



ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВ ВОСТОЧНОГО ОКРУГА г. МОСКВЫ (ПО ДАННЫМ 1989–2010 гг.)

ANALYSIS OF POLLUTION WITH HEAVY METALS IN SOILS OF THE EASTERN DISTRICT OF MOSCOW (BASED ON DATA COLLECTED DURING 1989–2010)

НИКИФОРОВА Е.М.

Старший научный сотрудник кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к.г.н.

КОШЕЛЕВА Н.Е.

Ведущий научный сотрудник кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д.г.н., natalk@mail.ru

КАСИМОВ Н.С.

Декан и зав. кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д.г.н., профессор, академик РАН

NIKIFOROVA E.M.

Senior research scientist in the department of landscape geochemistry and soil geography, the faculty of geography, Moscow State University, Ph.D.

KOSHELEVA N.E.

Leading research scientist in the department of landscape geochemistry and soil geography, the faculty of geography, Moscow State University, doctor of geographical sciences. E-mail: natalk@mail.ru

KASIMOV N.S.

Dean of the faculty of geography at M.V. Lomonosov Moscow State University and head of the department of landscape geochemistry and soil geography, doctor of geographical sciences, professor, member of Russian Academy of Sciences

Ключевые слова:

загрязнение; экологическая опасность; тяжелые металлы; городские почвы; техногенные аномалии; функциональные зоны; динамика; геохимические карты.

Key words:

pollution; environmental risk; heavy metals; urban soils; technogenic anomalies; functional zones; dynamics; geochemical maps.

Аннотация

Приводятся результаты многолетних натурных наблюдений за содержанием девяти тяжелых металлов (ТМ) в почвах Восточного округа Москвы. Впервые изучены пространственное распределение и многолетняя динамика загрязнения ТМ поверхностного слоя городских почв. Составлен ряд ситуационных и индикационных геохимических карт, рассчитаны скорости ежегодного прироста концентраций металлов в почвах разных функциональных зон, выявлены пространственно-временные тренды их суммарного накопления и оценена степень экологической опасности загрязнения. Установлено, что в почвах происходит постепенный рост содержания ряда ТМ, приводящий к увеличению контрастности и площади техногенных полиэлементных аномалий. В 1989 и 2005 гг. наиболее интенсивно аккумулировались Pb, Zn, Cu и Cd. Ежегодный относительный прирост содержания ТМ в этот период был максимальным у Pb и Cu. В 2010 г. наибольшие коэффициенты накопления в почвах имели Pb, Zn, Cd, Cr, Cu, Ni, максимальная скорость прироста в 2005–2010 гг. наблюдалась у Cr, Cd, Co и Ni. В настоящее время в почвах округа преобладает умеренно опасный суммарный уровень загрязнения ТМ.

Abstract

The article presents the results of long-term field investigation into behavior of nine heavy metals (HM) in soils of Eastern district of Moscow. For the first time spatial distribution and interannual dynamics of surface layer pollution of urban soils with HM were identified. A series of geochemical maps characterizing levels and conditions of pollution with HM were compiled, the rates of annual increase of metal concentrations in soils of different functional zones were estimated, spatial-temporal trends of HM accumulation in soils in relation to land use were revealed and environmental risks of pollution were evaluated. It has been determined that the content of some metals gradually rises causing the increase of contrast and growth of area of technogenic multielement anomalies. In 1989 and 2005 Pb, Zn, Cu and Cd accumulated in soils more intensively than other elements. Relative annual increase of Pb and Cu content during this period reached its maximum. In 2010 accumulation coefficients were high for Pb, Zn, Cd, Cr, Cu, Ni. During 2005–2010 the maximum rate of increase was registered for Cr, Cd, Co and Ni. At present the level of total pollution of soils with HM in the study area can be characterized as moderately hazardous.



Введение

Глобальный процесс урбанизации сопровождается обострением ряда экологических проблем в крупных промышленных городах и мегаполисах. Среди них наиболее актуальной является экологическая опасность загрязнения различными поллютантами городской среды. Согласно данным ООН, в настоящее время половина населения Земли живет в городах, а к 2030 г. количество горожан достигнет более 60%. В этой связи изучение многолетней динамики и оценка опасности загрязнения городских экосистем являются первоочередными задачами.

Городская среда представляет собой сложную природно-социально-экономическую систему, образованную как антропогенными, так и природными компонентами, анализ которых служит основой для изучения ее экологических функций [3]. Наряду с их рассмотрением ведется контроль состояния городской среды. С этой целью используются ландшафтно-геохимические подходы и концепции [12, 28], которые предполагают выявление основных источников эмиссии вредных веществ и оценку их влияния на пространственное распределение и динамику накопления в депонирующих средах городских ландшафтов. Для решения этих задач в качестве полигона нами была выбрана территория Восточного административного округа (ВАО) Москвы.

В настоящее время экологическая обстановка в городе определяется резким увеличением автопарка, который поставляет в атмосферу 90–95% общего объема выбросов [3]. Промышленный спад в 1990-е гг. привел к сокращению на территории города объема выбросов вредных веществ от стационарных источников с 367 в 1990 г. до 141,3 тыс. т/год в 1998 г. Однако с 1999 г. начался компенсационный подъем в промышленности, что вызвало рост их выбросов в атмосферу.

Сегодня ВАО — один из основных промышленных районов Москвы [2]. Здесь расположено 12 крупнейших промзон, в структуре которых ведущее место занимают предприятия машиностроения (заводы «Прожектор», «Компрессор», «Салют», «Эталон» и др.), химической и нефтехимической промышленности (Кусковский химзавод, нефтемаслозавод, завод резинотехнических изделий «Красный богатырь», ПО «Вулкан» и др.). На территории округа находятся мощные энергетические предприятия — ТЭЦ-23, ТЭЦ-11 и ряд котельных. Объем выбросов в атмосферу от стационарных источников в ВАО превышает 17% от общегородских поступлений, уступая лишь Юго-Восточному округу. Территория считается одной из самых перегруженных в городе промышленными отходами.

Наибольший вклад в загрязнение атмосферы округа вносят автомагистрали, крупнейшими из которых являются шоссе Энтузиастов и МКАД. Автомобильный транспорт и предприятия нефтехимической и машиностроительной специализации являются главными источниками многих вредных поллютантов, в т.ч. тяжелых металлов (ТМ), выбросы которых образуют техногенные миграционные потоки и затем попадают в почвы, воды, растения и другие компоненты городской среды.

Высокий уровень загрязнения городской среды явился одной из причин напряженной экологической обстановки на территории округа, которая привела к снижению качества жизни и повышению смертности горожан [24]. По данным ВОЗ, среди причин смертности в Москве первое место занимают онкологические заболевания. Их прирост в 2004–2008 годах составил 9%, превысив средние значения по стране. Высокой смертности горожан мог способствовать повышенный уровень содержания ТМ, в т.ч. Pb в почвах округа. Многие ТМ относятся не только к приоритетным, но и биохимически активным загрязнителям [7], способным вызвать у живых организмов канцерогенные мутации. Накоплению ТМ в городских почвах благоприятствует слабая подвижность большинства их соединений в щелочной среде, создаваемой пылевыми выбросами [9, 13, 19, 20]. Техногенные аномалии ТМ в почвах более статичны и долговечны, чем в других природных средах, т.к. способны аккумулировать металлы на протяжении всего периода техногенного воздействия. Поэтому индикация и картографирование содержания ТМ в почвах являются одним из основных методов ландшафтно-геохимической оценки экологической опасности загрязнения городов [8, 10].

