

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 504.054; 631.416.9; 911.375

Н.С. Касимов¹, Д.В. Власов²**ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МЕТАЛЛОИДЫ В ПОЧВАХ РОССИЙСКИХ ГОРОДОВ (ПО ДАННЫМ ЕЖЕГОДНЫХ ДОКЛАДОВ РОСГИДРОМЕТА)**

На основе анализа созданной авторами базы данных по ежегодным докладам о загрязнении почв России токсикантами промышленного происхождения оценена интенсивность и динамика загрязнения почв 98 городов России Cd, Pb, Cu, Zn, As, Sn, Hg, Sb, Mo, Cr, Co, Ni, V, Ti, Mn, Sr и Fe. В почвах российских городов за последнюю четверть века из-за сокращения количества выбросов промышленности и автотранспорта уменьшились в 3–5 раз средние концентрации Hg, Zn, Sn, Mn и в 1,5–3 раза остальных тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) при одновременном росте в 2–5 раз аномальности Pb, Cu, Mo, As, Co и Cd из-за увеличения контрастности техногенных геохимических аномалий рядом с промышленными предприятиями, автомобильными и железными дорогами. Прямой связи между людностью, площадью или плотностью населения городов и загрязнением почв ТММ не установлено. Чрезвычайно опасная экологическая ситуация характерна для Ревды, Режа, Кировграда (Свердловская обл.) и Владикавказа. Очень опасная ситуация сформировалась в Рудной Пристани (Приморский край) и Белебее (Башкортостан). Опасная экологическая ситуация характерна для городов Первоуральск, Полевской, Верхняя Пышма, Сухой Лог, Алапаевск, Нижние Серги, Невьянск (Свердловской обл.), Баймак, Сибай, Давлеканово (Башкортостан). В почвах большинства городов формируются преимущественно полиэлементные геохимические аномалии с доминированием Cd и высоким содержанием Pb, Zn, Cu. Для почв городов с неопасной экологической ситуацией характерны малоконтрастные моно-, двух- и реже трехэлементные геохимические аномалии. Для более полной характеристики загрязнения почв городов России ТММ необходимо расширить перечень контролируемых поллютантов, включив Sb, As и другие элементы, а также увеличить число изучаемых населенных пунктов, особенно за счет крупных городов и промышленных центров, информация о которых в ежегодных докладах отсутствует.

Ключевые слова: городские почвы, геохимические аномалии, загрязнение, тяжелые металлы и металлоиды.

Введение. Высокая интенсивность техногенного воздействия на окружающую среду характерна для 135 городов России с общим населением 43 млн человек, к числу которых относятся миллионники, крупные региональные и малые промышленные центры, представляющие собой так называемые ареалы «промышленной бедности» с плохим состоянием инфраструктуры, большими транспортными издержками и отсутствием рынка квалифицированных кадров [Касимов с соавт., 2014].

Одним из удобных индикаторов техногенного воздействия, пространственного распределения формируемых им геохимических аномалий и надежным источником данных о возможном долговременном загрязнении атмосферного воздуха и других компонентов ландшафтов является почвенный покров. В городах многолетний эколого-геохимический мониторинг чаще всего направлен на установление уровней загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами (ТММ), полициклическими ароматическими углеводородами, соединениями фтора, нитратами, сульфатами и другими поллютантами.

Ежегодные наблюдения за загрязнением городских почв ведутся организациями сети Росгидромета с публикацией результатов в «Ежегодниках загрязнения почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения» [Ежегодник ..., 2008–2016] и региональными природоохранными учреждениями: например, в Москве – ГПБУ «Мосэкомониторинг» с подготовкой ежегодных докладов «О состоянии окружающей среды в городе Москве» [Доклад о состоянии окружающей среды ..., 2009–2016].

Как правило, загрязнение почв ТММ ежегодно исследуется в 30–50 населенных пунктах, причем перечень городов частично меняется. За последние 10 лет имеются данные о среднем валовом содержании ТММ в почвах почти 100 городов России [Ежегодник ..., 2008–2016]. Информация о динамике концентраций имеется лишь для некоторых городов за отдельные годы, что затрудняет оценку элементного и суммарного загрязнения почв городов России ТММ, а также их геохимической специализации.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, зав. кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв, академик РАН; *e-mail*: secretary@geogr.msu.ru.

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: vlasgeo@yandex.ru.

Цель работы – на основе статистической информации оценить интенсивность и динамику загрязнения городских почв России ТММ за последнюю четверть века путем анализа их геохимической специализации.

Методы и материалы. Использовалась созданная авторами база данных о среднем и максимальном валовом содержании ТММ в поверхностном (0–5 см) горизонте почв 98 городов России в 2006–2015 гг. по [Ежегодник ..., 2007–2016; Доклад о состоянии окружающей среды ..., 2008–2016].

При оценке загрязнения использовались кларки концентрации (*КК*) – отношения содержания элемента в городских почвах к его кларку верхней части континентальной земной коры. Ранее нами показана [Касимов, Власов, 2015] целесообразность использования для Sb, Ni, Cr, Hg, As, Zn, Pb, Mn, Fe, Sr, Ti в качестве эталонов сравнения кларков по [Григорьев, 2009], V, Co, Cu – [Hu, Gao, 2008], Mo, Cd – [Rudnick, Gao, 2003], Sn – [Wedepohl, 1995]. Кларки химических элементов в континентальной земной коре широко используются для сравнения различных геохимических систем, оценки степени концентрации вовлекаемых в процесс техногенеза химических элементов, выявления региональной геохимической специализации фоновых ландшафтов и техногенной трансформации состава природных сред. Так, сравнение концентраций многих ТММ в почвах сельскохозяйственных угодий Европы с их

кларками [Rudnick, Gao, 2003; Hu, Gao, 2008] показало, что относительно земной коры в агропочвах Европы накапливаются С, Se, S, Cd, околочларковые значения характерны для Pb, As, P, Cs, Ti, Cr, Zn, Mn, La, Te, Bi, Ag, Mo, существенно ниже кларков – V, Fe, Au, Ba, Co, Hg, Ni, Cu, Sn, Sr, Sb, U, Be, Tl, W, B, Ge [Chemistry ..., 2014].

