



DOI 10.22363/2313-2310-2018-26-2-207-236

УДК 504.064.2

Пространственно-временные тренды и факторы загрязнения почвенного покрова Москвы

Н.Е. Кошелева, А.Г. Цыхман

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, 1

Проанализированы распределение и факторы аккумуляции тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) и бенз(а)пирена (БаП) в почвах 9 административных округов (АО) Москвы по данным наблюдений ГПБУ «Мосэкомониторинг» в более чем 2200 точках за 2007–2016 гг. Определены основные физико-химические свойства (рН, содержание органического вещества и гранулометрический состав), валовое содержание Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, Hg, As и БаП в почвенных пробах, проведено функциональное зонирование мест опробования, составлены моноэлементные геохимические карты. Установлено двукратное увеличение содержания Cu, Cd, As в ЦАО и Cd в ЗАО и СЗАО, а также As в САО, СВАО и ВАО за 10-летний период; во всех АО выявлена тенденция к снижению загрязнения почв Zn, Pb и Hg. Концентрация БаП почти во всех округах уменьшилась в 4–8 раз. Определены антропогенные и почвенно-геохимические факторы накопления и рассеяния поллютантов с помощью метода регрессионных деревьев. Наиболее значимый фактор — пространственный, так как количество и геохимическая специализация источников загрязнения сильно различаются в разных АО города. Пространственная неоднородность техногенных выпадений на территорию города усиливается под влиянием физико-химических свойств почв: рост рН приводит к увеличению содержания Cu, Zn, Pb, Hg; $C_{орг}$ — Cd, As; изменения в гранулометрическом составе сказываются на содержании Zn, Ni, Cd, As и БаП. Сравнение концентраций изучаемых элементов с их ПДК/ОДК показало, что в 2007 г. наиболее загрязненными были промзоны в СВАО, ВАО, ЮВАО и САО, селитебные зоны ЦАО, ВАО, ЮВАО, ЗАО, транспортные — в ЦАО и ВАО, рекреационные — в ЦАО, САО и ВАО. К 2016 г. превышения нормативов в городских почвах стали фиксироваться значительно реже.

Ключевые слова: загрязнение почв, тяжелые металлы и металлоиды, бенз(а)пирен, городские ландшафты, функциональное зонирование, Москва, физико-химические свойства, регрессионный анализ, ПДК, ОДК

Введение

Одной из глобальных тенденций развития общества является урбанизация с увеличением роли мегагородов, которые представляют собой центры интенсивного импактного загрязнения среды в результате концентрации на небольших площадях населения, транспорта и промышленного производства. На территориях городов формируются специфические городские ландшафты, сочетающие в себе природные и антропогенные компоненты, в которых возникают искусственные геохимические потоки и обширные аномалии загрязняющих веществ [1].

Среди крупных индустриальных городов России Москва является одним из самых загрязненных, поэтому здесь постоянно ведутся исследования состояния почвенного покрова и других компонентов ландшафта [1–8]. Наблюдения за экологическим состоянием почв Москвы и содержанием в них тяжелых металлов и металлоидов велись в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких металлов (ИМГРЭ) под руководством Ю.Е. Саета [2; 9]. С 2007 г. ежегодный мониторинг почв проводится ГПБУ «Мосэкомониторинг» при Департаменте природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы [9], выпускаются ежегодные доклады о состоянии окружающей среды в Москве, содержащие главу «Городские почвы и земли» [10].

Цель данной работы — изучение многолетней динамики загрязнения почвенного покрова г. Москвы ТММ и бенз(а)пиреном на основе данных Мосэкомониторинга. Решались следующие задачи:

- выявление многолетних трендов накопления поллютантов в поверхностном горизонте городских почв отдельных административных округов (АО) и города в целом;
- определение роли антропогенных факторов и физико-химических свойств почв в формировании техногенных геохимических аномалий;
- оценка эколого-геохимического состояния городских почв с помощью предельно и ориентировочно допустимых концентраций (ПДК/ОДК) поллютантов в почвах.

Данные наблюдений ГПБУ «Мосэкомониторинг» за состоянием городских почв в пределах МКАД за 2007—2016 гг. включают основные физико-химические свойства поверхностного (0—10 см) слоя почв и содержание шести тяжелых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu, Ni, Hg), одного металлоида (As) и БаП в 2238 точках (17 904 пробы). Изучаемые поллютанты относятся к 1 (Pb, Hg, Zn, Cd, As, БаП) и 2 (Cu, Ni) классам опасности [11].

Объект исследования

Природные условия. Площадь Москвы после изменения городских границ в 2012 г. составляет 2561,5 км², внутри МКАД находится примерно треть этой площади — около 900 км² [12]. Город расположен в центральной части Русской платформы. К четвертичному периоду здесь сложился эрозионно-тектонический рельеф, который в значительной степени был нивелирован отложениями моренных суглинков, песчаных водно-ледниковых и озерно-ледниковых осадков при отступании ледников. Экзогенные процессы более позднего времени (водная эрозия, аккумуляция речных и озерных осадков, карстовые процессы) также наложили свой отпечаток на черты современного рельефа [13].

Москва относится к зоне континентального климата со средней годовой температурой воздуха в городе +5,1 °С. Средняя температура января –9,3 °С, июля +18,2 °С. В теплое время года преобладают северо-западные ветры, а в холодное — юго-западные. Загрязнение воздуха представляет наибольшую угрозу для столичной экологии. В Северном, Южном и Центральном районах Москвы существуют зоны с довольно плотной жилой застройкой, для которых характерны низкие

скорости ветра (0–2 м/с) и частая повторяемость штилей весной и летом, что способствует оседанию выбросов [14]. Поскольку более 90 % всех вредных выбросов приходится на транспорт [1; 15–17], самыми экологически опасными зонами, особенно в безветренную погоду, являются районы, прилегающие к крупным магистралям, а также центр города.

Естественный ход температуры, распределение осадков, влажности, солнечного сияния и ветровой режим значительно изменяются в связи с большой площадью асфальтовых покрытий и зданий. Возникающий над большим городом «остров тепла» выражен в Москве весьма отчетливо. В результате температура в целом по городу на 1,5–2 °С выше, чем в окрестностях [14], что в летний период способствует формированию городского бриза [18].

Территория Москвы относится к Среднерусской провинции Восточно-Европейской суббореальной лесной области. В почвенном покрове фоновых районов доминируют дерново-подзолистые суглинистые почвы с контрастным текстурно-дифференцированным профилем [19]. Естественные почвы в лесопарках Москвы занимают 48–60 % площади [20]. Растительность Москвы представлена в основном искусственными насаждениями с преобладанием липы мелколистной, гибридов тополей, ясеня пенсильванского, кленов ясенелистного и платановидного [21].

Техногенное воздействие. Москва — самый населенный город России и Европы. В настоящее время Московская агломерация насчитывает 16,7 млн чел., к 2025 г. эта цифра может вырасти до 21 млн чел. [22].

По данным МВД России [23], в 2017 г. автомобильный парк столицы насчитывал около 4,6 млн единиц, из которых 90,4 % составляли легковые автомобили, 8,5 % — грузовые автомобили, 1,1 % — автобусы. Москва концентрирует 9 % автопарка России, при этом ежегодные выбросы составляют более 1 млн т загрязняющих веществ [24]. Доля выбросов в атмосферу от передвижных источников в среднем по России в 2016 г. составила 44,7 % [25], в то время как по Москве этот показатель превысил 93 % [1; 15–17; 24].

Ежегодно на 8–10 % увеличиваются количество автотранспорта и его вклад в загрязнение городской среды [1; 15–17; 24]. Автотранспорт является источником ТММ за счет выхлопных газов, истирания шин и тормозных колодок, абразии дорожного покрытия и выдувания дорожной пыли и частиц почвы, накапливающихся вдоль бордюров [1]. В последнее десятилетие наблюдается сокращение выбросов от передвижных источников из-за обновления автомобильного парка и улучшения качества топлива [15].

В Москве расположено более 340 тыс. предприятий, в том числе 2800 крупных промышленных объектов, 39 тыс. жилых зданий, 15 ТЭЦ и 53 тепловые станции [24]. Ежегодные выбросы от стационарных источников составляют более 60 тыс. т [10]. За 1990–2015 гг. объем выбросов от стационарных источников в Москве сократился в 4 раза (в целом по стране в 2 раза) из-за закрытия или вывода ряда предприятий в соседние регионы и реновации оставшихся в столице производств, в частности ТЭЦ и Московского НПЗ. Однако около 18,8 тыс. га, или 17 % площади Москвы в границах 2010 г., все еще занято промзонами [17].

Производственная деятельность во многих из них уже свелась к минимуму, но в них остаются стационарные непромышленные источники выбросов — полигоны твердых бытовых отходов, АЗС, автомойки, медицинские учреждения, лаборатории, мелкие котельные [15; 26].

Постоянный рост численности населения и автотранспорта ведет к усилению техногенной нагрузки на городскую среду и оказывает негативное воздействие на состояние почвенного покрова. Техногенные факторы почвообразования становятся преобладающими в Москве, формируя в новых экологических условиях специфические группы почв и сложный почвенный покров. На территории Москвы преобладают антропогенные почвы, среди которых наиболее распространены урбаноземы и квазиземы [27]. Для почв Москвы характерно нарушенное строение профиля, несогласованное залегание горизонтов, наличие антропогенных горизонтов с высокой степенью загрязнения широким спектром ТММ. Загрязняющие вещества осаждаются из атмосферы на поверхность городских почв и накапливаются в них, изменяя морфологические и физико-химические свойства верхних горизонтов [28]. Мощность антропогенно-преобразованной толщи значительно варьирует и составляет от нескольких сантиметров до 1 и более метра. В большинстве случаев для городских почв отмечено снижение мощности гумусовых горизонтов до 2–4 см, нейтральная или близкая к нейтральной реакция среды (рН 6,6–7,5), которая способствует снижению скорости миграции ТМ [29].