Уровни содержания и особенности распределения ТМ в почвах Москвы изучались многими исследователями [14, 15, 18, 20–23, 25, 26, 28–30 и ряд др.]. Однако пространственная структура и многолетняя динамика загрязнения городских почв ТМ в зависимости от их функционального использования исследованы недостаточно. Поэтому целью данной работы является изучение многолетней (1989–2010 гг.) динамики загрязнения ТМ почв ВАО Москвы с оценкой их экологической опасности. Для этого решались следующие задачи:

- провести функциональное и эколого-географическое зонирование территории и выполнить мониторинговые геохимические исследования почвенного покрова округа;
- установить количественные параметры загрязнения городских почв ТМ, включая их средние содержания и вариабельность в разных функциональных зонах округа;
- составить почвенно-геохимические карты, отражающие современное состояние и многолетнюю динамику техногенных аномалий ТМ в почвах;
- рассчитать ежегодную скорость прироста основных элементов-концентраторов в почвах функциональных зон;
- оценить эколого-геохимическое состояние и степень экологической опасности загрязнения ТМ городских почв за разные сроки наблюдений.

Работы выполнены по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

Объекты и методы

Изучалась южная, наиболее загрязненная часть ВАО Москвы, на территории которой в 1989, 2005 и 2010 гг. были проведены три геохимические съемки с поверхностным (0–15 см) опробованием почв.

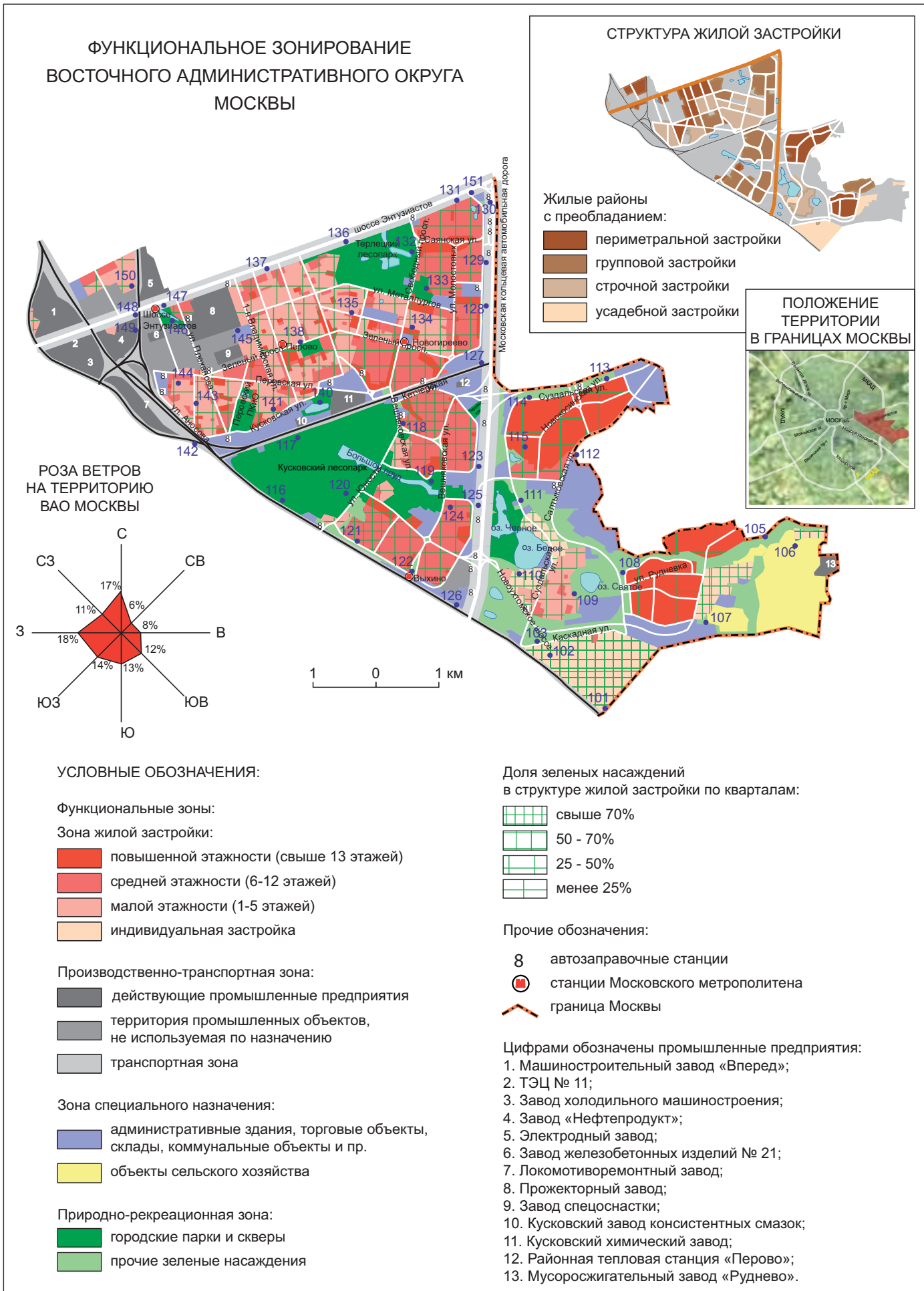


Рис. 1. Карта функциональных зон с точками опробования почв на территории ВАО Москвы в 2010 г.



Исследуемый район относится к южно-таежным ландшафтам Подмосковной Мещеры и представляет собой плоскую задровую равнину, сложенную песками и супесями. В качестве фоновых эталонов изучались дерново-подзолистые легкосуглинистые почвы Мещерской равнины, расположенные в автономных ландшафтах в 45–55 км к востоку от города.

Почвенный покров округа довольно сильно изменен под воздействием урбанизации и техногенеза. Природные (зональные) дерново-подзолистые, подзолисто-болотные и болотные почвы сохранились преимущественно в периферийной части округа, а также на отдельных участках крупных лесопарков и парков. На большей части территории развиты специфические антропогенно-преобразованные почвы: урбодерново-подзолистые, урбаноземы, индустроземы, экраноземы, а также техноземы — искусственно созданные почвы [6], развитые на культурном слое, насыпных, переотложенных и перемешанных грунтах и только в редких случаях — на естественных почвообразующих породах. Местами почвенный покров целиком отсутствует и заменен насыпным грунтом различной мощности с включением большого количества скелетного материала антропогенного происхождения. Значительные площади почвенного покрова в округе закрыты асфальтобетоном или находятся под жилыми или промышленными постройками.

Антропогенный педогенез наряду с морфологическими изменениями почв привел к трансформации их физико-химических свойств [13]. По своим основным показателям городские почвы уже не соответствуют своим зональным дерново-подзолистым аналогам легкого гранулометрического состава, развитым на водно-ледниковых отложениях. В них доминируют антропогенные свойства и процессы (подщелачивание, рост содержания органических веществ и элементов питания, емкости катионного обмена, изменение состава поглощенных катионов, появление засоления, солонцеватости и др.), приводящие к потере их основных экологических функций и способствующие деградации зонального почвообразовательного процесса.

Почвенно-геохимические исследования на территории округа проводились по общепринятой методике [10, 11]. На территорию округа была составлена карта функционального зонирования масштаба 1:25 000 (рис. 1), на которой выделены следующие функциональные зоны: автомагистрали и промзоны, внутриквартальные улицы, рекреационная зона, новостройки, старые жилые кварталы, агроландшафты. В 2010 г. на основе анализа космических снимков высокого разрешения проведена корректировка контуров ряда функциональных зон [27], в результате которой промзона (Р) была отделена от транспортной (А) зоны, а жилая застройка разделена в зависимости от преобладающей высоты зданий на усадьбную (L, 1–2-этажные коттеджи), средней этажности (М, 3–9 этажей) и повышенной этажности (Н, 10 и более этажей). Усадьбная застройка соответствует старым жилым кварталам частной застройки в пос. Новоухтомский, Косино, Рудневка. Зона повышенной этажности также расположена за МКАД в микрорайонах Новокосино и Кожухово, застройка средней этажности характерна для жилой зоны в пределах МКАД.