Для интегральной оценки загрязнения почв ТММ рассчитывался суммарный показатель загрязнения $Z_c = \sum KK - (n-1)$, где *n* – число ТММ с $KK > 1,5$. Степень экологической опасности определялась в зависимости от величины *Zc*: <16 – неопасная, 16–32 – умеренно-опасная, 32–64 – опасная, 64–128 – очень опасная, >128 – чрезвычайно опасная экологическая ситуация [Методические рекомендации ..., 2006; Касимов с соавт., 2016].

Результаты исследований и их обсуждение.
Накопление потенциально токсичных элементов в почвах городов. Для городов России рассчитаны средние концентрации ТММ в почвах в 2006–2015 гг. (табл. 1). Данные о валовом содержании Zn в почвах имеются для 83 городов, Ni – 82, Pb – 81, Cu – 79, Cd – 71, Mn – 63, Co – 52, Cr – 34, Fe – 33, Hg – 30, V – 22, Mo – 14, As – 12, Sn – 8, Ti – 5, Sr – 4 городов, Sb – только 1 города. Это свидетельствует о неучете информации о многих ТММ, которые в последнее время становятся приоритетными поллютантами урбанизированных территорий, что указывает на необходимость более подробного изучения

Таблица 1

Содержание и накопление ТММ в почвах городов России в 2006–2015 гг.

ТММ	Среднее содержание в почвах городов России, мг/кг	Кларки ТММ верхней части континентальной земной коры, мг/кг	<i>КК</i>
Cd	2,2	0,09	25,0
Pb	99	17	5,8
Cu	113	27	4,2
Mo	3,5	1,1	3,2
Zn	221	75	2,9
Hg	0,1	0,065	2,2
As	9,8	5,6	1,8
Co	24	15	1,6
Ni	78	50	1,6
Sn	3,8	2,5	1,5
Ti	5077	3900	1,3
Cr	117	92	1,3
Mn	758	770	1,0
V	91	106	0,9
Sr	188	270	0,7
Fe	20 097	40 600	0,5

Примечания. Данные о валовом содержании Cd в почвах рассчитаны для 71 города (~5300 элементопределений, далее в скобках приводится число элементопределений), Pb – 81 (~6700), Cu – 79 (~6000), Mo – 14 (~900), Zn – в 83 (~6500), Hg – 30 (~3500), As – 12 (~2000), Co – 52 (~2300), Ni – 82 (~6500), Sn – 8 (~450), Ti – 5 (~200), Cr – 34 (~2300), V – 22 (~1200), Mn – 63 (~4300), Sr – 4 (~170), Fe – 33 (~1100) городов. Данные о Sb представлены в «Ежегодниках ...» [2008–2016] только для Владикавказа. Среднее содержание Sb в почвах этого города составляет 33,8 мг/кг, что в 41,7 раза выше кларка верхней части континентальной земной коры [Григорьев, 2009]. Для расчета *КК* использовались кларки Sb, Ni, Cr, Hg, As, Zn, Pb, Mn, Fe, Sr, Ti [Григорьев, 2009] V, Co, Cu [Hu, Gao, 2008], Mo, Cd [Rudnick, Gao 2003], Sn [Wedepohl, 1995].

распределения тяжелых металлоидов – Sb, As и других элементов.

В почвах российских городов по величине *КК* (цифры) ТММ образуют ряд: $Sb_{42} > Cd_{25} > Pb_{5,8} > Cu_{4,2} > Mo_{3,2} > Zn_{2,9} > Hg_{2,2} > (As, Co, Ni, Sn)_{1,5-2} > (Ti, Cr, Mn)_{1,0-1,3}$; рассеиваются V, Sr, Fe. Супертоксикантами являются Sb и Cd, *КК* которых в городских почвах больше 10. Данные о концентрации Sb имеются только во Владикавказе, поэтому ее распределение в почвах российских городов требует более детальных исследований. В других городах мира Sb и Cd также являются приоритетными поллютантами. Так, в Палермо (Италия) уровни Sb в дорожной пыли достигают нескольких сотен, Cd – десяти кларков [Varrica et al., 2003]. В почвах Лондона и Берлина содержание Cd в некоторых районах составляет десятки кларков [Birke et al., 2011; Chemistry ..., 2014], в почвах Праги средняя концентрация Sb – 13 мг/кг, что в 16 раз выше кларка верхней части континентальной коры [Duriš, 2011]. В Восточной Москве Sb и Cd образуют контрастные аномалии в снеге, почвах, дорожной пыли, древесных и травянистых растениях [Касимов с соавт., 2016].

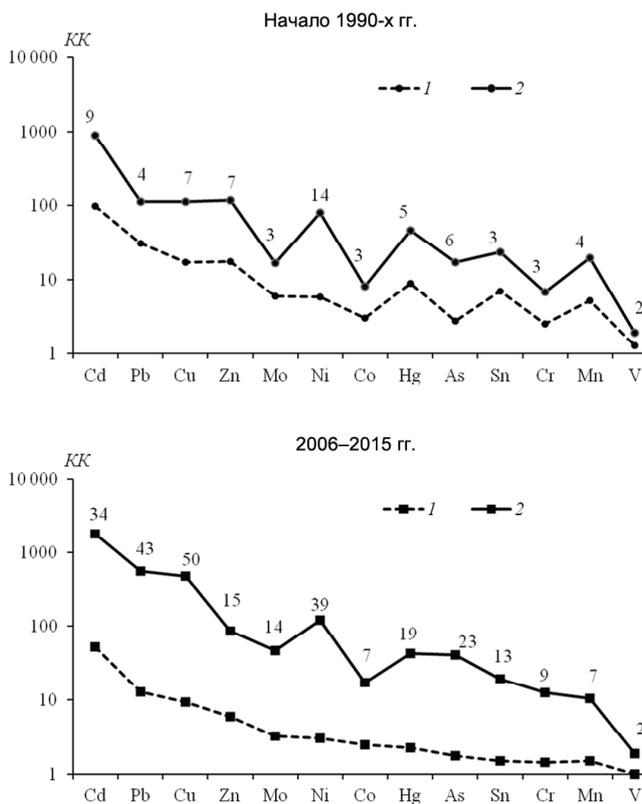


Рис. 1. Содержание ТММ в почвах наиболее загрязненных каждым элементом городов России в начале 1990-х гг. и в 2006–2015 гг.: 1 – средние *КК* в городах, 2 – максимальные *КК*, цифры – аномальность эпицентров городских техногенных аномалий (превышение максимальных над средними, раз)