Материалы и методы исследования

Сеть почвенного мониторинга сформирована с учетом территориального деления и функционального зонирования Москвы. Она состоит из 1333 площадок постоянного мониторинга, среди которых ежегодно обследуется около 200–300 площадок (рис. 1), где смешанные пробы почв, состоящие из 5 индивидуальных, отбираются с глубины 0–20 см методом конверта с площади 1 м². Содержание ТММ в пробах анализируется приближенно-количественным спектральным методом, Нг — методом атомной абсорбции с термической возгонкой паров ртути, БаП — методом высокоэффективной жидкостной хроматографии [9; 10].

Характер использования городских территорий играет ведущую роль в формировании техногенных геохимических аномалий [30], поэтому для учета этого фактора нами проведено функциональное зонирование территории. При зонировании все точки почвенного мониторинга отнесены к одной из четырех зон: транспортной, промышленной, селитебной и рекреационной. Статистическая обработка данных выполнена в пакете STATISTICA 10.

Экологическая опасность загрязнения почв оценивалась на основе гигиенических нормативов — предельно допустимых концентраций (ПДК) для 6 поллютантов и ориентировочно допустимых (ОДК) — для As и Cd [31; 32]. Вычислялся коэффициент экологической опасности $K_o = C_i / \text{ПДК}_i$, где C_i — содержание i -го поллютанта в городской почве.

Геохимическая неоднородность почвенного покрова и влияние природно-антропогенных факторов на аккумуляцию ТММ и БаП в городских почвах оце-

нивались в программном пакете S-PLUS с помощью метода регрессионных деревьев, который заключается в последовательном делении таблицы данных по одному из факторов на две части таким образом, чтобы каждая из них была максимально однородной [33]. Полученные группы характеризуются вариабельностью прогнозируемого признака $D = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$, где \bar{y} — среднее значение y_i по всем n наблюдениям в группе. Каждая из групп затем делится еще на две части и т.д. Каждое деление можно рассматривать как ветвление по одной из переменных-предикторов; структура и количество ветвей результирующего дерева зависят от числа уровней деления. Процесс разбиения заканчивается, если n становится меньше заранее установленного (10–15) или если проверка гипотезы о значимости различий между средними значениями с помощью t -теста дает отрицательный результат. Для каждого конечного узла дендрограммы по n точкам опробования рассчитываются средняя концентрация элемента и коэффициент ее вариации C_v . Метод позволяет прогнозировать уровни содержания поллютантов в почвах при различных сочетаниях факторов, а также оценить значимость последних [3; 4; 28].

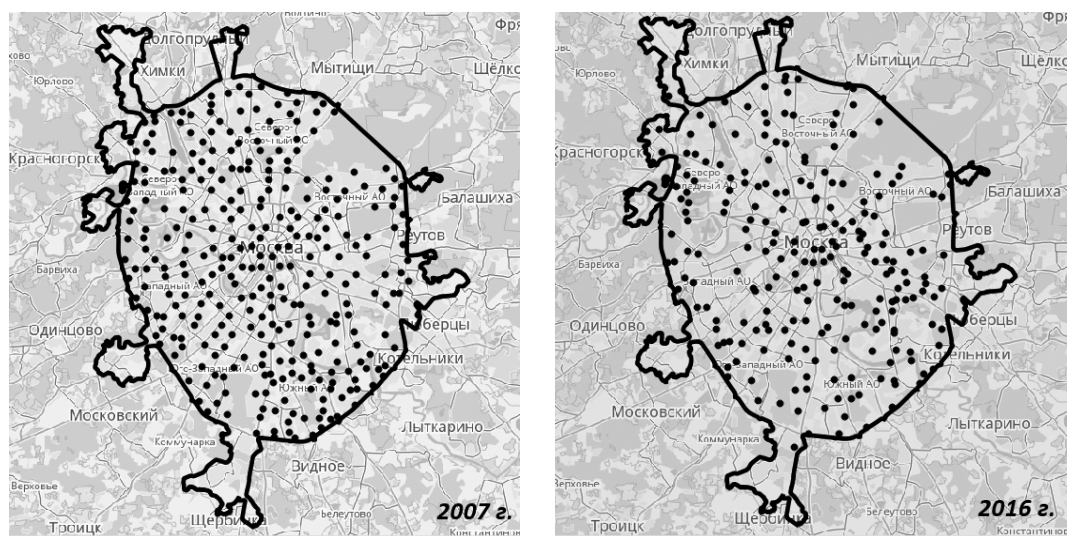


Рис. 1. Точки отбора почвенных образцов в 2007 и 2016 гг.
[Figure 1. Soil sampling points in 2007 and 2016]

Результаты и их обсуждение

Динамика содержания ТММ и БаП в городских почвах. Исследованы 9 из 12 административных округов в пределах МКАД, которые подвергаются антропогенной нагрузке наиболее длительное время. Многолетние тренды накопления ТММ и БаП в поверхностном горизонте городских почв АО и города в целом выявлены на основе анализа средних содержаний (Mean) поллютантов в почвах округов в 2007 и 2016 гг. и приросту/уменьшению их содержания (Δ) за рассматриваемый период (табл. 1).

Таблица 1/ Table 1

Динамика среднего содержания ТММ и БаП (мг/кг) в почвах административных округов Москвы за 2007–2016 гг.
 [Dynamics of average content of heavy metals and metalloids and benzo(a)pyrene (BaP) (mg/kg) in topsoils for administrative districts (ADs) of Moscow in 2007–2016]

	ЦАО Central AD	САО Northern AD	СВАО North- Eastern AD	БАО Eastern AD	ЮВАО South-Eastern AD	ЮАО Southern AD	ЮЗАО South- Western AD	ЗАО Western AD	СЗАО North- Western AD	Москва Entire Moscow	ПДК/ОДК* МРС/ГРС*
Cu	2007	30,2	25,7	69,0	35,0	35,9	28,3	24,0	14,4	35,8	55
	2016	64,2	33,8	31,3	43,9	36,3	37,4	26,6	19,0	38,5	
	Δ	+34,0	+8,1	-37,7	+8,9	+0,4	+9,1	+2,6	+4,6	+2,7	
Zn	2007	191,6	133,4	254,5	140,8	191,4	179,9	131,0	83,9	177,5	100
	2016	174,7	111,2	152,3	117,9	132,7	105,6	101,8	62,0	126,4	
	Δ	-16,9	-22,2	-102,2	-22,9	-58,7	-74,3	-29,2	-21,9	-51,1	
Pb	2007	83,6	32,3	48,3	56,9	85,1	80,3	47,6	21,3	62,9	32
	2016	65,8	25,3	31,1	33,9	37,0	26,5	30,6	18,1	35,0	
	Δ	-17,8	-7,0	-17,2	-23,0	-48,1	-53,8	-17,0	-3,2	-27,9	
Ni	2007	15,3	18,8	19,8	19,8	25,5	21,9	16,4	15,4	20,4	85
	2016	17,0	16,1	14,8	15,8	18,7	20,0	17,4	13,6	16,4	
	Δ	+1,7	-2,7	-5,0	-4,0	-6,8	-1,9	+1,0	-1,8	-4,0	
Cd	2007	0,58	0,62	0,48	0,98	0,91	0,66	0,35	0,24	0,77	2*
	2016	1,10	0,71	0,65	0,96	0,62	0,52	0,63	0,35	0,78	
	Δ	+0,52	+0,09	+0,17	-0,02	-0,29	-0,14	+0,28	+0,11	+0,01	
As	2007	3,79	2,35	2,47	3,53	6,14	5,90	4,58	1,99	4,34	10*
	2016	5,80	5,30	5,50	4,83	5,34	5,38	5,13	4,08	5,20	
	Δ	+2,01	+2,95	+3,03	+1,30	-0,80	-0,52	+0,55	+2,09	+0,86	
Hg	2007	0,61	0,24	0,33	0,30	0,32	0,51	0,18	0,15	0,34	2,1
	2016	0,38	0,20	0,19	0,19	0,16	0,16	0,11	0,07	0,20	
	Δ	-0,23	-0,04	-0,14	-0,11	-0,16	-0,35	-0,07	-0,08	-0,14	
BaП	2007	0,516	0,161	0,240	0,318	0,036	0,011	0,041	0,140	0,175	0,02
	2016	0,066	0,044	0,051	0,079	0,040	0,031	0,031	0,017	0,047	
	Δ	-0,450	-0,117	-0,189	-0,239	+0,004	+0,020	-0,010	-0,123	-0,128	

За 10-летний период содержание Cu, Cd, As в почвах ЦАО и Cd в ЗАО и СЗАО увеличилось вдвое; As в САО, СВАО и ВАО — в 1,4–2,3 раза (рис. 2). Содержание Zn (рис. 3), Pb (рис. 4) и Hg стало ниже во всех АО. В среднем по Москве в 2016 г. содержание всех элементов понизилось или осталось неизменным, за исключением As, содержание которого в почвах выросло на 20 %. Концентрация BaП (рис. 5) уменьшилась в 4–8 раз практически во всех округах. Несмотря на увеличение содержания BaП в ЮАО и ЮЗАО, оно остается ниже среднего содержания этого полиарена по Москве.

Такие результаты могут свидетельствовать об улучшении экологической ситуации в Москве за последнее десятилетие. Снижение содержания ТММ в почвах Москвы может быть обусловлено значительным сокращением выбросов от промышленных источников из-за их закрытия во время кризиса, процессами реновации производств, а также ужесточением экологических норм и улучшением качества топлива [15]. Однако это утверждение спорно по нескольким причинам. Во-первых, содержание многих опасных ТММ (Se, Tl, Sb, Th, U, Ba) в почвах России неизвестно [34; 35], в Москве они определяются эпизодически и только в отдельных районах города [1; 36]. Во-вторых, в почвах Москвы выявлено многократное превышение гигиенических нормативов токсичными элементами Sb, Mo, W, Cr, Bi [37; 38], но при ежегодном почвенном мониторинге эти ТММ не определяются, что можно объяснить недооцениванием опасности этих поллютантов.