В фоновых и городских почвах определялись валовые содержания девяти ТМ (Zn, Cd, Cu, Pb, Ni, Co, Cr, Cd и Cs) методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе «Хитачи 180-70» в лаборатории географического факультета МГУ. Образцы 2010 г. анализировались масс-спектральным и атомно-эмиссионными методами с индуктивно-связанной плазмой (ICP) во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья на масс-спектрометре Elan-6100 (Perkin Elmer, США) и атомно-эмиссионном спектрометре Optima-4300 (Perkin Elmer, США). Всего за разные годы было проанализировано 165 проб почв.

Аналитические данные были сгруппированы по функциональным зонам и статистически обработаны в программных пакетах Microsoft Excel и Statistica 7.0. Вычислялись выборочные средние, стандартные отклонения, коэффициенты вариации и амплитуды колебаний. Значимость различий средних оценивалась по *t*-критерию Стьюдента ($P = 95\%$), однородность дисперсий — с помощью *F*-статистики. На основе средних значений ТМ рассчитывались коэффициенты концентрации и рассеяния, позволяющие оценить накопление или рассеяние химических элементов на территории города по сравнению с глобальным (КК/КР, где КК и КР — соответственно кларки концентрации и рассеяния (относительно литосферы) и региональным фоном (Кс/Кр, где Кс и Кр — соответственно коэффициенты техногенного накопления и рассеяния (относительно фоновых почв) [4, 5]. Серия моно- и полиэлементных карт распределения ТМ в почвах была построена в форме изоконцентраата с помощью пакета ArcGIS 9.3 методом Spline T.C. Хайбрахмановым.

Экологическая опасность загрязнения почв ТМ оценивалась по геохимическим и санитарно-гигиеническим критериям. При оценке общего уровня загрязнения почв рассматриваемыми ТМ использовались градации суммарного показателя загрязнения Z_c , а при санитарно-гигиенической оценке — нормативы ориентировочно допустимых концентраций элементов, принятые в России [16]. Показатель Z_c рассчитывался как $\sum Kc - (n - 1)$, где n — число накапливающихся металлов с $Kc > 1$. Установленные градации Z_c соответствуют различным уровням загрязнения почв/экологической опасности: низкий/неопасный ($0 < Z_c < 16$); средний/умеренно опасный ($16 < Z_c < 32$); высокий/опасный ($32 < Z_c < 64$), очень высокий/очень опасный ($64 < Z_c < 128$), максимальный/чрезвычайно опасный ($Z_c > 128$) [5].

Результаты и их обсуждение

Накопление ТМ в фоновых и городских почвах.

Статистические показатели валового содержания ТМ в поверхностном горизонте фоновых и городских почв за три срока наблюдений приводятся в табл. 1. Из приводимых данных видно, что в фоновых почвах Мещерской равнины среднее содержание всех рассматриваемых ТМ, кроме Cd и Cs, ниже их кларков в литосфере. По интенсивности рассеяния ТМ образуют следующий ряд (верхние индексы — Кр): $Ni^{3,8}Co^{2,7}Cr^{2,6}Zn^{2,2}Pb^{1,8}Mn^{1,7}Cu^{1,7}$. Превышение содержания Cd над его кларком составляет 2,6, Cs — 1,5 раза, что может быть связано с атмосферным влия-

нием города. Низкие значения концентраций рассматриваемых металлов в почвах объясняются их незначительным содержанием в почвообразующих породах — водно-ледниковых песках [1] и малой величиной выпадений из атмосферы. Фоновые почвы характеризуются достаточно высокой однородностью содержания ТМ: коэффициент вариации C_v в их поверхностном горизонте изменяется в пределах 6,1–19,1%.

Городские почвы по данным разных лет опробования сильно отличаются от фоновых почв уровнем содержания ТМ (табл. 1). В 1989 году в них аккумуляровалась группа из четырех элементов, которые по величине их коэффициентов накопления Кс образуют следующий ряд: $Pb_{4,4}Zn_{3,7}Cu_{1,7}Cd_{1,4}$. Остальные металлы рассеивались с интенсивностью, которая определялась величиной их коэффициента Кр: $Co^{2,3}Mn^{1,4}Cr^{1,3}Cs^{1,2}Ni^{1,1}$. Содержание ТМ в городских почвах было очень неоднородно, коэффициенты вариации C_v содержания отдельных ТМ изменялись в пределах 41–102%.

В 2005 г., через 16 лет от начала наблюдений, прослеживается рост содержания металлов-концентра-

ров при сохранении их последовательности: $Pb_{9,9} - Zn_{4,9} - Cu_{2,6} - Cd_{1,8}$. Среднее содержание двух ведущих поллютантов — Pb и Zn — за этот период выросло соответственно в 2,2 и 1,3 раза. Содержание Cr, Cs и Ni приблизилось к их кларкам, пониженные концентрации относительно фона имели только Co и Mn ($K_p = 1,6$ и $1,2$). Как и в 1989 г., все рассматриваемые ТМ сохранили высокую вариабельность содержаний в почвах ($C_v = 32-92\%$).

В 2010 г., через 21 год от начала исследований, произошел дальнейший рост уровня загрязнения почв ТМ, а группа накапливающихся металлов увеличилась до семи элементов. Согласно значениям Кс они образуют следующий ряд: $Pb_{6,8}Zn_{5,0}Cd_{4,7}Cr_{3,1}Cu_{2,3}Ni_{2,0}Co_{1,3}$. Только Mn и Cs имеют содержание в почвах ниже кларка ($K_p = 1,2$ и $2,8$ соответственно). При этом содержание лидирующего элемента-концентрактора Pb уменьшилось по сравнению с 2005 г. в 1,4 раза, что можно объяснить переходом легкового автотранспорта на более качественное топливо и закрытием наиболее «грязных» промышленных предприятий на территории округа. Интенсивный рост содержания Cd связан с внесением в городские почвы большого количества