Fig. 1. The HMM content in soils of the most polluted cities of Russia in the early 1990s and in 2006–2015: 1 – average *КК* in cities, 2 – maximum *КК*, numbers – anomaly in the centers of urban technogenic anomalies (the maximum values over the averages, times)

Тенденции изменения загрязнения городских почв за последние 25 лет определены путем расчета *КК* средних и аномальных валовых содержаний Cd, Pb, Cu, Zn, Hg, Cr, Co, Ni и Mn в почвах 30 наиболее загрязненных каждым элементом городов России в 2006–2015 гг. (рис. 1) в сравнении с началом 1990-х гг. [Экогеохимия ..., 1995]. В 2006–2015 гг. в почвах таких городов поллютанты образовали ряд (цифра – величина *КК*): $Cd_{53} > Pb_{13} > Cu_9 > Zn_6 > Mo_{3,2} > Ni_{3,0} > Co_{2,4} > Hg_{2,2} > (Sn, Cr, Mn, As, V)_{1,5-2}$. С начала 1990-х гг. произошли заметные изменения в характере и интенсивности загрязнения почв ТММ. В 3–5 раз уменьшились средние концентрации Hg, Zn, Sn, Mn и в 1,5–3 раза – остальных поллютантов.

Одной из главных причин уменьшения среднего загрязнения городских почв за последнюю четверть века явилось резкое падение промышленного производства к 1998 г. и затем его очень медленный рост; лишь в 2008–2012 гг. производство почти вернулось на уровень 1990 г., что наряду с модернизацией многих предприятий привело к сокращению промышленных выбросов за последние 25 лет почти в 2 раза [Касимов с соавт., 2014]. Одним из важных факторов явилось уменьшение выбросов автотранспорта примерно в 1,6 раза из-за использования новых более экологически чистых марок бензина и повышения эффективности двигателей внутреннего сгорания. Так, выбросы твердых частиц от легковых автомобилей с дизельным двигателем, работающих на топливе Евро-5 и Евро-6, в 28–36 раз меньше по сравнению с Евро-1 и в 5 раз – по сравнению с Евро-4 [Wesselink et al., 2006; Emission standards ..., 2017], что повлияло на интенсивность выпадения ТММ из атмосферы и, следовательно, уменьшение загрязнения городских почв.

В ряде городов локальным фактором снижения уровней ТММ в почвах стала замена верхнего загрязненного горизонта городских почв на рекультивационный материал, в котором, например, в западной части Москвы, концентрации V, Cr, Co, Zn, Cd, Sn в 1,8–2,7 раза меньше, чем в фоновых почвах [Битюков с соавт., 2016].

На территории городов поллютанты, как правило, распределены крайне неравномерно: выделяются как сильно загрязненные районы с центрами техногенных геохимических аномалий, формирующимися в промышленных и транспортных функциональных зонах, так и районы слабого загрязнения в рекреационных, реже селитебных зонах [Касимов с соавт., 2016]. Поэтому чувствительным индикатором интенсивности накопления ТММ в городских почвах является *аномальность* – отношение максимальных *КК* в городских аномалиях к средним *КК* на территории города. В 2006–2015 гг. по сравнению с началом 1990-х гг. [Экогеохимия ..., 1995] в 2–5 раз увеличилось максимальное содержание Pb, Cu, Mo, As, Co и Cd из-за локального прогрессирующего загрязнения почв рядом с очагами воздействия (промышленными предприятиями).

ми, автомобильными и железными дорогами). Поэтому локальные контрастные геохимические аномалии в городах образуют многие ТММ (цифра – аномальность): $Cu_{50}>Pb_{43}>Ni_{39}>Cd_{34}>As_{23}>Hg_{19}>Zn_{15}>Mo_{14}>Sn_{13}$ (рис. 1), а также $Cr_{8,9}>Co_{7,0}>Mn_{6,9}>V_{2,2}$.

Геохимическая специализация и экологическая опасность загрязнения городских почв. Оценка экологической опасности загрязнения почв городов ТММ в 2006–2015 гг. для 98 городов России проведена путем расчета широко применяемого в России суммарного показателя Z_c , по величине которого выделено 5 групп городов.

Максимальный уровень загрязнения, чрезвычайно опасная экологическая ситуация ($Z_c > 128$). Наибольшее загрязнение почв ТММ ($Z_c = 271$) характерно для Владикавказа [Ежегодник ..., 2016], где техногенное воздействие предприятий цветной металлургии формирует высококонтрастные полиэлементные Pb-Cd-Sb-Zn-Mo-Cu-As-Hg геохимические аномалии в почвах (табл. 2). К этой группе относятся и центры цветной металлургии Свердловской области с малой численностью населения: Рева с полиэлементной Cd-Cu-Pb-Zn-Co специализацией ($Z_c = 224$), Реж с Cd-Co-Ni-Cu-Cr-Zn-Hg (209) и Кировград с Cd-Cu-Hg-Pb-Zn-Co-Mn специализацией (190).

Очень высокий уровень загрязнения, очень опасная экологическая ситуация ($64 < Z_c < 128$) характерны для г. Рудная Пристань (Приморский край) – центра цветной металлургии с достаточно контрастными триэлементными Cd-Pb-Zn аномалиями ($Z_c = 80$) и г. Белебей (Башкортостан) с предприятиями машиностроения и металлообработки, воздействие которых приводит к сильному накоплению в почвах Cd и Pb.

Высокий уровень загрязнения, опасная экологическая ситуация ($32 < Z_c < 64$). Эта группа включает 7 городов Свердловской области и 3 города Башкортостана (табл. 2). Среди них наиболее загрязнен ($Z_c = 60$) Первоуральск, где в результате техногенного воздействия предприятий черной и цветной металлургии в почвах формируются полиэлементные Cd-Cu-Pb-Zn геохимические аномалии.