Многолетняя динамика содержания ТММ и BaП в почвенном покрове Москвы (рис. 6) характеризуется уменьшением среднего содержания (Mean) изучаемых элементов, за исключением As. Стандартное отклонение (SD) для Cu, Ni, Pb, Hg и BaП за текущее десятилетие также понизилось, т.е. разброс значений стал меньше.

Факторы формирования техногенных аномалий ТММ и BaП. Как известно, специфика и уровень техногенной нагрузки на городские почвы, т.е. интенсивность поступления поллютантов, определяются видом использования территории [39], а уровень их накопления зависит от фиксирующей способности почв. Для выяснения влияния природно-антропогенных факторов на аккумуляцию ТММ и BaП в городских почвах был проведен многофакторный регрессионный анализ. Статистические модели, отражающие дифференциацию поверхностного слоя почв по содержанию ТММ и BaП в 2007, 2012 и 2016 гг., строились в зависимости от следующих факторов и условий (табл. 2):

- содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$, SOM), который характеризует одну из основных фаз-носителей ТММ [40] и BaП [41];

- кислотно-основных условий ($pH_{\text{сол}}$, pH_{sal}), которые влияют на миграционную способность ТММ;

- гранулометрического состава (Гран. с., Texture) почв: содержание тонких (илистой и глинистой) фракций обуславливает способность почвы прочно закреплять ТММ. При отборе почвенных проб сотрудниками ГПБУ «Мосэкомониторинг» выделялись следующие фракции: песок, супесь, легкий, средний и тяжелый суглинки, насыпной грунт (торфяно-песчаная смесь); насыпной грунт, ниже которого супесь; насыпной грунт, перекрывающий суглинок;

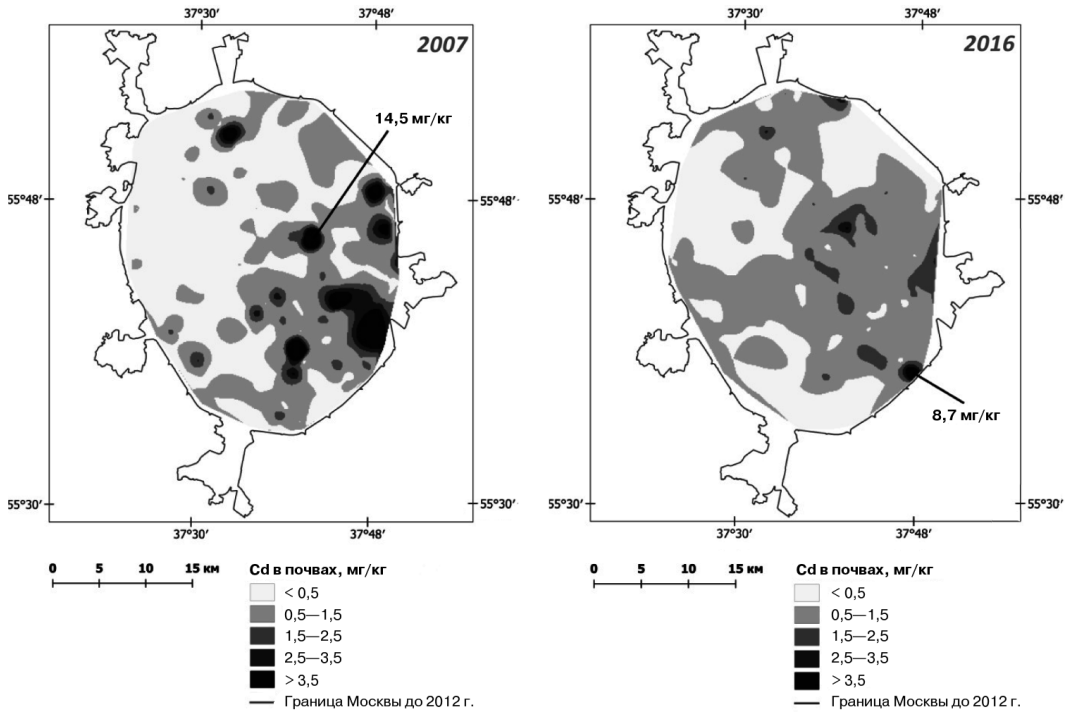


Рис. 2. Содержание Cd в почвенном покрове Москвы в 2007 и 2016 гг.

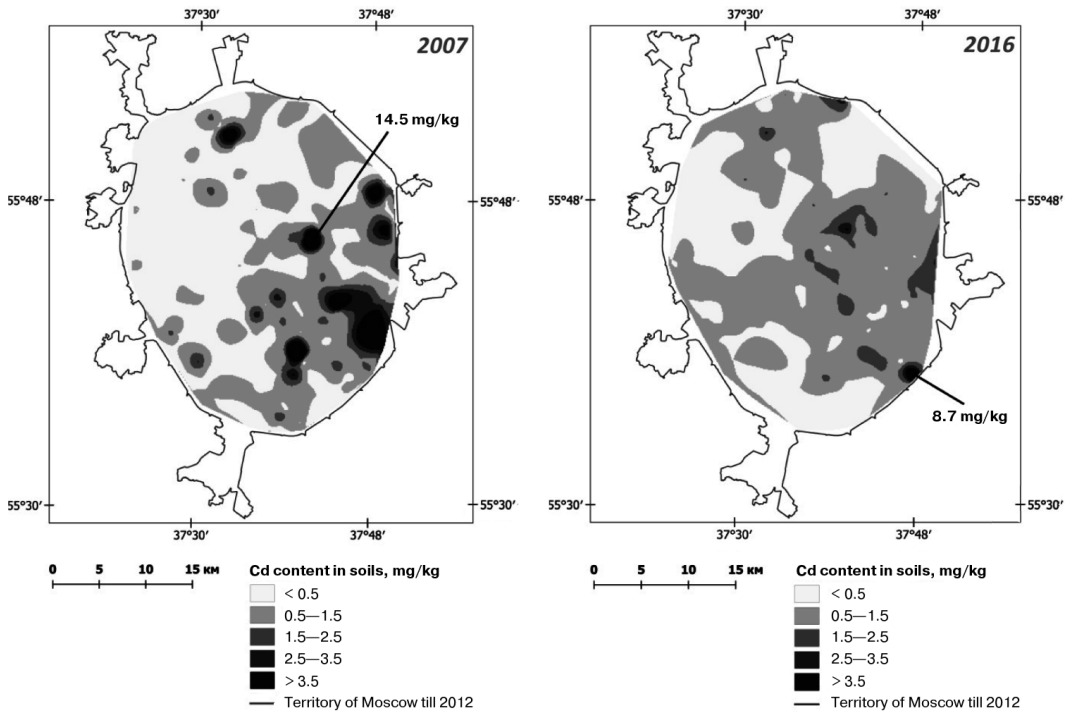


Figure 2. The content of Cd in the soil cover of Moscow in 2007 and 2016

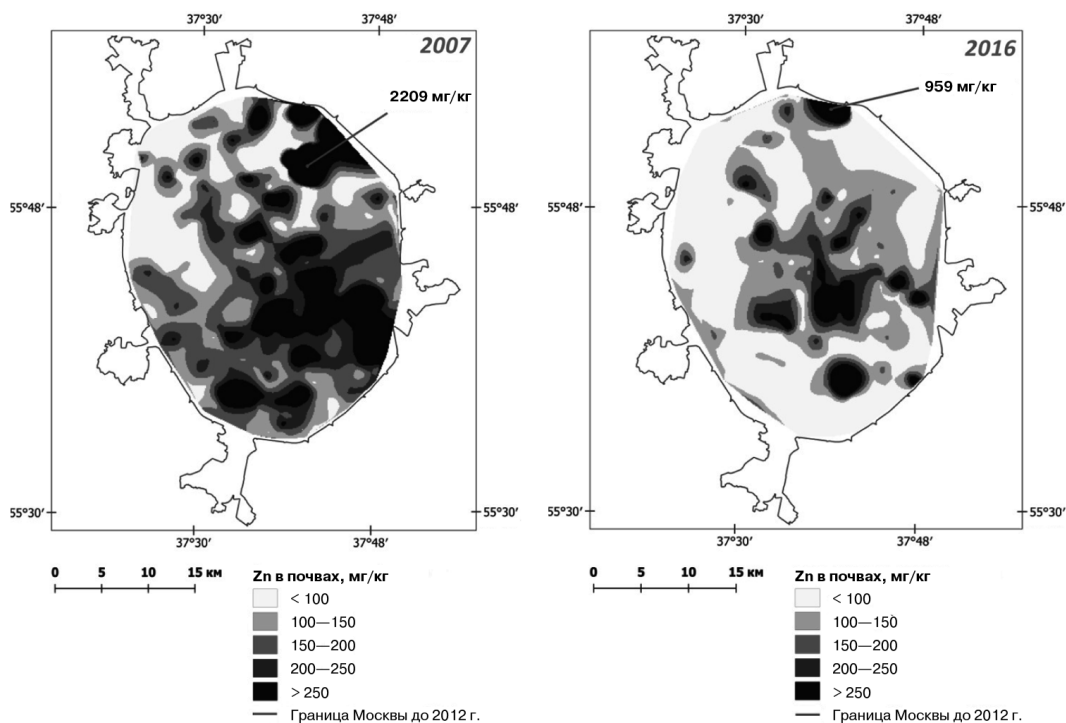


Рис. 3. Содержание Zn в почвенном покрове Москвы в 2007 и 2016 гг.

