H. Review of cleaning techniques and their effects on the chemical composition of foliar samples. *Boreal Environment Research*. 2003;8:263–270

Petukhov A. S., Kremleva T. A., Khritokhin N. A., Petukhova G. A., Kaidunova P. I. Heavy metal (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) concentration in soils of Tyumen. *Vestnik NVGU = Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. 2020;1:127–135. doi: 10.36906/2311-4444/20-1/19 (In Russ.)

Petukhov A. S., Kremleva T. A., Petukhova G. A., Khritokhin N. A. Translocation of heavy metals in herbs under urban anthropogenic pollution conditions. *Environmental Processes*. 2020;7:1173–1184. doi: 10.1007/s40710-020-00470-3

Rai P. K., Lee S. S., Zhang M., Tsang Y. F., Kim K. Heavy metals in food crops: health risks, fate, mechanisms and management. *Environment International*. 2019;125:365–385. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.067

RD 52.18.191-2018. Mass percentage of acid-soluble form metals in soils and bottom sediments. Procedure for determination by atomic absorption spectroscopy. Obninsk; 2019. (In Russ.)

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise of Geochemistry*, 2003. No. 3. P. 1–64. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4

Sanitary Rules and Regulations 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of environmental factors to people (Registered in the Ministry of Justice of Russia on January 29, 2021 No. 62296) (In Russ.)

Seleznov A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* 2019;14:95–104. doi: 10.26471/cjees/2019/014/062

Shahid M., Dumat C., Khalid S., Shreck E., Xiong T., Niazi N. K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *J. Hazardous Materials*. 2016;365:36–58. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.063

Shigabaeva G. N. Heavy metals in soils of several districts of Tyumen. *Vestnik TyumGU. Ekologiya i prirodopol'zovanie = Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*. 2015;2(2):92–102. (In Russ.)

Sulaiman F. R., Hamzah H. A. Heavy metals accumulation in suburban roadside plants of a tropical area (Jengka, Malaysia). *Ecological Processes*. 2018;7:28. doi: 10.1186/s13717-018-0139-3

Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V. Heavy metals and plants. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. 194 p. (In Russ.)

Trubina M. R., Vorobeichik E. L. Content of heavy metals in medicinal plants in the area under aerotechnogenic impact of the middle Urals copper smelter. *Rastitel'nye resursy = Plant Resources*. 2013;49(2):203–222. (In Russ.)

Voskresenskaya O. L., Voskresensky V. S., Alyabysheva E. A. Accumulation of heavy metals in soils and plants in location of gathering and temporary storage of solid waste. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2013;2:40–46. (In Russ.)

Wuana R. A., Okieimen F. E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology*. 2011. doi: 10.5402/2011/402647

Zwolak A., Sarzynska M., Szpyrka E., Stawarczyk K. Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: a review. *Water Air Soil Pollut.* 2019;230:164. doi: 10.1007/s11270-019-4221-y

Поступила в редакцию / received: 30.11.2021; принята к публикации / accepted: 04.05.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Петухов Александр Сергеевич

ассистент кафедры органической и экологической химии, аспирант

e-mail: revo251@mail.ru

Кремлева Татьяна Анатольевна

д-р хим. наук, директор Института химии

e-mail: kreml-ta@yandex.ru

Петухова Галина Александровна

д-р биол. наук, доцент, профессор кафедры экологии и генетики

e-mail: gpetuhova1@mail.ru

Хритохин Николай Александрович

канд. хим. наук, доцент, профессор кафедры неорганической и физической химии

e-mail: kna@utmn.ru

CONTRIBUTORS:

Petukhov, Alexander

Research Assistant, Organic and Ecological Chemistry Department, Postgraduate Student

Kremleva, Tatyana

Dr. Sci. (Chem.), Director, Institute of Chemistry Department, Postgraduate Student

Petukhova, Galina

Dr. Sci. (Biol.), Associate Professor, Professor of Ecology and Genetics

Khritokhin, Nikolai

Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Professor of Inorganic and Physical Chemistry