В центрах машиностроения и металлообработки с небольшой численностью населения почвы менее загрязнены ТММ ($Z_c = 33-44$). В них формируются полиэлементные Cd-Cu-Pb-Zn (Баймак, Башкортостан), Cd-Cu-Zn-Mn и Cd-Pb-Zn-Ni-Mn (Сухой Лог и Нижние Серги, Свердловская обл.) и трехэлементные Cd-Pb-Zn аномалии в почвах (Невьянск, Свердловская обл.). Cd-Ni-Pb аномалии характерны также для почв Давлеканово (Башкортостан), в котором развиты сельское хозяйство, пищевая промышленность и машиностроение.

Таблица 2

Уровни загрязнения почв некоторых городов России ТММ (2006–2015 гг.)

Город, регион	Ведущие отрасли	Геохимическая специализация почв, КК	Z_c
<i>Максимальный уровень загрязнения, чрезвычайно опасная экологическая ситуация ($Z_c > 128$)</i>			
Владикавказ, Северная Осетия	ЦМ	$Pb_{120}Cd_{57}Sb_{42}Zn_{22}Mo_{12}Cu_{11}As_9Hg_3$	271
Рева, Свердловская обл.	ЦМ	$Cd_{133}Cu_{64}Pb_{22}Zn_6Co_3$	224
Реж, Свердловская обл.	ЦМ	$Cd_{167}Co_{17}Ni_{16}Cu_5Cr_4Zn_3Hg_2$	209
Кировград, Свердловская обл.	ЦМ	$Cd_{79}Cu_{46}Hg_{27}Pb_{19}Zn_{16}Co_4Mn_3$	190
<i>Очень высокий уровень загрязнения, очень опасная экологическая ситуация ($64 < Z_c < 128$)</i>			
Рудная пристань, Приморский край	ЦМ	$Cd_{43}Pb_{32}Zn_7$	80
Белебей, Башкортостан	ММ	$Cd_{68}Pb_4$	71
<i>Высокий уровень загрязнения, опасная экологическая ситуация ($32 < Z_c < 64$)</i>			
Первоуральск, Свердловская обл.	ЧМ и ЦМ	$Cd_{36}Cu_{15}Pb_8Zn_5$	60
Баймак, Башкортостан	ММ	$Cd_{27}Cu_{12}Pb_8Zn_5$	44
Полевской, Свердловская обл.	ЧМ	$Cd_{22}Cu_6Co_5Zn_4Ni_3Hg_3Cr_3Mn_3$	43
Сибай, Башкортостан	ЦМ	$Cd_{26}Cu_9Zn_4Pb_3$	40
Верхняя Пышма, Свердловская обл.	ЦМ	$Cd_{24}Cu_{12}Pb_3Ni_3$	39
Сухой Лог, Свердловская обл.	ММ	$Cd_{18}Cu_{16}Zn_3Mn_2$	38
Давлеканово, Башкортостан	СХ и ММ	$Cd_{37}Ni_3Pb_2$	38
Алапаевск, Свердловская обл.	ЧМ	$Cd_{29}Pb_3Mn_3Ni_3$	35
Нижние Серги, Свердловская обл.	ММ	$Cd_{27}Pb_4Zn_3Ni_2Mn_2$	34
Невьянск, Свердловская обл.	ММ	$Cd_{27}Pb_4Zn_4$	33

Примечание. Отрасли: ЦМ – цветная металлургия, ЧМ – черная металлургия, ММ – машиностроение и металлообработка, СХ – сельское хозяйство и пищевая промышленность.

Широкий спектр ТММ накапливается в почвах Полевского с аномалиями Cd, Cu, Co, Zn, Ni, Hg, Cr и Mn, Алапаевска – Cd, Pb, Mn и Ni, Верхней Пышмы (все – Свердловская обл.) – Cd, Cu, Pb и Ni, Сибая (Башкортостан) – Cd, Cu, Zn и Pb.

Средний уровень загрязнения, умеренно-опасная экологическая ситуация ($16 < Zc < 32$) характерны для 15 российских городов, в почвах которых формируются полиэлементные техногенные геохимические аномалии: Нижний Тагил (Свердловская обл.) и Ульяновск – Cd-Cu-Pb-Zn; Свирск (Иркутская обл.) – Cd-Pb-Sn-Cu-Mo-Zn-Hg; Усть-Илимск (Иркутская обл.) – Cu-Co-Mo-Hg-Mn; Нижний Новгород – Zn-Cd-Sn-Pb-Mo-Cu. Медногорск (Оренбургская обл.), Дальнегорск (Приморский край), Учалы (Башкортостан), Черемхово (Иркутская обл.) и Пенза имеют трехэлементные Cd-Pb-Zn аномалии в почвах. В остальных городах формируются двухэлементные (Cd-Pb в Йошкар-Оле и Cd-Cu в Отрадном Самарской обл.) или моноэлементные кадмиевые аномалии (Каменск-Уральский в Свердловской и Коломна в Московской обл., Туймазы в Башкортостане).

Низкий уровень загрязнения, неопасная экологическая ситуация ($Zc < 16$) выявлены в 67 российских городах – крупных региональных центрах и относительно небольших населенных пунктах с развитой промышленностью. Для большинства из них характерны моно- и двухэлементные, реже – полиэлементные слабоконтрастные аномалии ТММ в почвах.

Таким образом, практически во всех городах с умеренно-опасной, опасной, очень опасной и чрезвычайно опасной экологической ситуацией приоритетным элементом-загрязнителем является Cd с $KK = 18-133$. Лишь во Владикавказе и Нижнем Новгороде он занимает второе место по интенсивности накопления, уступая Pb и Zn. В качестве эталона сравнения использовался кларк элемента (0,09 мг/кг) по оценке [Rudnick, Gao, 2003]. Во многих других работах кларки Cd имеют близкие значения (0,06–0,16 мг/кг) [Виноградов, 1962; Беус с соавт., 1976; Taylor, McLennan, 1985; Shaw et al., 1986; Wedepohl, 1995; Gao et al., 1998; Hu, Gao, 2008], что слабо влияет на величину KK . При использовании для оценки загрязнения почв ТММ кларка Cd (0,64 мг/кг) по данным Н.А. Григорьева [2009], KK этого элемента в почвах городов России снизится почти в 7 раз. Однако даже в этом случае во многих городах KK Cd составит более 10, что указывает на сильное загрязнение почв этим элементом.