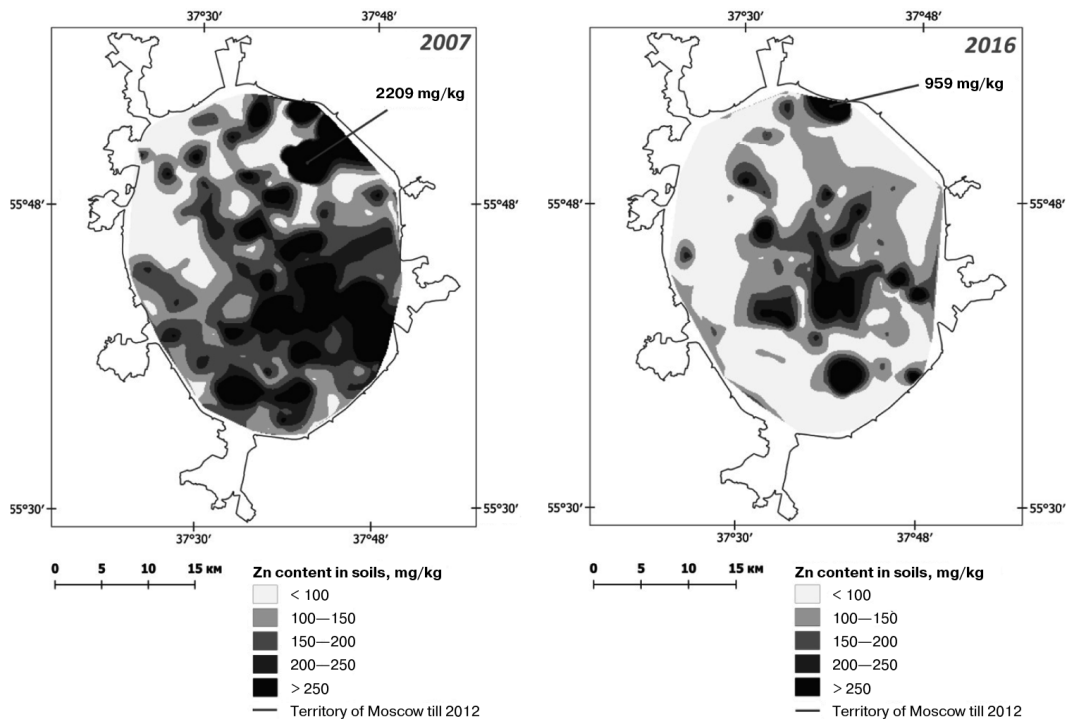


Figure 3. The content of Zn in the soil cover of Moscow in 2007 and 2016

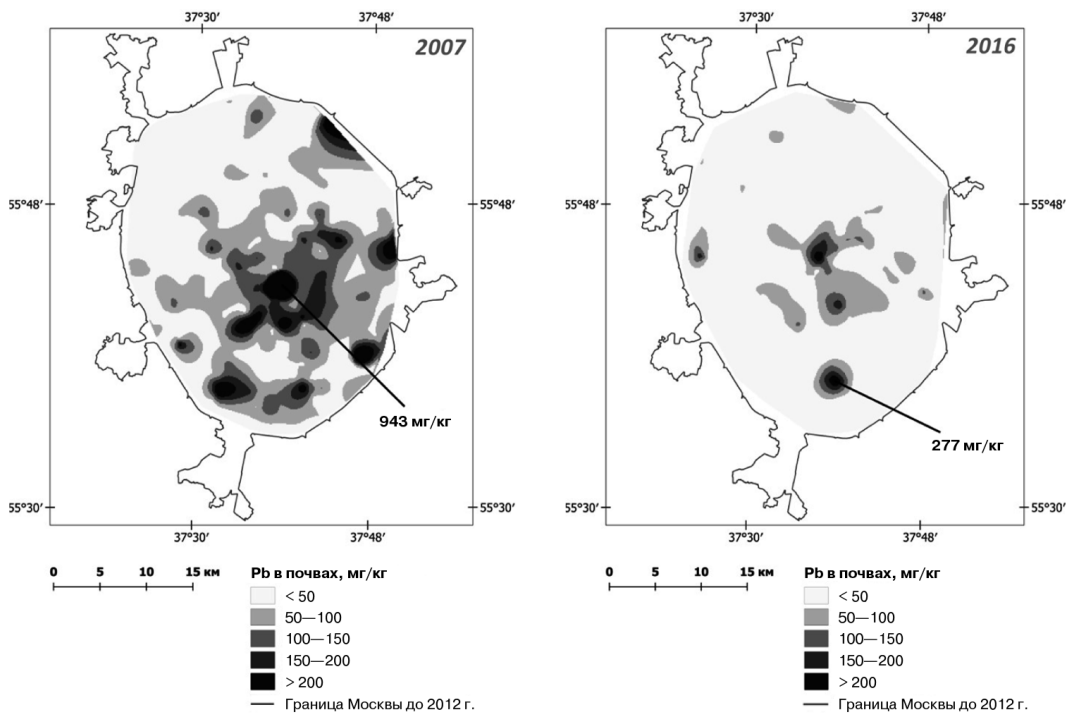


Рис. 4. Содержание Pb в почвенном покрове Москвы в 2007 и 2016 г.

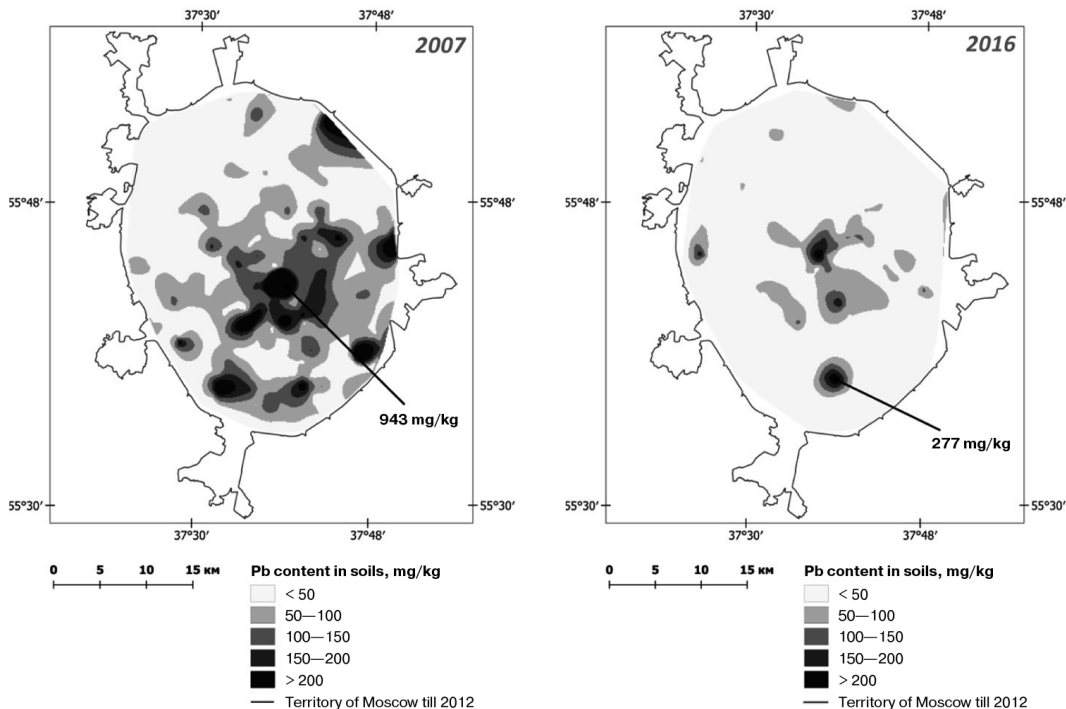


Figure 4. The content of Pb in the soil cover of Moscow in 2007 and 2016

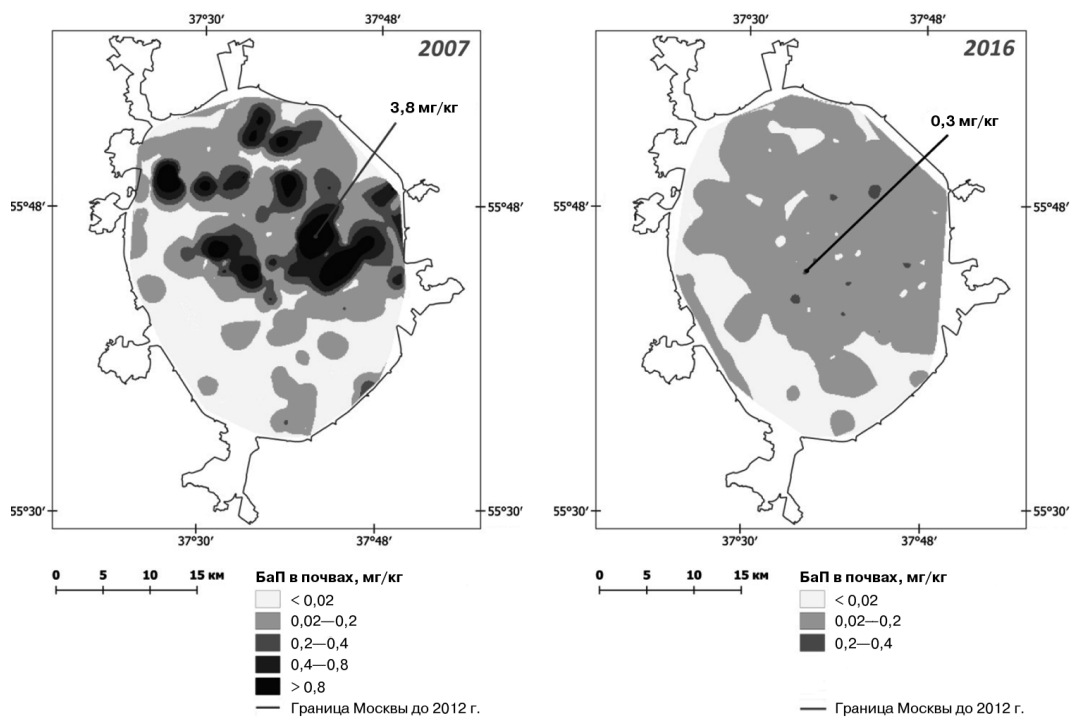


Рис. 5. Содержание БаП в почвенном покрове Москвы в 2007 и 2016 гг.