Таблица 1

Содержание ТМ (мг/кг) в поверхностном (0–15 см) горизонте фоновых дерново-подзолистых легкосуглинистых почв Мещерской равнины и городских почв ВАО Москвы по данным разных лет наблюдений									
Статистические показатели	Pb	Zn	Cu	Cd	Co	Cr	Ni	Mn	Cs
Кларки литосферы [4]	16	83	47	0,13	18	83	58	1000	3,7
ОДК [16]	130	220	132	2,0	–	–	80	1500	–
Фоновые почвы Ногинского района Московской обл. (n = 10)									
Среднее ± ошибка среднего	9,04±0,55	37,5±0,7	27,9±0,8	0,34±0,02	6,60±0,25	32,0±0,7	15,2±0,3	585±14,7	5,40±0,22
min–max	6,4–11	33,5–41,2	24,4–32,4	0,26–0,43	5,15–7,72	29,4–36,2	13,5–16,7	534–683	4,42–6,24
C_v , (%*)	19,1	6,14	9,1	17,3	11,8	7,0	6,22	7,96	12,7
КК/Кр**)	–/1,77	–/2,21	–/1,68	2,62/–	–/2,73	–/2,59	–/3,82	–/1,71	1,46/–
Городские почвы, 1989 г. (n = 49)									
Среднее±ошибка	39,8±4,4	138±11	48,2±6,1	0,48±0,07	2,82±0,17	24,6±3,0	13,6±1,0	410±24	4,47±0,29
min–max	10,1–147	44,2–398	7,6–214	0,029–2,69	1,27–6,14	2,53–110	5,22–29,3	95–906	1,14–10,9
C_v , %	78,0	58,9	89,1	102	43,0	84,5	48,6	40,7	45,5
Кс/Кр***)	4,40/–	3,68/–	1,73/–	1,41/–	–/2,34	–/1,30	–/1,12	–/1,43	–/1,21
Городские почвы, 2005 г. (n = 52)									
Среднее±ошибка	89,1±11,4	183±13,4	73,5±6,7	0,63±0,08	4,07±0,21	34,8±2,9	19,4±1,0	481±21	6,19±0,38
min–max	15,9–382,2	48,1–456	12,9–242	0,061–3,71	1,59–7,27	3,25–121	6,67–34,8	202–1014	2,16–14,2
C_v , %	92,0	52,6	66,2	90,8	36,7	60,1	37,0	31,8	44,1
Кс/Кр	9,86/–	4,88/–	2,64/–	1,85/–	–/1,62	1,09/–	1,28/–	–/1,22	1,15/–
Городские почвы, 2010 г. (n = 52)									
Среднее±ошибка мг/кг	61,8±6,2	189±18	63,0±5,9	1,61±0,30	8,56±0,19	100±10	30,6±1,8	500±20	1,90±0,06
min–max	13–250	46–690	15–220	0,3–14,0	5,5–13,0	40–450	15–89	200–800	0,8–2,8
C_v , %	72,4	67,5	67,6	136,3	16,0	70,2	42,3	27,2	22,9
Кс/Кр	6,84/–	5,04/–	2,26/–	4,74/–	1,30/–	3,14/–	2,01/–	–/1,17	–/2,84

* C_v — коэффициент вариации, %.
 ** КК/Кр — кларки концентрации/рассеяния (относительно литосферы); КК выделены жирным шрифтом.
 *** Кс/Кр — коэффициенты техногенного накопления/рассеяния (относительно фоновых почв); Кс выделены жирным шрифтом.



минеральных, органических удобрений и осадков сточных вод, содержащих Cd в качестве примеси [17]. Концентрации остальных металлов выросли незначительно или остались на прежнем уровне. Неоднородность содержания ТМ в почвах сохранилась на уровне 2005 г. или даже несколько увеличилась (значения Cv изменяются в пределах 16–136%).

Содержание металлов в почвах разных функциональных зон. Коэффициенты накопления Кс рассматриваемых металлов в почвах округа, сгруппированные по функциональным зонам, приведены на рис. 2 в виде геохимических спектров за разные сроки наблюдений. Элементы в спектрах располагаются по убыванию значений Кс в транспортной и промзонах (AP).

В 1989 г. значения Кс элементов были сравнительно невысокими, Pb и Zn накапливались в почвах практически всех функциональных зон, но особенно в старых жилых кварталах (Кс = 8,0 и 3,7 соответственно), крупных автомагистралях (6,7 и 6,0) и агроландшафтах (5,0 и 2,6). Третий приоритетный загрязнитель — Cu — сильнее всего накапливался в промышленно-

транспортной зоне (2,9). Низкое содержание ТМ имели почвы рекреационной зоны и новых жилых кварталов, и среди них наибольшим рассеянием по сравнению с фоном отличались Cr (Кр = 3,5 и 2,0) и Co (2,7 и 4,1 соответственно). Максимальной пространственной изменчивостью обладали Cd, Cr и Cu; коэффициенты вариации Cv их содержания в почвах старых жилых кварталов и агроландшафтов достигали 94–138%.

В 2005 г. общая картина распределения ТМ в почвах отдельных зон сохранилась, но существенно возросли уровни содержания лидирующих элементов-загрязнителей — Pb и Zn. По-прежнему наиболее высокими концентрациями отличались почвы автомагистралей и промзон (Кс = 19,2 и 8,1 соответственно), старых жилых кварталов (17,6 и 4,8) и агроландшафтов (9,4 и 3,3). Пониженное по сравнению с фоном содержание большинства ТМ (Co, Cr, Cd, Ni, Mn, Cs) наблюдалось в почвах рекреационной зоны и новых жилых кварталов (Кр = 3,6–1,1). Наибольшая пространственная изменчивость была свойственна Cd, Cr и Cu, хотя



Рис. 2. Геохимические спектры ТМ в поверхностном (0–15 см) горизонте почв разных функциональных зон ВАО Москвы в 1989, 2005 и 2010 гг. Обозначения функциональных зон даны на рис. 1

значения их коэффициентов вариации C_v по сравнению с 1989 г. заметно снизились.

В 2010 г. значения K_c ряда ТМ повысились, а число накапливающихся металлов увеличилось до семи, хотя различия в геохимических спектрах почв отдельных функциональных зон несколько сгладились. Содержание Cd, Ni, Cr, Co и Mn по сравнению с 2005 г. возросло практически во всех функциональных зонах, а Pb, Cu, Zn в транспортной, промышленной зонах, усадебной застройке и агроландшафтах (кроме Zn) понизилось. Содержание Pb в этих зонах уменьшилось в 2,3–2,5 раза, что, по-видимому, связано с улучшением качества автомобильного топлива и изменением структуры автопарка.

Резко увеличилось содержание Cd, особенно в почвах рекреационной зоны и агроландшафтов, что объясняется использованием больших доз осадков сточных вод и фосфорных удобрений. По сравнению с предыдущим периодом пространственная вариабельность концентраций ТМ значительно усилилась, особенно в зонах рекреаций, жилой застройки средней и низкой этажности — до 109–218%.

Многолетняя динамика среднего содержания (мг/кг) лидирующих элементов-концентраторов в почвах различных функциональных зон показана на рис. 3. Максимальное загрязнение Pb наблюдалось в 2005 г. в почвах крупных автомагистралей и промзон (174 мг/кг), а также усадебной застройки (159).