Во многих промышленных городах приоритетны также Pb, Zn, Cu, реже – Co, Ni, Hg, Mn. Опасные металлоиды Sb и As являются одними из ведущих поллютантов только во Владикавказе.

Рассчитанные нами показатели загрязнения частично согласуются с информацией, представленной в «Ежегоднике ...» [2016]. Так, к опасной и очень опасной категории загрязнения почв ТММ ($Zc = 32-128$) относятся 2,5% обследованных за период 2006–2015 гг. населенных пунктов, их отдельных районов, одно- и пятикилометровых зон вокруг источников

загрязнения. В их число входят Кировград, Рева, Реж, Рудная Пристань, Свирск и Слюдянка, в то время как согласно нашим расчетам, к ним относятся еще 12 городов (табл. 2). Такие различия объясняются несовпадением эталонов сравнения: в «Ежегодниках ...» для некоторых городов применяются фоновые концентрации поллютантов, а для остальных – кларки почв по А.П. Виноградову [1957], что затрудняет сравнение городов между собой. Нами для всех населенных пунктов применяется один эталон – приведенные выше кларки почв верхней части континентальной земной коры. Кроме того, в «Ежегодниках ...» для некоторых городов также учитываются концентрации подвижных, кислоторастворимых и водорастворимых форм ТММ; для корректности сравнения мы анализировали только валовое содержание поллютантов. Так, при учете кислоторастворимых форм ТММ почвы Слюдянки обладают сильной степенью загрязнения ($Zc = 33$), если только валового содержания ТММ – низкой ($Zc = 9$).

Интенсивное суммарное загрязнение почв ТММ характерно для городов с населением до 100 тыс. человек (рис. 2), хотя прямой зависимости между людностью и уровнем Zc почв не установлено. В городах с населением свыше 800 тыс. человек Zc не превышает 16–20 с преимущественно неопасной экологической ситуацией. Между величиной Zc почв и площадью или плотностью населения городов прямые связи также отсутствуют.

Исследования в Австралии показали прямую зависимость между количеством выбрасываемых и вторично образующихся взвешенных частиц в атмосферном воздухе и численностью населения [Ayers et al., 1982]. Однако это может нарушаться в небольших городах с развитой промышленностью: в Норильске в расчете на каждого жителя приходится примерно 11 т выбросов в год, в Асбесте – почти 6 т, в то время как в большинстве городов России показатель не превышает 1 т/чел. в год [Регионы и города России ..., 2014]. Во многих городах европейской части России ведущую роль в выбросах играют предприятия энергетики, работающие на природном газе, продукты сгорания которого практически не содержат взвешенных частиц, поэтому такие источники слабо влияют на загрязнение почв, но образующиеся при этом газообразные соединения оказывают негативное воздействие на качество атмосферного воздуха. В азиатской части России в структуре топлива преобладает уголь, что, наоборот, способствует усиленному выбросу твердых частиц и сажи и формированию иной геохимической специализации почв [Касимов с соавт., 2014]. Поэтому представление о наличии связи между численностью населения города и загрязнением почв достаточно условно. В связи с этим дискуссия о корректности применения людности в качестве критерия геохимической систематики городов в работе [Алексеенко, Алексеенко, 2013].

Выбросы в атмосферу являются начальным звеном векторной системы *воздействие* → *изме-*

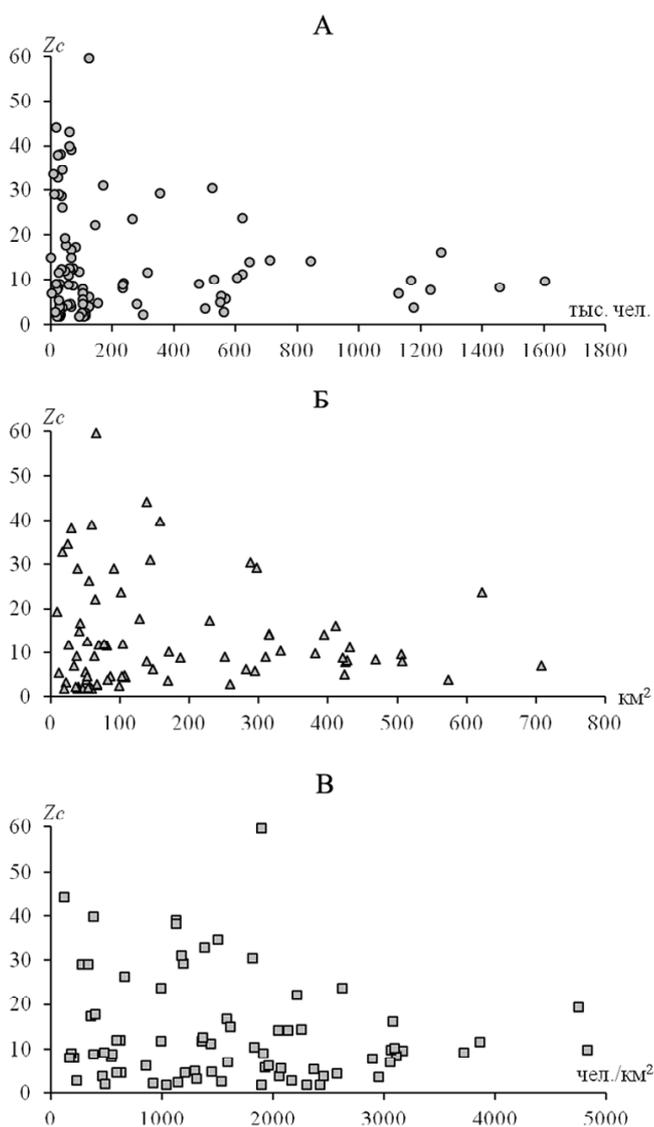


Рис. 2. Связь суммарного загрязнения почв ТММ в 2006–2015 гг. с численностью населения (А), площадью (Б) и плотностью населения (В) городов России. Не показана Москва из-за высокой численности населения и площади, и города с $Z_c > 60$ (Владикавказ, Ревда, Реж, Кировград, Рудная Пристань, Белебей)

Fig. 2. Relationship of the total soil contamination with HMM in 2006–2015 with population numbers (A), area (B) and population density (B) of Russian cities. Moscow with high population numbers and large area is not shown, as well as the cities with $Z_c > 60$ (Vladikavkaz, Revda, Rezh, Kirovgrad, Rudnaya Pristan, Belebej)

нение → устойчивость → последствия, а загрязнение почв – конечным [Битюкова с соавт., 2011]. Поэтому установленная ранее [Касимов с соавт., 2014] связь между численностью населения и масштабом антропогенного воздействия на окружающую среду городов (атмосферу, водные и земельные ресурсы, тепловое и радиационное воздействие) не сохраняется между загрязнением почв и людностью.