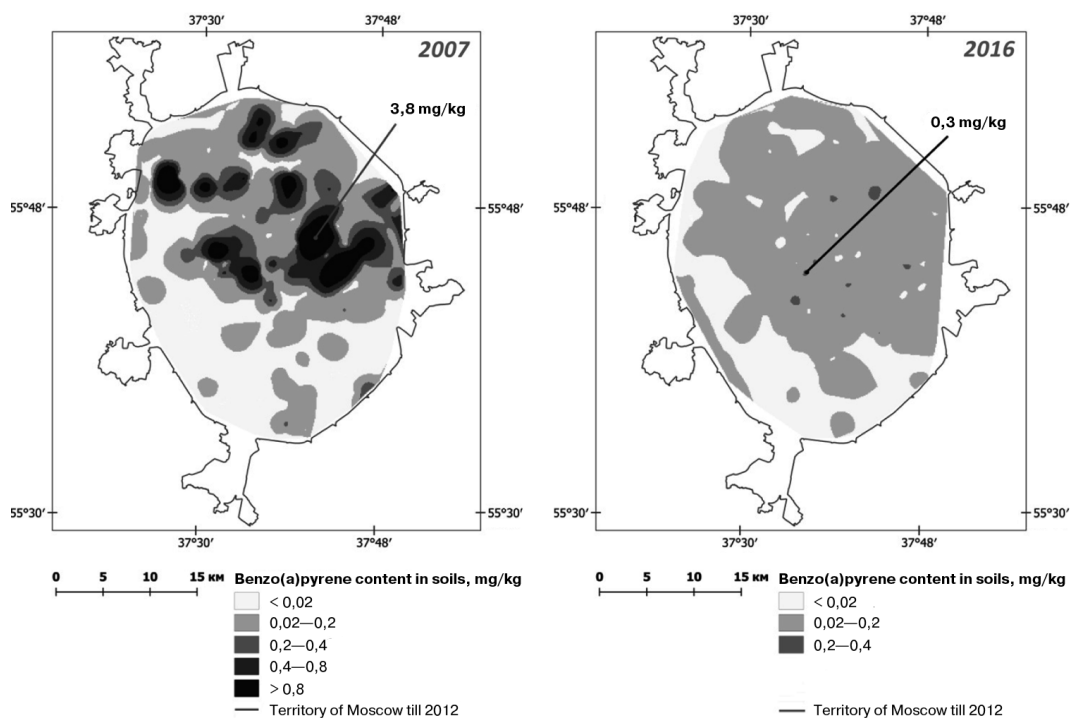


Figure 5. The content of benzo(a)pyrene in the soil cover of Moscow in 2007 and 2016

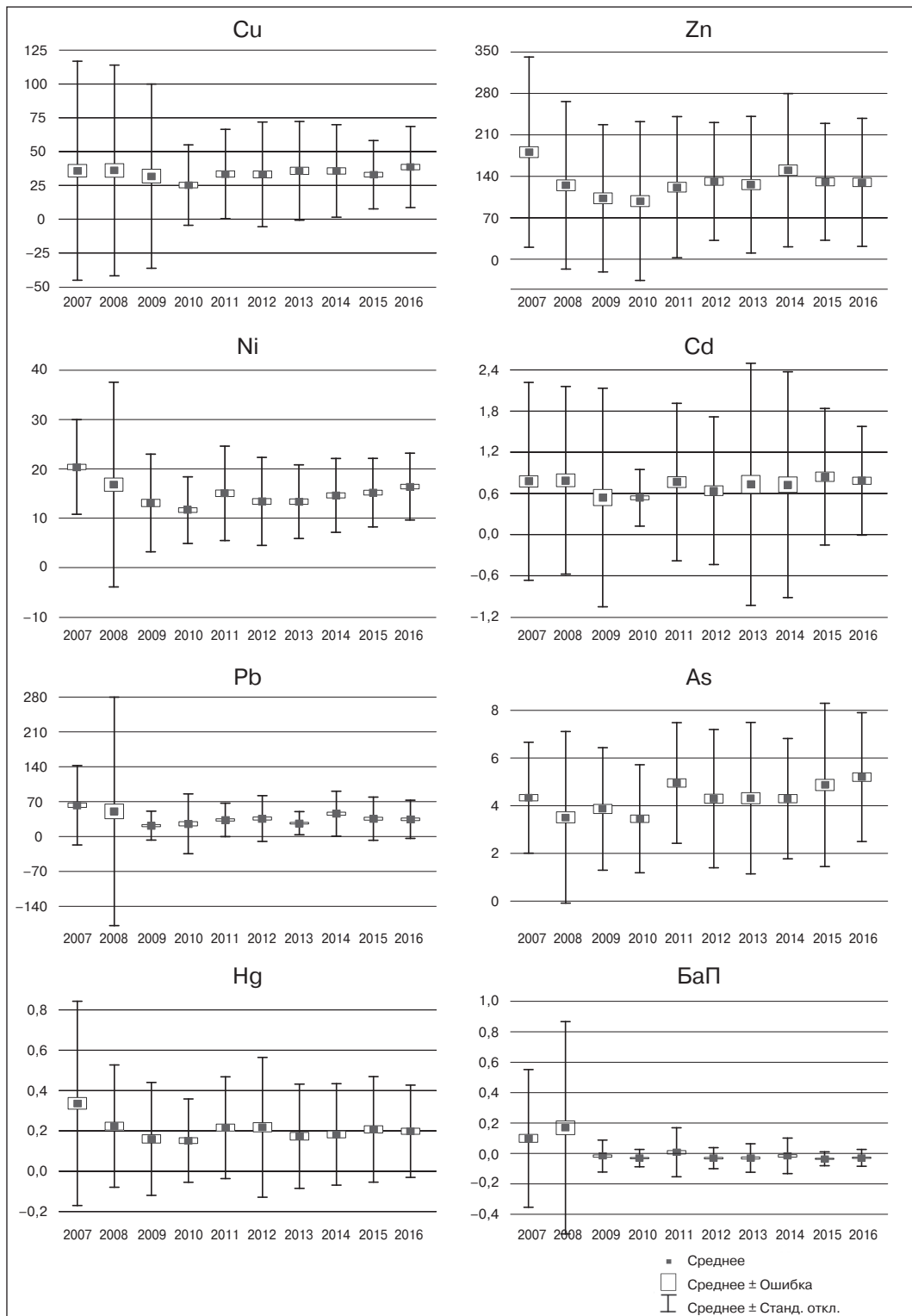


Рис. 6. Многолетняя динамика содержания ТММ и бенз(а)пирена (мг/кг) в почвенном покрове Москвы

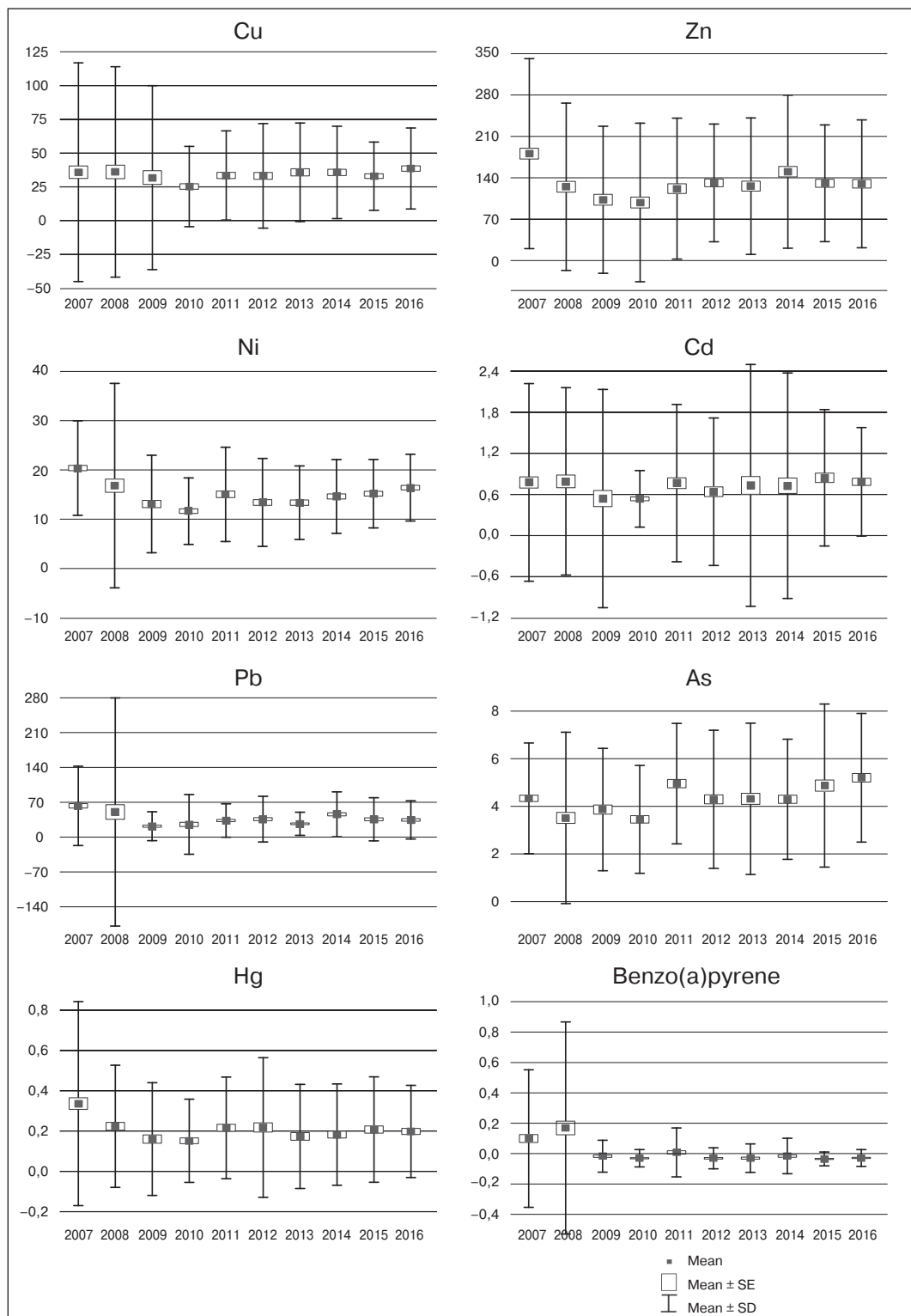


Figure 6. Long-term dynamics of heavy metal, metalloid and benzo(a)pyrene content (mg/kg) in the soil cover of Moscow