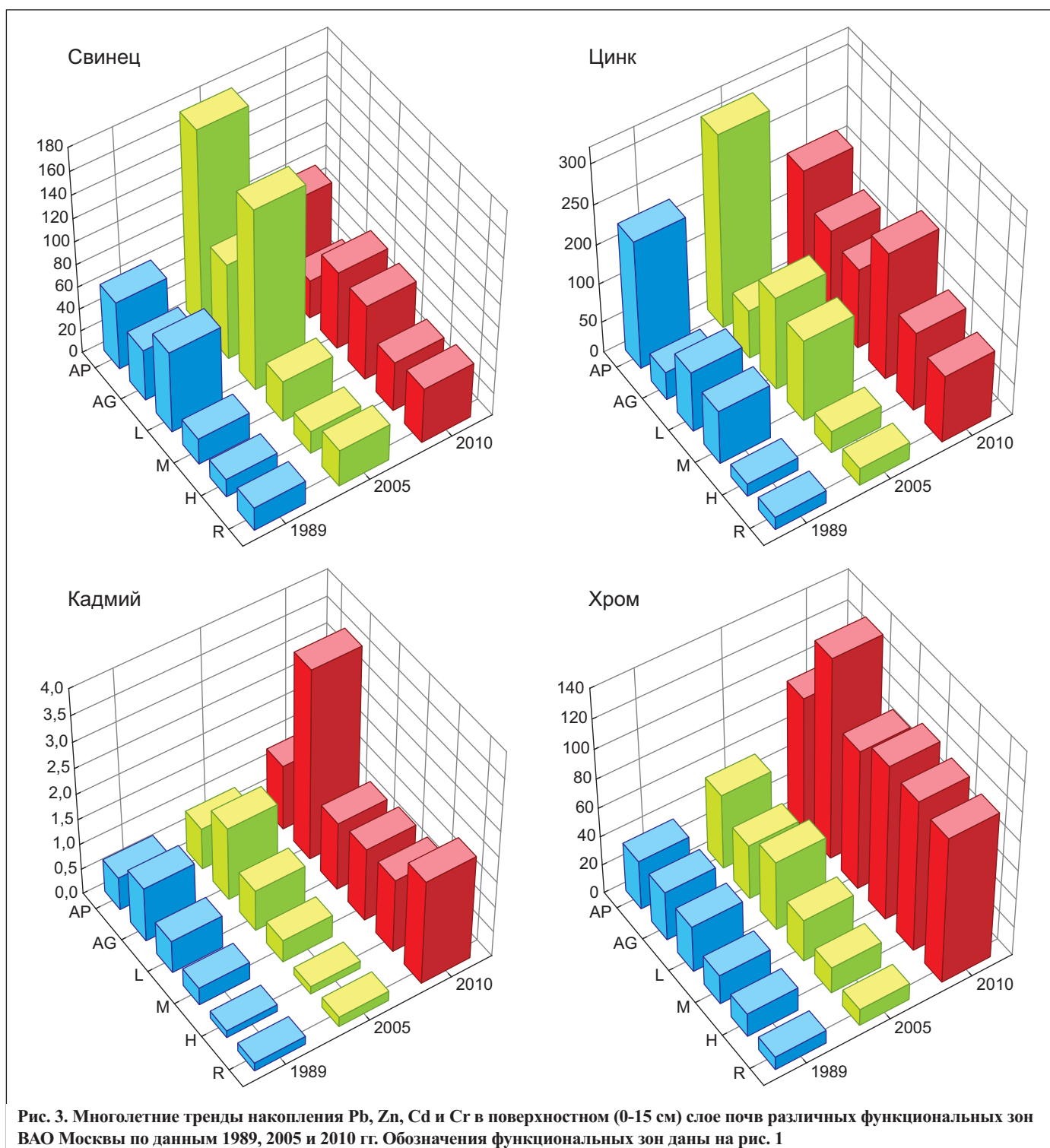


Рис. 3. Многолетние тренды накопления Pb, Zn, Cd и Cr в поверхностном (0–15 см) слое почв различных функциональных зон ВАО Москвы по данным 1989, 2005 и 2010 гг. Обозначения функциональных зон даны на рис. 1

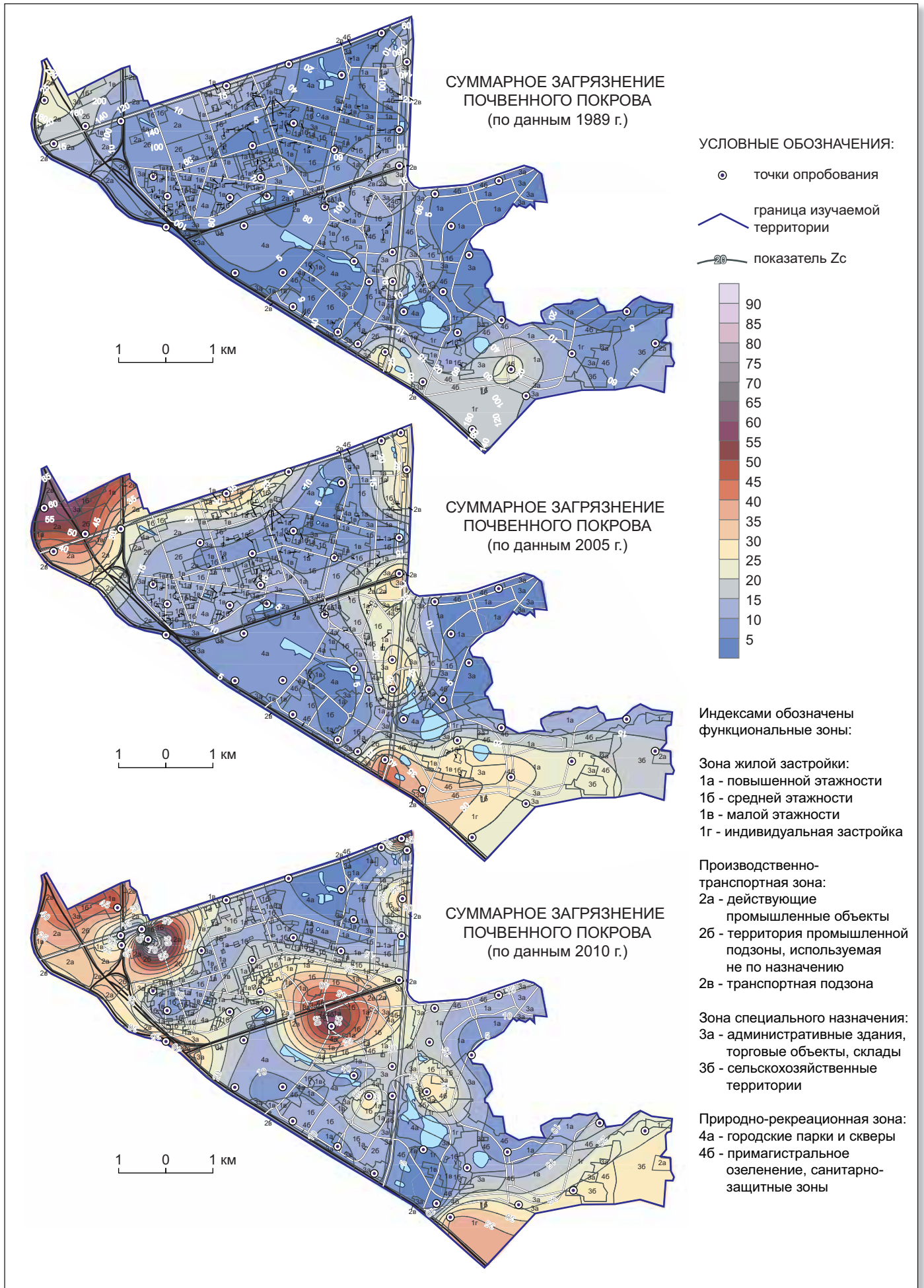


Рис. 4. Суммарные техногенные аномалии ТМ (Zc) в почвенном покрове ВАО Москвы в 1989, 2005 и 2010 гг.

Таблица 2

Средняя многолетняя скорость прироста/снижения содержания ТМ в поверхностном слое почв ВАО Москвы										
Скорость прироста		Pb	Zn	Cu	Cd	Co	Cr	Ni	Mn	Cs
1989–2005 гг.	мг/кг в год	3,08	2,81	1,58	0,01	0,08	0,64	0,36	4,40	0,11
	% в год	0,075	0,027	0,041	0,028	0,036	0,034	0,034	0,015	0,032
2005–2010 гг.	мг/кг в год	–5,44	1,18	–2,10	0,20	0,90	13,12	2,24	3,84	–0,86
	% в год	–0,36	0,032	–0,15	0,89	0,71	0,97	0,45	0,039	–1,06

В многоэтажной жилой и рекреационной зонах Pb было мало. В 1989 и 2005 гг. Zn лидировал в почвах автомагистралей и промзон (224 и 305 соответственно), а к 2010 г. его содержание резко возросло и в других зонах, особенно в почвах жилых кварталов низкой и средней этажности (163 и 223) и агроландшафтов (173). Выявлена тенденция роста содержания Cd от 1989 к 2010 г. при сохранении характера его распределения между зонами. Особенно интенсивно Cd накапливается в агроландшафтах (3,70) и рекреациях (2,05). Динамика накопления Cr в почвах отличается незначительным приростом в 1989–2005 гг. и резким увеличением его содержания к 2010 г., особенно в агроландшафтах (137 мг/кг), при слабой дифференциации других функциональных зон.