Все это дает лишь приблизительную оценку интенсивности загрязнения городских почв России, так как во многих крупных городах мониторинг содержания ТММ в почвах не ведется. Например, в

«Докладах об экологической ситуации в Санкт-Петербурге» [2011–2015] или в «Докладах о состоянии и охране окружающей среды города федерального значения Севастополя» [2015, 2016] такие данные отсутствуют.

Приведенные данные представляют собой неполный и достаточно общий экологический «портрет» загрязнения почв ТММ, поскольку в некоторых городах помимо государственного мониторинга для более полной характеристики экологической ситуации периодически проводятся эколого-геохимические исследования научными организациями в рамках различных проектов. Так, согласно [Доклад о состоянии окружающей среды ..., 2009–2016], загрязнение почв Москвы низкое, в то время как исследования в отдельных округах позволили выделить районы с очень высоким уровнем экологической опасности [Касимов с соавт., 2016]. Аналогичная ситуация характерна для г. Томска, в котором по [Ежегодник ..., 2008–2016] загрязнение почв незначительное, а по оценкам Е.Г. Язикова с соавт. [2010] – высокое. Эти различия объясняются меньшим числом ТММ при государственном мониторинге, что не соответствует современным представлениям о приоритетных поллютантах урбанизированных территорий.

Для более полной картины необходимо регулярно проводить дополнительные исследования в городах с критическим уровнем антропогенного воздействия [Касимов с соавт., 2016]: Санкт-Петербурге, Брянске, Липецке, Туле, Краснодаре, Ярославле, Хабаровске, Белгороде, Астрахани, Магнитогорске, Череповце, Обнинске и др., а также в других крупных городах и промышленных центрах, информация о которых в ежегодных докладах о загрязнении почв России токсикантами промышленного происхождения отсутствует.

Выводы:

– получен экологический «портрет» загрязнения городских почв России ТММ. За последнюю четверть века в результате снижения выбросов промышленности и автотранспорта в почвах российских городов уменьшились в 3–5 раз средние концентрации Hg, Zn, Sn, Mn и в 1,5–3 раза – остальных ТММ. Одновременно в 2–5 раз увеличилась аномальность Pb, Cu, Mo, As, Co и Cd из-за роста контрастности техногенных геохимических аномалий рядом с промышленными предприятиями, автомобильными и железными дорогами. Во многих городах приоритетным загрязнителем является Cd;

– чрезвычайно опасная экологическая ситуация характерна для Владикавказа, Ревды, Режа, Кировграда, очень опасная – для Рудной Пристань и Белебея, опасная – для Первоуральска, Баймака, Полевского, Сибая, Верхней Пышмы, Сухого Лога, Давлеканово, Алапаевска, Нижних Серег, Невьянска. В почвах этих городов формируются преимущественно полиэлементные геохимические аномалии с доминированием Cd и высоким содержанием Pb,

Zn, Cu; для почв городов с неопасной экологической ситуацией характерны мало контрастные моно-, двух- и реже трехэлементные геохимические аномалии; прямой связи между людностью, площадью или плотностью населения городов и загрязнением почв ТММ не установлено;

– для более полной характеристики загрязнения почв городов России ТММ необходимо включить в перечень контролируемых поллютантов Sb, As и др., а также увеличить число изучаемых населенных пунктов, особенно за счет крупных городов и промышленных центров.