— функционального назначения городских территорий (ФЗ, LUZ), которое определяет характер и интенсивность техногенной геохимической нагрузки и, таким образом, играет ведущую роль в формировании геохимических аномалий [39]. На территории Москвы выделены следующие функциональные зоны (ФЗ): транспортная, промышленная, селитебная, рекреационная;

— пространственного фактора, выраженного через принадлежность к АО (AD): каждый округ уникален по составу и количеству источников загрязнения, а также положению относительно преобладающих ветров, способствующих атмосферному переносу ТММ. В Москве выделены 12 АО, однако в исследовании участвуют только 9 ограниченные МКАДом: ЦАО, САО, СВАО, ВАО, ЮВАО, ЮАО, ЮЗАО, ЗАО, СЗАО.

Результаты расчетов по методу регрессионных деревьев (табл. 2) выявили особенности накопления отдельных поллютантов.

Кадмий. Накопление Cd в почвах Москвы контролируется их гранулометрическим составом, содержанием $C_{орг}$ и зависит от местоположения на территории Москвы в границах того или иного АО. Содержание Cd максимально в почвах тяжелого грансостава, а также при высоких содержаниях органического вещества. Лидером по загрязнению почв Cd является ЮВАО: содержание Cd в 2007 г. было более чем в 3 раза выше, чем в остальных округах (2,1 против 0,63 мг/кг). В 2012 и 2016 гг. к ЮВАО присоединились СВАО, ЮАО и ЦАО, ВАО соответственно. При этом аккумуляция Cd усиливалась с увеличением $C_{орг}$. Так, в 2012 г. среднее содержание Cd в почвах ЮВАО было почти вдвое выше, чем в остальных округах, а при $C_{орг} > 7,8 \%$ оно возрастало еще вдвое — с 0,84 до 1,70 мг/кг. В 2016 г. в почвах ЦАО, ВАО, ЮВАО при $C_{орг} > 6,1 \%$ содержание Cd увеличивалось на 63 %.

Наименьшее количество Cd характерно для почв легкого гранулометрического состава — практически вдвое меньше, чем в почвах тяжелого грансостава. Такое же уменьшение содержания Cd наблюдалось в западной и южной частях города (СЗАО, ЗАО, ЮЗАО и ЮАО) при $C_{орг} < 6,1 \%$.

Медь. Наиболее важными факторами аккумуляции Cu являются свойства почв — реакция среды и содержание органического вещества, при этом уровни содержания Cu сильно варьируют от округа к округу. Обратная зависимость между кислотностью почв и содержанием Cu характерна для всех рассматриваемых годов. В кислой и нейтральной средах (при $pH_{сол} < 7,5$) среднее содержание Cu было в 2007 г. в 3 раза ниже, чем в щелочной — 30,2 и 94,4 мг/кг соответственно. Наибольшее содержание Cu отмечено при содержании органического вещества в диапазоне 5,1–10,9 %, наименьшее — при $C_{орг} < 5,1 \%$. В целом за 10-летний период в большинстве АО содержание Cu увеличилось (см. табл. 1). Ее ускоренное накопление выявлено в почвах ЦАО, ВАО и ЮВАО, где среднее содержание Cu в 2016 г. составило 51,5 мг/кг, что на 34 % выше, чем в среднем по Москве.

Наименее благоприятные условия для аккумуляции Cu сложились в почвах западной части Москвы (СЗАО, ЗАО и ЮЗАО), причем минимальное накопление Cu в почвах наблюдалось при нейтральной и кислой реакциях среды и невысоком содержании $C_{орг}$.

Таблица 2

**Факторы накопления ТММ и БаП в поверхностном горизонте почв Москвы
и их значимость в разные годы наблюдений**

Год	Факторы	Тяжелые металлы, металлоиды и БаП							
		Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	As	Hg	БаП
2007	C _{орг}	2 ±	4, 5 ±	4, 5 ±	4 +		4, 5 ±	2, 5, 6 ±	4 +
	pH _{сол}	1, 3 +	2, 4, 5, 6 ±	3 ±	5 ±	1, 3, 4, 5 +	5 +	2, 4 +	3 +
	Гран. с.	4	3	2	3, 4	3	3	4, 5	2
	ФЗ	5		2, 4		4	3	4	
	АО	2, 3, 6	1	1, 3	1, 2, 3	2, 5	1, 2	1, 3	1, 2, 4
2012	C _{орг}	3, 4 ±	2, 3 ±	2, 3 ±	2, 3, 4 ±	2, 3 ±	1, 3 +	2, 3 +	4, 5 ±
	pH _{сол}	3 +							3, 5 ±
	Гран. с.	2, 3	1	1	2, 3	1	4	3, 4	3
	ФЗ			5		4	3	3	2
	АО	1, 2	2, 3, 4	2, 3, 4	1, 3	2, 3, 5	2, 4	1, 2	1, 2, 4
2016	C _{орг}	2 +	2, 3 ±	2, 4 ±	2, 3 ±	4 ±	1, 2, 4 ±	2 +	3, 4 ±
	pH _{сол}	3, 4 +			5 ±	3 ±		2 +	
	Гран. с.		3	1	2	2, 4		5	1, 3
	ФЗ	3	4	2	4	3		4	
	АО	1, 2	1, 2, 4	3, 4	1, 3	1, 2, 5	2, 3, 4, 5	1, 3	2, 5

Примечание. Ранги от 1 до 5 показывают уменьшение значимости фактора. Знаки «+» и «-» отражают соответственно прямую и обратную зависимости содержания ТММ или БаП от того или иного фактора; знак «±» показывает неоднозначность влияния фактора. Для качественных переменных характер связи не определялся.

Table 2

**Factors of HMM and BaP accumulation in the topsoils of Moscow and their importance
in different years of observation**

Year	Factors	Heavy metals and metalloids and benzo(a)pyrene							
		Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	As	Hg	BaP
2007	SOM	2 ±	4, 5 ±	4, 5 ±	4 +		4, 5 ±	2, 5, 6 ±	4 +
	pH _{sal}	1, 3 +	2, 4, 5, 6 ±	3 ±	5 ±	1, 3, 4, 5 +	5 +	2, 4 +	3 +
	Texture	4	3	2	3, 4	3	3	4, 5	2
	LUZ	5		2, 4		4	3	4	
	AD	2, 3, 6	1	1, 3	1, 2, 3	2, 5	1, 2	1, 3	1, 2, 4
2012	SOM	3, 4 ±	2, 3 ±	2, 3 ±	2, 3, 4 ±	2, 3 ±	1, 3 +	2, 3 +	4, 5 ±
	pH _{sal}	3 +							3, 5 ±
	Texture	2, 3	1	1	2, 3	1	4	3, 4	3
	LUZ			5		4	3	3	2
	AD	1, 2	2, 3, 4	2, 3, 4	1, 3	2, 3, 5	2, 4	1, 2	1, 2, 4
2016	SOM	2 +	2, 3 ±	2, 4 ±	2, 3 ±	4 ±	1, 2, 4 ±	2 +	3, 4 ±
	pH _{sal}	3, 4 +			5 ±	3 ±		2 +	
	Texture		3	1	2	2, 4		5	1, 3
	LUZ	3	4	2	4	3		4	
	AD	1, 2	1, 2, 4	3, 4	1, 3	1, 2, 5	2, 3, 4, 5	1, 3	2, 5

Note. Ranks from 1 to 5 show a decrease in the significance of the factor. The signs “+” and “-” mean the direct and inverse relationship between the content of HMM or BaP and a factor respectively; the “±” sign shows the ambiguity in the influence of the factor. For qualitative variables, the pattern of relationship was not determined.

Мышьак. Значимыми факторами дифференциации почв по содержанию As являются функциональная и административная принадлежность территории. Наименьшее содержание As обнаружено в селитебной зоне, наибольшее — в рекреационной. В 2007 г. самыми загрязненными были ЮВАО, ЮАО, ЮЗАО, ЗАО, где среднее содержание As в почвах — 5,73 мг/кг ($n = 162$ пробы) — было почти в 2 раза больше, чем в остальных округах — 2,81 мг/кг ($n = 148$). В 2016 г. лидерами по загрязнению As стали ЦАО и СВАО.

Аккумуляция As в почвах прямо пропорциональна содержанию органического вещества, которое фиксирует As. Так, в 2012 и 2016 гг. при $C_{орг} > 10\%$ выявлено увеличение содержания As на 42–51 %. Условиями наименьшей аккумуляции As являются: минимальное содержание в почвах $C_{орг}$, приуроченность территории к ВАО, ЗАО, СЗАО и селитебной ФЗ.