Пространственная структура и многолетняя динамика техногенных аномалий ТМ в городских почвах. Пространственную структуру загрязнения почв на территории округа отражают моно- и полиэлементные карты техногенных аномалий ТМ, составленные по данным 1989, 2005 и 2010 гг.

На основе показателя Zc проведено картографирование суммарного загрязнения почв ТМ (рис. 4). В 1989 г. территория характеризовалась низким уровнем суммарного загрязнения ($Zc < 16$), что обусловлено относительно слабым промышленным и транспортным воздействием на городские почвы. На этом фоне отдельными небольшими пятнами выделяются мало-контрастные техногенные аномалии ТМ с умеренно опасным уровнем загрязнения, расположенные в северо-западной, юго-восточной и центральной частях округа. В эпицентрах этих аномалий значения показателя Zc не превышают 35–40.

В 2005 г. ранее выявленные техногенные аномалии ТМ в почвенном покрове округа значительно увеличили свои размеры и контрастность, уровень загрязнения почв вырос за 16-летний период в 1,7 раза. Наиболее контрастная техногенная аномалия ТМ со значениями Zc 45–75 в ее центре сформировалась на северо-западе округа под влиянием выбросов крупной промышленной зоны «Соколиная Гора» и автомагистралей шоссе Энтузиастов. Несколько небольших аномалий вдоль МКАД, которые слабо проявлялись в 1989 г., к 2005 г. преобразовались в более крупные с максимальными величинами Zc 40–50. Юго-восточная аномалия ТМ в почвах также усилила свою контрастность до значений Zc 40–55. Таким образом, уровень загрязнения в аномалиях сменился со среднего на высокий, а степень экологической опасности — с умеренно опасной на опасную.

В 2010 г. произошло дальнейшее увеличение размеров и интенсивности загрязнения техногенных аномалий ТМ. Так, северо-западная аномалия ТМ с суммарным показателем загрязнения почв Zc 45–70 вышла за пределы промзоны «Соколиная Гора» и охватила участки жилых кварталов южнее шоссе Энтузиастов. В центре округа сформировалась крупная аномалия с максимумом Zc 55, связанная с воздействием промзоны «Перово» и РТС «Перовская». В юго-восточной части округа техногенная аномалия ТМ расширилась на восток с увеличением суммарного уровня загрязнения почв Zc до 35. Своим происхождением она обязана влиянию выбросов недавно построенного мусоросжигательного завода вблизи пос. Руднево.

Многолетний тренд прироста содержания приоритетных ТМ в почвах функциональных зон. Тенденции накопления ТМ в почвах оценивались для двух периодов: 1989–2005 и 2005–2010 гг. путем расчета средних скоростей ежегодного прироста содержания ТМ в поверхностном горизонте почв (табл. 2), которые достаточно сильно различаются в зависимости от вида использования территории (рис. 5).

В 1989–2005 гг. средняя скорость ежегодного прироста была сравнительно невелика (см. табл. 2). Максимальный абсолютный прирост имели Mn (4,4 мг/кг в год) > Pb (3,1) > Zn (2,8) > Cu (1,6) > Cr (0,64). При этом относительная скорость прироста была наибольшей у Pb, Co, Cu, Ni, Cr (0,07–0,03% в год) в почвах вблизи крупных автомагистралей и промзон, старых жилых кварталов и агроландшафтов (см. рис. 5).

В 2005–2010 гг. темпы накопления ТМ в почвах возросли (см. табл. 2) и стали сильнее различаться по функциональным зонам (см. рис. 5). В зависимости от средней величины ежегодного прироста ТМ образуют ряд: Cr (13,1 мг/кг в год) > Mn (3,8) > Ni (2,2) > Zn (1,2) > Co (0,9). Относительная скорость прироста была максимальной у Cr, Cd, Co, Ni (до 0,5–1,0%), по сравнению с предшествующим периодом она выросла в десятки раз (см. табл. 2). Содержание Pb, Cs и Cu существенно уменьшилось, о чем свидетельствуют отрицательные значения скорости прироста (см. табл. 2). Неравномерность темпов накопления ТМ на территории округа хорошо прослеживается на рис. 5. Если Cr и Cd обнаруживают повсеместный рост содержания, особенно значительный в слабозагрязненных зонах (рекреационной, сельскохозяйственной, новых жилых кварталах), то Pb и Cu в почвах промзон и автомагистралей, агроландшафтов и старых жилых кварталов рассеиваются, т.е. происходит их самоочищение от ТМ.



Таблица 3

Многолетняя динамика суммарного загрязнения ТМ почв ВАО Москвы в зависимости от вида их использования								
Год наблюдений	Средние величины суммарного показателя загрязнения Z_c в почвах функциональных зон							
	Автомобильные магистрали	Промзоны	Жилая застройка средней этажности	Жилая застройка повышенной этажности	Рекреационная зона	Усадебная застройка	Агрорландшафты	В целом по округу
1989 г.	15,6		6,3	2,9	3,5	13,2	10,4	9,02
2005 г.	33,4		10,3	3,7	5,0	25,5	17,2	17,3
2010 г.	17,9	28,3	20,4	15,4	17,9	18,6	22,9	19,4

Оценка эколого-геохимического состояния почв. Анализ усредненного по зонам суммарного показателя загрязнения Z_c (табл. 3) показал, что в 1989 г. большая часть изучаемой территории характеризовалась низким уровнем загрязнения ТМ, при этом средняя величина Z_c составила всего 9,0, что свидетельствует о неопасном экологическом состоянии почв. Только в 10 из 49 точек опробования (то есть 20,4%) значения Z_c превышали этот уровень, причем основная их часть находилась на территории промзон и вблизи автомагистралей.

В 2005 г. доля точек со значениями $Z_c < 16$ становится значительно меньше (31 из 52, т.е. 59,6%). Помимо этого 14 точек (26,9%) переходят на умеренно опасный и 7 точек (13,5%) — на опасный уровень загрязнения. Среднее значение Z_c по округу составило 17,3, что соответствует умеренно опасному уровню загрязнения почв ТМ. С низким уровнем загрязнения почв остались только три функциональные зоны — жи-

лая застройка средней и повышенной этажности и рекреационная (см. табл. 3). Почвы под усадебной застройкой и агрорландшафтов в 2005 г. имели умеренно опасный, а автомагистралей и промзон — опасный уровень загрязнения ТМ.

В 2010 г. средняя по округу величина Z_c выросла до 19,4. На фоне снижения уровня загрязнения почв в транспортной, промышленной зонах и под усадебной застройкой, в рекреационной, сельскохозяйственной и многоэтажной жилой зонах наблюдался значительный рост загрязнения ТМ. При этом лишь в жилых кварталах повышенной этажности уровень загрязнения почв соответствует категории неопасного, остальные зоны загрязнены в умеренно опасной степени (Z_c 17,9–28,3).