Благодарности. Оценка загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-27-00083), геохимическая специализация российских городов – Российского фонда фундаментальных исследований и Русского географического общества (договор № 03/2017 РГО-РФФИ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Алексеев А.В.* Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитренных ландшафтов. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2013. 388 с.
- Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1976. 248 с.
- Битюкова В.Р., Дорохова М.Ф., Власов Д.В., Касимов Н.С., Кислякова Н.Ю., Кириллов П.Л., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М., Петухова Н.В., Рыжов А.В., Савоскул М.С., Саульская Т.Д., Шартова Н.В.* Восток – Запад Москвы: пространственный анализ социально-экологических проблем. М.: Географический факультет МГУ, 2016. 70 с.
- Битюкова В.Р., Касимов Н.С., Власов Д.В.* Экологический портрет российских городов // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 6–18.
- Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 235 с.
- Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Григорьев Н.А.* Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды города федерального значения Севастополя. Севастополь: Севприроднадзор, 2015, 40 с.; 2016, 147 с.
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве. М.: Формула Цвета, 2009, 209 с.; 2010, 238 с.; М.: Спецкнига, 2011, 135 с.; 2012, 150 с.; 2013, 178 с.; М.: ЛАРК ЛТД, 2014, 222 с.; М.: ДПиООС; НИА-Природа, 2015, 384 с.; 2016, 269 с.
- Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге. СПб., 2011, 144 с.; СПб.: Сезам-Принт, 2012, 190 с.; 2013, 168 с.; СПб.: Единый строительный портал, 2014, 173 с.; СПб.: Дитон, 2015, 180 с.
- Ежегодник загрязнения почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения. Обнинск: ГУ ВНИИГМИ-МЦД, 2008, 97 с.; 2009, 120 с.; 2010, 139 с.; 2011, 142 с.; 2012, 146 с.; 2013, 138 с.; 2014, 114 с.; 2015, 105 с.; 2016, 111 с.
- Касимов Н.С., Битюкова В.Р., Малхазова С.М., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М., Шартова Н.В., Власов Д.В., Тимошин С.А., Крайнов В.Н.* Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния. М.: ИП Филимонов М.В., 2014. 560 с.
- Касимов Н.С., Власов Д.В.* Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.
- Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М.* Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
- Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЭ, 2006. 7 с.
- Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 336 с.
- Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В.* Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. 264 с.
- Ayers G.P., Bigg E.K., Turvey D.E., Manton M.J.* Urban influences on condensation nuclei over a continent // Atmospheric Environment. 1982. V. 16. P. 951–954.
- Birke M., Rauch U., Stummeyer J.* Urban geochemistry of Berlin, Germany // Mapping the chemical environment of urban areas. Oxford: John Wiley & Sons, 2011. P. 245–268.
- Chemistry of Europe's agricultural soils. Part A: Methodology and interpretation of the GEMAS data set / Ed. by C. Reimann, M. Birke, A. Demetriades, P. Filzmozer, P. O'Connor. Hannover: Schweizerbart Sci. Publ., 2014. 528 p.
- Đuriš M.* Geochemical and ecological survey of the Prague city area, Czech Republic // Mapping the chemical environment of urban areas. Oxford: John Wiley & Sons, 2011. P. 364–374.
- Emission standards. EU: cars and light trucks. DieselNet, 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php> (дата обращения: 04.05.2017).
- Gao S., Luo T.-C., Zhang B.-R., Zhang H.-F., Han Y.-W., Hu Y.-K., Zhao Z.-D., Hu Y.-K.* Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1998. V. 62. Iss. 11. P. 1959–1975.
- Hu Z., Gao S.* Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geol. 2008. V. 253. Iss. 3–4. P. 205–221.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // Treatise on geochemistry. Elsevier, 2003. V. 3. P. 1–64.
- Shaw D.M., Cramer J.J., Higgins M.D., Truscott M.G.* Composition of the Canadian Precambrian shield and the continental crust of the Earth // The Nature of the lower continental crust / Ed. by J.B. Dawson, D.A. Carswell, J. Hall, K.H. Wedepohl. London: Geological Society of London, 1986. P. 257–282.
- Taylor S.R., McLennan S.M.* The continental crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell Science Publ., 1985. 330 p.
- Varrica D., Dongarra G., Sabatino G., Monna F.* Inorganic geochemistry of roadway dust from the metropolitan area of Palermo, Italy // Environ. Geol. 2003. V. 44. P. 222–230.
- Wedepohl K.H.* The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. № 7. P. 1217–1232.
- Wesselink L.G., Buijsman E., Annema J.A.* The impact of Euro 5: facts and figures. MNP report 500043002. Bilthoven: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2006. 10 p.

Поступила в редакцию 31.05.2017
Принята к публикации 28.12.2017

N.S. Kasimov¹, D.V. Vlasov²

**HEAVY METALS AND METALLOIDS
IN URBAN SOILS OF RUSSIAN CITIES
(ACCORDING TO THE ANNUAL REPORTS OF ROSGIDROMET)**

The intensity and dynamics of soil contamination with Cd, Pb, Cu, Zn, As, Sn, Hg, Sb, Mo, Cr, Co, Ni, V, Ti, Mn, Sr and Fe in 98 cities of Russia was evaluated through the analysis of a database compiled by the authors using the annual reports of soil contamination by toxicants of industrial origin in Russia. Over the last few decades due to the reduction of industrial and vehicular emissions mean concentrations of Hg, Zn, Sn, Mn in the soils of Russian cities decreased 3 to 5 times and the amounts of other heavy metals and metalloids (HMM) decreased 1.5 to 3 times. Besides, the geochemical anomaly of Pb, Cu, Mo, As, Co, Cd increased 2 to 5 times simultaneously due to more contrasting technogenic geochemical anomalies near industrial enterprises, roads and railways. The direct connection between the population, area or density of the population in cities and soil contamination with HMM was not found. Extremely dangerous ecological situation is typical for Revda, Rezh, Kirovgrad (Sverdlovsk Oblast) and Vladikavkaz. A very dangerous situation was recorded in the Rudnaya Pristan (Primorsky Krai) and Belebei (Bashkortostan). A dangerous ecological situation is typical for the cities of Pervouralsk, Polevskoy, Verkhnyaya Pyshma, Sukhoy Log, Alapaevsk, Nizhniye Sergi, Nevyansk (Sverdlovsk Oblast), Baymak, Sibai, Davlekanovo (Bashkortostan). Mainly polyelement geochemical anomalies were formed in the soils of the majority of cities, with predominance of Cd and high content of Pb, Zn, Cu. Low-contrast mono-, bi- and, less often, three-element geochemical anomalies are common for soils of the cities with non-hazardous ecological situation. To make the analysis of soil contamination by HMM in Russian cities more complete it is necessary to widen the list of controlled pollutants, adding Sb, As and some other elements, as well as to increase the number of studied settlements, especially by including the large cities and industrial centers, which are absent in the annual reports.

Key words: urban soils, geochemical anomalies, pollution, heavy metals and metalloids.

Acknowledgements. The assessment of soil contamination with heavy metals and metalloids was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 14-27-00083), the geochemical specialization of Russian cities was established under financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Geographical Society (project РГО-РФФИ).