Никель. Ведущими факторами накопления Ni в почвах Москвы являются их свойства — гранулометрический состав и содержание органического углерода, а также местоположение на территории Москвы в пределах того или иного АО. Наиболее загрязненным является юг города (ЮВАО, ЮАО, ЮЗАО), однако здесь наметилась положительная тенденция — за 10-летний период почвы стали чище в 1,1–1,7 раза (см. табл. 1). Почвы тяжелого гранулометрического состава отличаются повышенным в 1,5–2 раза содержанием Ni по сравнению с песчаными и супесчаными почвами. Влияние органического вещества неоднозначно: в некоторых пробах с пониженным $C_{орг}$ количество Ni повышено, в других — содержание Ni максимально при $C_{орг}$ около 8 % и минимально при $C_{орг} < 4,9\%$. Это можно объяснить неоднородностью состава органического вещества в разных ФЗ. Если в рекреационной и селитебной зонах оно представлено природными фракциями гумуса [42], то вблизи промзон и автомагистралей в его составе преобладают труднорастворимые органические соединения, источниками которых являются асфальтовое покрытие, выбросы промышленных предприятий и автотранспорта [43].

Наименьшее содержание Ni зафиксировано в песчаных и супесчаных почвах при $C_{орг} < 4,9\%$ в четырех округах — СВАО, СЗАО, ВАО, ЗАО.

Ртуть. К наиболее значимым факторам аккумуляции Hg относятся кислотность почв, содержание $C_{орг}$, а также пространственное положение территории. Накопление Hg заметно (в 1,5–2 раза) усиливается в щелочных почвах. Так, в 2007 г. наибольшее содержание Hg было обнаружено при $pH_{сол} > 7,2$ в ЦАО, ЮВАО и ЮЗАО, а в 2016 г. — при $pH_{сол} > 6,9$ в ЦАО. На протяжении 10 лет исследований наиболее загрязненными Hg оставались два округа — ЦАО и ЮВАО, где содержание Hg было в 2 и более раз выше, чем в других округах.

Факторы, препятствующие аккумуляции Hg в почвах, — кислая среда, в которой ртуть мобильна и выносится из почвенного профиля, и низкое содержание $C_{орг}$. Выявлена прямая зависимость между содержанием Hg и органического вещества, способствующего закреплению Hg в почвах. Так, в 2007 г. наиболее чистыми были почвы с $C_{орг} < 2,4\%$, в 2016 г. — с $C_{орг} < 4,8\%$. Различия в пороговых значениях $C_{орг}$ объясняются активной рекультивацией городских почв с подсыпкой торфо-песчаных смесей, обогащенных органическим веществом.

Свинец. На аккумуляцию Pb влияет множество факторов: почвенные свойства ($pH_{\text{сол}}$, $C_{\text{орг}}$, гранулометрический состав), пространственное положение и функциональная принадлежность территории (рис. 7). Округа, лидирующие по содержанию Pb, — ЦАО, ЮВАО, ЮАО. В большинстве случаев в транспортной и промышленной ФЗ количество Pb в 1,5 раза выше, чем в остальных зонах. Подщелачивание почв вызывает усиление аккумуляции Pb. По данным 2007 г., в щелочных почвах ($pH_{\text{сол}} > 7,3$) содержание Pb было в среднем в 2 раза выше, чем в кислых и нейтральных — 51,7 мг/кг ($n = 249$ проб) и 109 ($n = 61$) соответственно. В 2012 г. влияние pH выявить не удалось. В 2016 г. в почвах ЮВАО и ЮАО при щелочной реакции среды ($pH_{\text{сол}} > 6,9$) содержание Pb повышалось более чем в 2 раза. Исключение составили ВАО и ЗАО, где в 2016 г. при $pH_{\text{сол}} > 6,9$ содержание Pb снижалось в 1,5 раза, что можно объяснить рекультивационными мероприятиями с подсыпкой незагрязненных Pb торфо-песчаных смесей.

Содержание органического углерода влияет на аккумуляцию Pb в совокупности с другими факторами, четкой взаимосвязи выявить не удалось, что, как было отмечено выше, можно объяснить неоднородностью состава органического вещества в условиях города. Влияние гранулометрического состава почв обусловлено использованием торфо-песчаных смесей: наименьшее содержание Pb в легко-, средне- и тяжелосуглинистых почвах, вдвое больше содержание в насыпном грунте, супесчаных и песчаных почвах с высоким содержанием $C_{\text{орг}}$.

Наименее благоприятные условия для накопления Pb сложились в северной и западной частях Москвы (САО, СВАО, СЗАО, ЮЗАО и ЗАО) в почвах легко-, средне- и тяжелосуглинистого грансостава, в которые не вносились торфо-песчаные смеси. Последние обладают повышенной способностью к адсорбции ТММ из-за высокого содержания органического вещества.

Цинк. Распределение Zn зависит от гранулометрического состава городских почв и местоположения на территории города. В почвах песчаного, легко-, средне- и тяжелосуглинистого состава среднее содержание Zn в 1,6 раза ниже, чем в супесчаных почвах, образующихся при подсыпке торфо-песчаной смеси, и насыпных грунтах (по данным 2012 г., 94,8 и 150,0 мг/кг соответственно), которые способны более активно аккумулировать ТММ. Почвы с повышенным на 20–22 % содержанием Zn расположены в ЦАО, СВАО, ЮВАО, ЮАО.

Наименьшее количество Zn выявлено в почвах четырех округов — САО, ВАО, ЗАО, СЗАО. Так, в почвах СЗАО в 2016 г. среднее содержание Zn было равно 62,0 мг/кг, что более чем в 2 раза ниже среднегородского значения.

Бенз(а)пирен. Уровень содержания БаП в почвах города определяется их гранулометрическим составом и пространственным положением (рис. 8). По данным 2016 г., в легко- и среднесуглинистых почвах содержание БаП в 2,3 раза меньше, чем в супесчаных — 0,026 (по 86 пробам) и 0,060 мг/кг (по 138 пробам) соответственно. Наиболее загрязнены центральная и восточная части города (ЦАО, СВАО, ВАО, ЮВАО). В 2007 г. среднее содержание БаП (0,339 мг/кг, 121 проба) в них было почти в 5 раз больше, чем в остальных округах (0,069 мг/кг, 189 проб). В 2012 г. лидировал ВАО со средним содержанием БаП в почвах 0,102 мг/кг (21 проба), что почти втрое больше, чем в других АО (0,039 мг/кг, 212 проб).

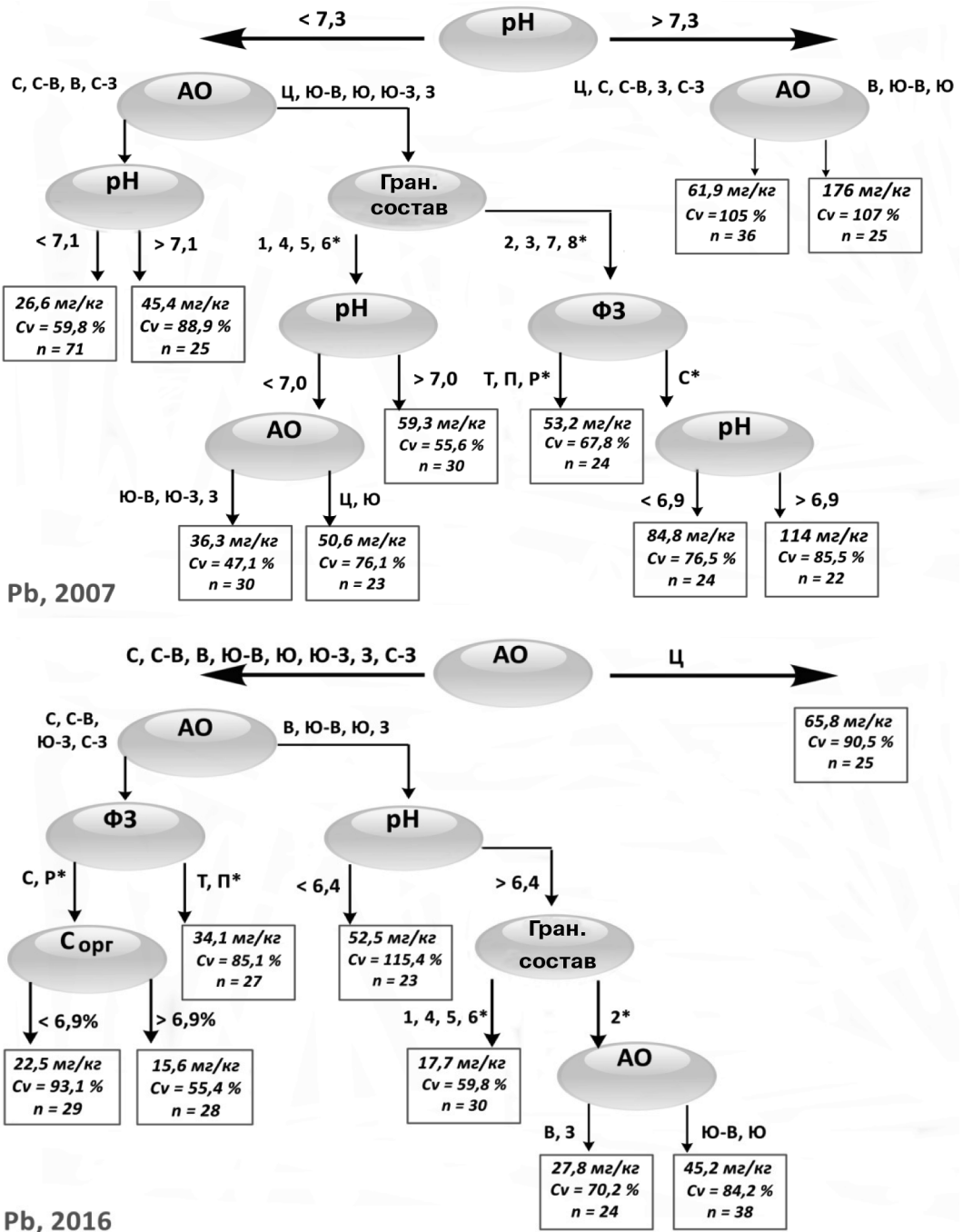


Рис. 7. Природно-антропогенные факторы (в овалах) распределения Pb (в прямоугольниках) в почвенном покрове Москвы. Для каждого конечного узла приводится средняя концентрация Pb, коэффициент вариации Cv и число точек опробования л.