Экологическая опасность загрязнения почв ТМ. Оценка экологической опасности загрязнения почв ТМ показала, что в 1989 г. незначительное превышение ОДК Zn наблюдалось только в промышленно-транспортной зоне. В 2005 г. ОДК в почвах были

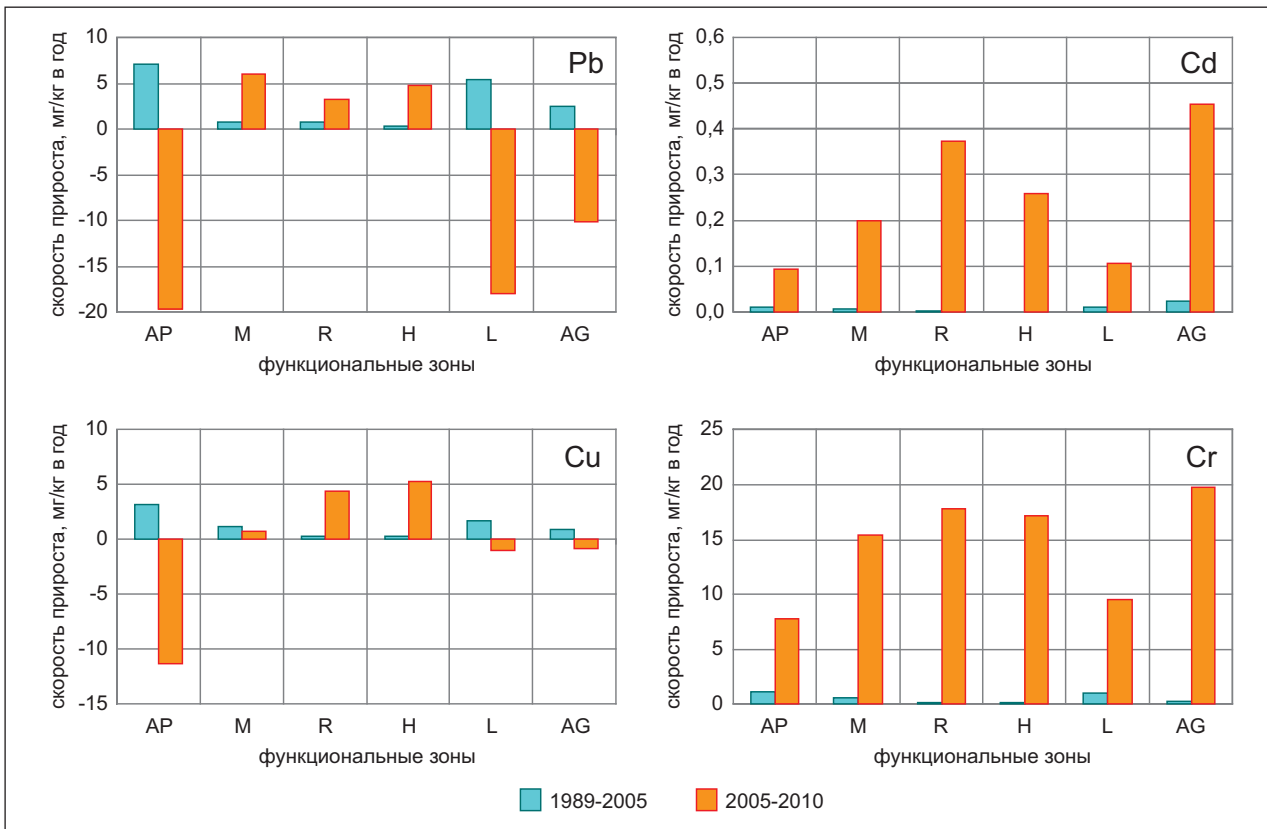


Рис. 5. Средняя скорость ежегодного прироста содержания Pb, Cd, Cu и Cr (мг/кг в год) в поверхностном слое почв разных функциональных зон ВАО Москвы за два периода наблюдений — 1989–2005 гг. и 2005–2010 гг. Обозначения функциональных зон даны на рис. 1



превышены по Pb — в зонах крупных автомагистралей и промзон, а также старых жилых кварталов (на 33,8 и 22,5% территории округа соответственно), а также по Zn и Cu — в транспортно-промышленной зоне (на 38,6 и 5%).

В 2010 г. наибольшая частота превышения ОДК (на 30,8% территории) выявлена у Zn, которым загрязнены почвы практически всех зон; лишь в агроландшафтах и рекреационной зоне средние значения содержания этого металла несколько ниже ОДК. Почти на 20% территории округа наблюдаются превышения ОДК по Cd, наиболее часто фиксируемые в почвах агроландшафтов и усадебной застройки. В небольшом числе случаев (< 8%) отмечено превышение ОДК в почвах по Pb, Cu и Ni.

Для оценки экологического статуса Москвы среди городов мира, обусловленного уровнем накопления ТМ в почвах, проведено сравнение среднего содержания четырех наиболее часто определяемых ТМ (Cr, Ni, Pb и Zn) в почвах крупных городов и столиц ряда стран с их кларками в почвах ВАО Москвы. Почвы крупных городов мира характеризуются достаточно высокими и сопоставимыми с Москвой средними концентрациями ТМ (табл. 4). Наибольшее среднее содержание в городских почвах имеют два элемента — Pb и Zn. Интенсивнее всего накапливают Pb почвы Лондона, Неаполя, Палермо и Гамбурга, а Zn — Гамбурга, Неаполя, Берлина и Мадрида. Содержание Cr и Ni снижено по сравнению с кларком литосферы, их минимальные значения установлены в почвах Мадрида, Берлина, Палермо и Стокгольма. По данным 2010 г. почвы ВАО Москвы среди рассматриваемых городов не выделяются высоким уровнем накопления ТМ. Среднее содержание Pb в почвах округа близко к его значениям в почвах Белграда, а Zn — в почвах Стокгольма и Лондона. Те же уровни содержания Cr, что и в почве ВАО, зафиксированы в Палермо и Гамбурге, а Ni — в Севилье и Палермо.

Выводы

1. В почвах ВАО происходит постепенный рост уровня загрязнения рядом ТМ. Среди них лидируют Pb и Zn с коэффициентами накопления $K_c = 3,7-9,9$. В 2010 г. к ним присоединился Cd ($K_c = 4,7$), интенсивный рост содержания которого связан с внесением в городские почвы большого количества минеральных, органических удобрений и осадков сточных вод, содержащих Cd в качестве примеси. Отмечено снижение содержания Pb и Cu в почвах округа за последние пять лет, которое объясняется переходом автотранспорта на более качественный бензин, а также пере-

профилированием и закрытием ряда вредных промышленных производств.

2. В 1989–2005 гг. ежегодный прирост содержания ТМ в почвах ВАО был сравнительно небольшим. При этом абсолютная и относительная скорость прироста была максимальной у Pb и Cu. Наибольшие темпы накопления этих поллютантов выявлены в почвах крупных автомагистралей и промзон, старых жилых кварталов и агроландшафтов. В 2005–2010 гг. темпы ежегодного прироста содержания ТМ в почвах были более высокими, сильнее различаясь по функциональным зонам. Относительная скорость прироста была максимальной у Cr, Cd, Co и Ni (1,0–0,45% в год). Особенно значительный рост содержания Cr и Cd обнаружен в почвах рекреационной, сельскохозяйственной зон и жилых кварталов повышенной этажности, тогда как в почвах промзон и автомагистралей, агроландшафтов и усадебной застройки наблюдалось снижение содержания Pb и Cu.

3. Почвы различных функциональных зон характеризуются неодинаковым уровнем и составом загрязнения ТМ. Максимально высокие содержания и наиболее широкий спектр элементов-загрязнителей выявлены в почвах промзон и крупных автомагистралей, усадебной застройки и агроландшафтов. По данным 2010 г. почвы большей части территории округа имеют умеренно опасный суммарный уровень загрязнения ТМ с максимумом $Z_c = 28,3$ в промышленной зоне. Наиболее опасными приоритетными загрязнителями почв являются Zn и Cd; превышение их содержания над ОДК отмечено соответственно на 31 и 20% территории округа. Максимальное содержание Zn (690 мг/кг) зафиксировано в транспортной зоне, а Cd (14,0 мг/кг) — в рекреационной.