REFERENCES

- Alekseenko V.A., Alekseenko A.V.* Himicheskie elementy v geohimicheskikh sistemah. Klarki pochv selitebnykh landshaftov [Chemical elements in geochemical systems. The abundances in urban soils]. Rostov-on-Don: Izdatel'stvo JuFU, 2013. 380 p. (in Russian).
- Ayers G.P., Bigg E.K., Turvey D.E., Manton M.J.* Urban influences on condensation nuclei over a continent // *Atmospheric Environment*. 1982. V. 16. P. 951–954.
- Beus A.A., Grabovskaya L.I., Tihonova N.V.* Geohimiya okruzhayushhej sredy [Environmental Geochemistry]. Moscow: Nedra, 1976. 248 p. (in Russian).
- Birke M., Rauch U., Stummeyer J.* Urban geochemistry of Berlin, Germany // *Mapping the chemical environment of urban areas*. Oxford: John Wiley & Sons, 2011. P. 245–268.
- Bityukova V.R., Dorokhova M.F., Vlasov D.V., Kasimov N.S., Kislyakova N.Yu., Kirillov P.L., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Petukhova N.V., Ryzov A.V., Savoskul M.C., Saulskaya T.D., Shartova N.V.* Vostok – Zapad Moskvy: prostranstvennyj analiz social'no-ekologicheskikh problem [East – West Moscow: spatial analysis of social and environmental problems. Moscow: Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University, 2016. 70 p. (in Russian).
- Bityukova V.R., Kasimov N.S., Vlasov D.V.* Ekologicheskij portret rossijskikh gorodov [Environmental Portrait of Russian Cities] // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2011. № 4. P. 6–18 (in Russian).
- Chemistry of Europe's agricultural soils. Part A: Methodology and interpretation of the GEMAS data set / Ed. by C. Reimann, M. Birke, A. Demetriades, P. Filzmozer, P. O'Connor. Hannover: Schweizerbart Sci. Publ., 2014. 528 p.
- Doklad o sostoyanii i ohrane okruzhayushhej sredy goroda federal'nogo znachenija Sevastopolya [Report on the state and protection of the environment in Sevastopol]. Sevastopol: Sevprirrodnadzor, 2015. 40 p.; 2016. 147 p. (in Russian).
- Doklad o sostoyanii okruzhajushhej sredy v gorode Moskve [Report on the state of the environment in Moscow]. Moscow: Formula Cveta, 2009. 209 p.; 2010. 238 p.; Speckniga, 2011. 135 p.; 2012. 150 p.; 2013. 178 p.; LARK LTD, 2014. 222 p.; DPiOOS, NIA-Priroda, 2015. 384 p.; 2016. 269 p. (in Russian).
- Doklad ob ekologicheskoy situacii v Sankt-Peterburge [Report on the environmental situation in St. Petersburg]. Saint-Petersburg, 2011. 144 p.; Sezam-Print, 2012, 190 p.; 2013, 168 p.; Edinyj stroitel'nyj portal, 2014, 173 p.; Diton, 2015, 180 p. (in Russian).
- Đuriš M.* Geochemical and ecological survey of the Prague city area, Czech Republic // *Mapping the chemical environment of urban areas*. Oxford: John Wiley & Sons, 2011. P. 364–374.
- Emission standards. EU: cars and light trucks. DieselNet, 2017. URL: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php> (access: 04.05.2017).
- Ezhгодnik zagryaznenija pochv Rossijskoj Federacii toksikantami promyshlennogo proishozhdeniya [Annual report of

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, head of the department, Academician of RAS; *e-mail:* secretary@geogr.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail:* vlasgeo@yandex.ru

soil pollution in the Russian Federation with toxicants of industrial origin]. Obninsk: GU VNIIGMI-MCD, 2008. 97 p.; 2009. 120 p.; 2010. 139 p.; 2011. 142 p.; 2012. 146 p.; 2013. 138 p.; 2014. 114 p.; 2015. 105 p.; 2016. 111 p. (in Russian).

Gao S., Luo T.-C., Zhang B.-R., Zhang H.-F., Han Y.-W., Hu Y.-K., Zhao Z.-D., Hu Y.-K. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1998. V. 62. Iss. 11. P. 1959–1975.

Grigoriev N.A. Raspređenje himičeskih elementov v verhnjoj časti kontinental'noj kory [Chemical element distribution in the upper continental crust]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. 382 p. (in Russian).

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // *Chem. Geol.* 2008. V. 253. Iss. 3–4. P. 205–221.

Ekogeohimija gorodskih landšaftov [Ecogeochemistry of urban landscapes] / Ed. by N.S. Kasimov. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, 1995. 336 p. (in Russian).

Kasimov N.S., Bityukova V.R., Malkhazova S.M., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Šartova N.V., Vlasov D.V., Timonin S.A., Krainov V.N. Regiony i goroda Rossii: integral'naya ocenka ekologičeskogo sostojaniya [Regions and cities of Russia: the integrated assessment of the state of the environment]. Moscow: publisher Filimonov M.V., 2014. 560 p. (in Russian).

Kasimov N.S., Vlasov D.V. Klarki himičeskih elementov kak etalony sravneniya v ekogeohimii [Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry] // *Vestnik Moskovskogo Unversiteta. Seria Geografija*. 2015. № 2. P. 7–17 (in Russian).

Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. Geohimija landšaftov Vostočnoj Moskvy [Landscape Geochemistry of Eastern Moscow]. Moscow: APR, 2016. 276 p. (in Russian).

Metodicheskie rekomendacii po ocenke stepeni zagryaznenija atmosfernogo vozduha naseleennyh punktov metallami po ih sodržaniju v snežnom pokrove i počve [Methodical recommendations on the assessment of air pollution with metals in

settlements basing on their content in snow cover and soil]. Moscow: IMGRE, 2006. 7 p. (in Russian).

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on geochemistry*. 2003. Elsevier. V. 3. P. 1–64.

Shaw D.M., Cramer J.J., Higgins M.D., Truscott M.G. Composition of the Canadian Precambrian shield and the continental crust of the Earth // *The Nature of the lower continental crust* / Ed. by J.B. Dawson, D.A. Carswell, J. Hall, K.H. Wedepohl. London: Geological Society of London, 1986. P. 257–282.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell Science Publ., 1985. 330 p.

Varrica D., Dongarra G., Sabatino G., Monna F. Inorganic geochemistry of roadway dust from the metropolitan area of Palermo, Italy // *Environ. Geol.* 2003. V. 44. P. 222–230.

Vinogradov A.P. Geohimija redkih i rasseyannyh elementov v počvach [Geochemistry of rare and trace elements in soils]. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1957. 235 p. (in Russian).

Vinogradov A.P. Srednee sodržanie himičeskih elementov v glavnyh tipah izverzhennyh porod zemnoj kory [The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust] // *Geokhimiya*. 1962. № 7. P. 555–571 (in Russian).

Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. V. 59. № 7. P. 1217–1232.

Wesselink L.G., Buijsman E., Annema J.A. The impact of Euro 5: facts and figures. MNP report 500043002. Bilthoven: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2006. 10 p.

Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhorniyak L.V. Ocenka ekologičeskogo sostojaniya territorii g. Tomsk po dannym izučeniya pyleaerozolej i počv [Assessment of the ecological and geochemical state of the territory of Tomsk according to the data on dust aerosols and soils]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2010. 264 p. (in Russian).

Received 31.05.2017

Accepted 28.12.2017