4. Пространственно-временное распределение ТМ в почвах характеризуют карты суммарного показателя загрязнения Z_c , составленные за отдельные годы 21-летнего периода наблюдений и позволяющие оценить стадии развития техногенных полиэлементных аномалий. За последние пять лет выявлена тенденция увеличения контрастности и площади аномалий ТМ в связи с ростом общего объема выбросов промышленности и автотранспорта. Полученные результаты многолетних наблюдений за загрязнением и ежегодным приростом ТМ в почвах округа могут служить надежным информационным обеспечением для принятия управленческих решений и разработки системы организационно-экономических мероприятий, направленных на снижение уровня загрязнения почв ТМ, улучшение качества среды обитания горожан и обеспечение их экологической безопасности. 📍

Таблица 4

Среднее содержание Pb, Zn, Cr и Ni в почвах (мг/кг) различных городов мира (составлено авторами по данным [31–38] и собственным данным 2010 г.)

ТМ	Стокгольм	Мадрид	Севилья	Берлин	Гамбург	Лондон	Гонконг	Палермо	Неаполь	Белград	Дананг	Москва, ВАО
Pb	101	161	161	119	218	294	93,4	253	262	55,5	3,6	61,8
Zn	171	210	107	243	516	183	168	151	251	118	142	189
Cr	34,0	74,7	42,8	35,0	95,4	Не опр.	Не опр.	39,0	74,0	32,1	92,2	100
Ni	12,8	14,1	23,5	10,7	62,5	Не опр.	Не опр.	19,1	Не опр.	68,0	22,6	30,6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авессаломова И.А.* Ландшафты Мещерской низменности // Ландшафтно-геохимические основы фонового мониторинга природной среды / под ред. М.А. Глазовской, Н.С. Касимова. М.: Наука, 1989. С. 79–90.
2. *Битюкова В.Р.* Социально-экологические проблемы развития городов России. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 448 с.
3. *Битюкова В.Р., Касимов Н.С., Власов Д.В.* Экологический портрет российских городов // Экология и промышленность России. 2011 г., апрель. С. 6–18.
4. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 237 с.
5. Геохимия окружающей среды / Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. М.: Недра, 1990. 335 с.
6. *Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В.* Антропогенные почвы (генезис, география, рекультивация) / под ред. Г.В. Добровольского. М.: Ойкумена, 2003. 266 с.
7. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов (Ландшафтно-геохимические процессы). М.: Географический факультет МГУ, 2007. 350 с.
8. *Ильин В.Б., Сысо А.И.* Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
9. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 436 с.
10. *Касимов Н.С.* Методология и методика ландшафтно-геохимического анализа городов // Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во МГУ, 1995. С. 6–39.
11. *Касимов Н.С., Никифорова Е.М.* Геохимия городов и городских ландшафтов // Экология города / под ред. А.С. Курбатовой и др. М.: Научный мир, 2004. С. 234–268.
12. *Касимов Н.С., Геннадиев А.Н.* Геохимия ландшафтов и география почв: основные концепции и подходы // Вестник МГУ. Сер. 5. География. № 2. 2005. С. 10–17.
13. *Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М.* Антропогенная трансформация физико-химических свойств городских почв и ее влияние на накопление свинца // Современные проблемы загрязнения почв: Мат-лы II Междунар. науч. конф. М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 123–127.
14. *Ладонина Н.Н., Ладонин Д.В., Наумов Е.М., Большаков В.А.* Загрязнение тяжелыми металлами почв Юго-Восточного округа г. Москвы // Почвоведение. 1999. № 7. С. 885–894.
15. *Москаленко Н.Н., Смирнова Р.С.* Геохимическая оценка загрязнения окружающей среды Ленинского района Москвы // Экология и охрана природы Москвы и Московского региона / под ред. В.А. Садовниченко, С.А. Ушакова. М.: Изд-во МГУ, 1990. 237 с.
16. *Мотузова Г.В., Безуглова О.С.* Экологический мониторинг почв. М.: Академический Проект; Гаудеамус, 2007. 237 с.
17. *Никифорова Е.М.* Эколого-геохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами агроландшафтов Восточного Подмосковья (в связи с внесением осадков сточных вод) // Геохимия ландшафтов и география почв / под ред. Н.С. Касимова и М.И. Герасимовой. Смоленск: Ойкумена, 2002. С. 185–210.
18. *Никифорова Е.М., Лазукова Г.Г.* Геохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почв и растений городских экосистем Перовского района Москвы // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1991. № 3. С. 44–53.
19. *Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е.* Динамика загрязнения городских почв свинцом (на примере Восточного округа Москвы) // Почвоведение. 2007. № 8. С. 984–997.
20. *Никифорова Е.М., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Новикова О.В.* Пространственно-временные тренды загрязнения городских почв и растений соединениями свинца (на примере Восточного округа Москвы) // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 1. С. 11–20.
21. *Обухов А.И., Плеханова И.О., Кутукова Ю.Д. и др.* Тяжелые металлы в почвах и растениях Москвы // Экологические исследования в Москве и Московской области. М., 1990. С. 148–162.
22. Оценка геохимического загрязнения Национального парка «Лосиный остров» / Ю.Н. Николаев, Т.В. Шестакова, В.В. Нефедьев и др. М.: Прима-Пресс, 2000. 111 с.
23. Почва, город, экология / под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд за экологическую грамотность, 1997. 320 с.
24. *Радзевич Н.Н.* Охрана среды и здоровье москвичей // Экология и жизнь. 1999. № 1. С. 53–57.
25. *Самаев С.Б., Соколов Л.С., Пантелеев А.С.* Загрязнение почвы под воздействием автомобильного транспорта в Москве // Автотранспортный комплекс и экологическая безопасность. М., 1999. С. 266–270.
26. *Соколов Л.С., Астрахан Е.Д.* Загрязнение территории Москвы металлами // Природа. 1993. № 7. С. 68–73.
27. *Хайбрахманов Т.С.* Использование космических снимков для экологического мониторинга городской территории // Экологические проблемы промышленных городов: сб. науч. трудов. Ч. 1. Саратов: СГТУ, 2011. С. 161–163.
28. Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 327 с.
29. Экология города / Курбатова А.С., Башкин В.Н., Касимов Н.С., Никифорова Е.М. и др. М.: Научный мир, 2004. 620 с.
30. *Якубов Х.Г.* Экологический мониторинг зеленых насаждений в Москве. М.: ООО «Стагирит-Н», 2005. 264 с.
31. *Birke M., Rauch U.* Urban geochemistry in the Berlin Metropolitan Area // Environmental Geochemistry and Health. 2000. V. 22. P. 233–248.
32. *Crnkovic D., Ristic M., Antonovic D.* Distribution of heavy metals and Arsenic in soils of Belgrade (Serbia and Montenegro) // Soil & Sediment Contamination. 2006. V. 15. P. 581–589.
33. *Imperato M., Adamo P., Naimo D., Arenzo M., Stanzione D., Violante P.* Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) // Environmental Pollution. 2003. V. 124. P. 247–256.
34. *Linde M., Bengtsson H., Oborn I.* Concentrations and pools of heavy metals in urban soils in Stockholm, Sweden // Water, Air and Soil Pollution: Focus 1, 2001. P. 83–101.
35. *Madrid L., Diaz-Barrientos E., Ruiz-Cortes E. et al.* Variability in concentrations of potentially toxic elements in urban parks from six European cities // Journal of Environmental Monitoring. 2006. V. 8. P. 1158–1165.
36. *Thuy H.T.T., Tobschall H.J., An P.V.* Distribution of heavy metals in urban soils — a case study of Danang-Hoian Area (Vietnam) // Environmental Geology. 2000, april. V. 39(6). P. 603–610.
37. *Tume P., Bech J., Sepulveda B., Tume L., Bech J.* Concentrations of heavy metals in urban soils of Talcahuano (Chile): a preliminary study // Environ. Monitoring and Assessment. 2008. V. 140. P. 91–98.
38. *Li X.D., Poon C.S., Pui S.L.* Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong // Applied Geochemistry. 2001. V. 16. P. 1361–1368.