Градации гранулометрического состава почв:
 1 — насыпной грунт; 2 — супесь; 3 — насыпной грунт, под которым супесь; 4 — легкий суглинок; 5 — средний суглинок; 6 — песок; 7 — тяжелый суглинок; 8 — насыпной грунт, под которым суглинок.

Функциональные зоны:

Т* — транспортная, П* — промышленная, Р* — рекреационная, С* — селитебная

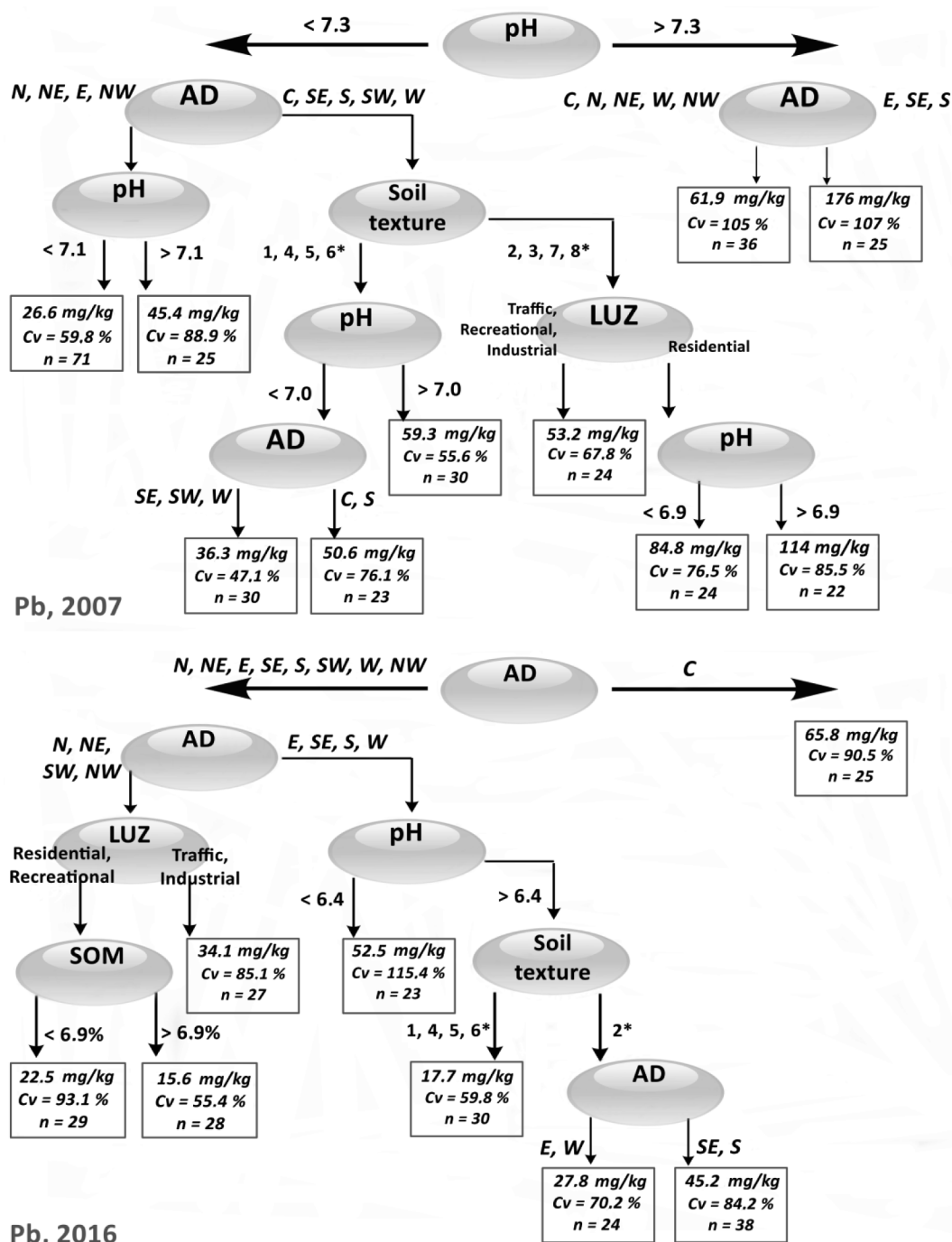


Figure 7. Natural and anthropogenic factors (in ovals) distribution of Pb (in boxes) in the soil cover of Moscow. The mean concentration of Pb, the coefficient of variation Cv and the number of sampling points *n* are given for each terminal node.

Gradations of soil texture:
1 — filled soil; 2 — sandy loam; 3 — sandy loam underlain by filled soil; 4 — light loam; 5 — medium loam; 6 — sand; 7 — clay; 8 — loam underlain by filled soil.

Land-use zones:
residential, traffic, industrial, recreational

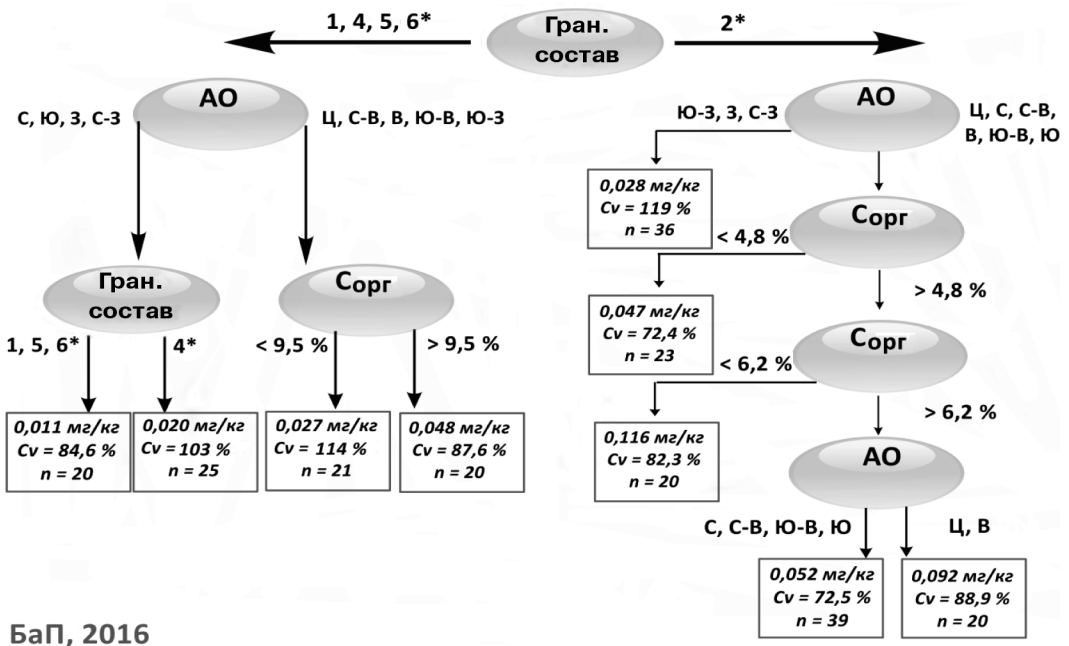
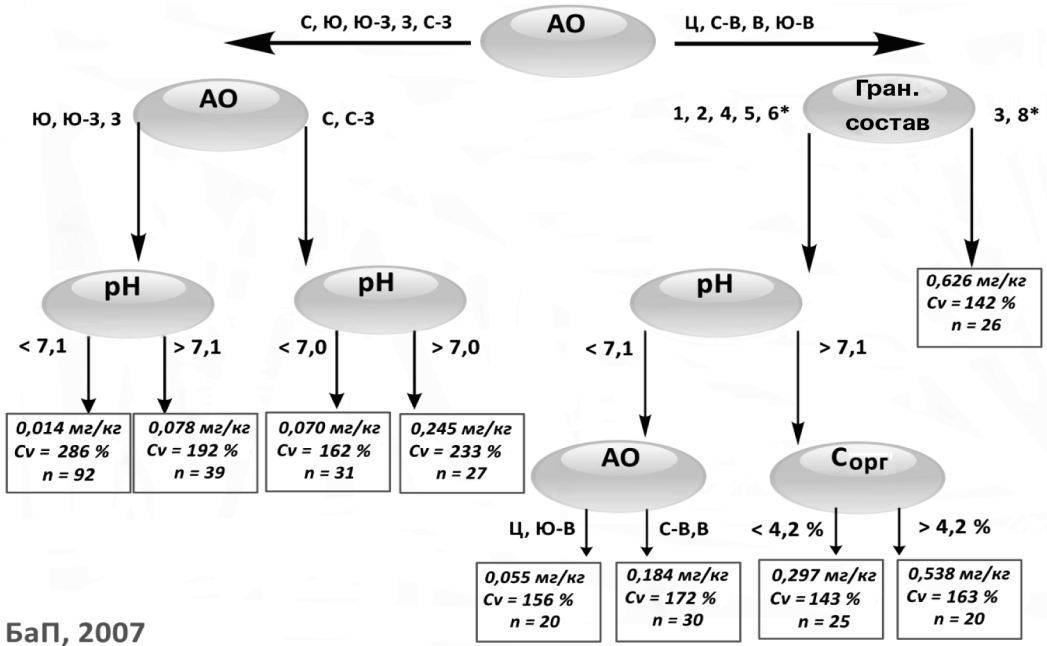


Рис. 8. Природно-антропогенные факторы (в овалах) распределения БаП (в прямоугольниках) в почвенном покрове Москвы.

Градации гранулометрического состава почв:

1 — насыпной грунт; 2 — супесь; 3 — насыпной грунт, под которым супесь; 4 — легкий суглинок; 5 — средний суглинок; 6 — песок; 7 — тяжелый суглинок; 8 — насыпной грунт, под которым суглинок.

Функциональные зоны:

T* — транспортная, П* — промышленная, P* — рекреационная, С* — селитебная

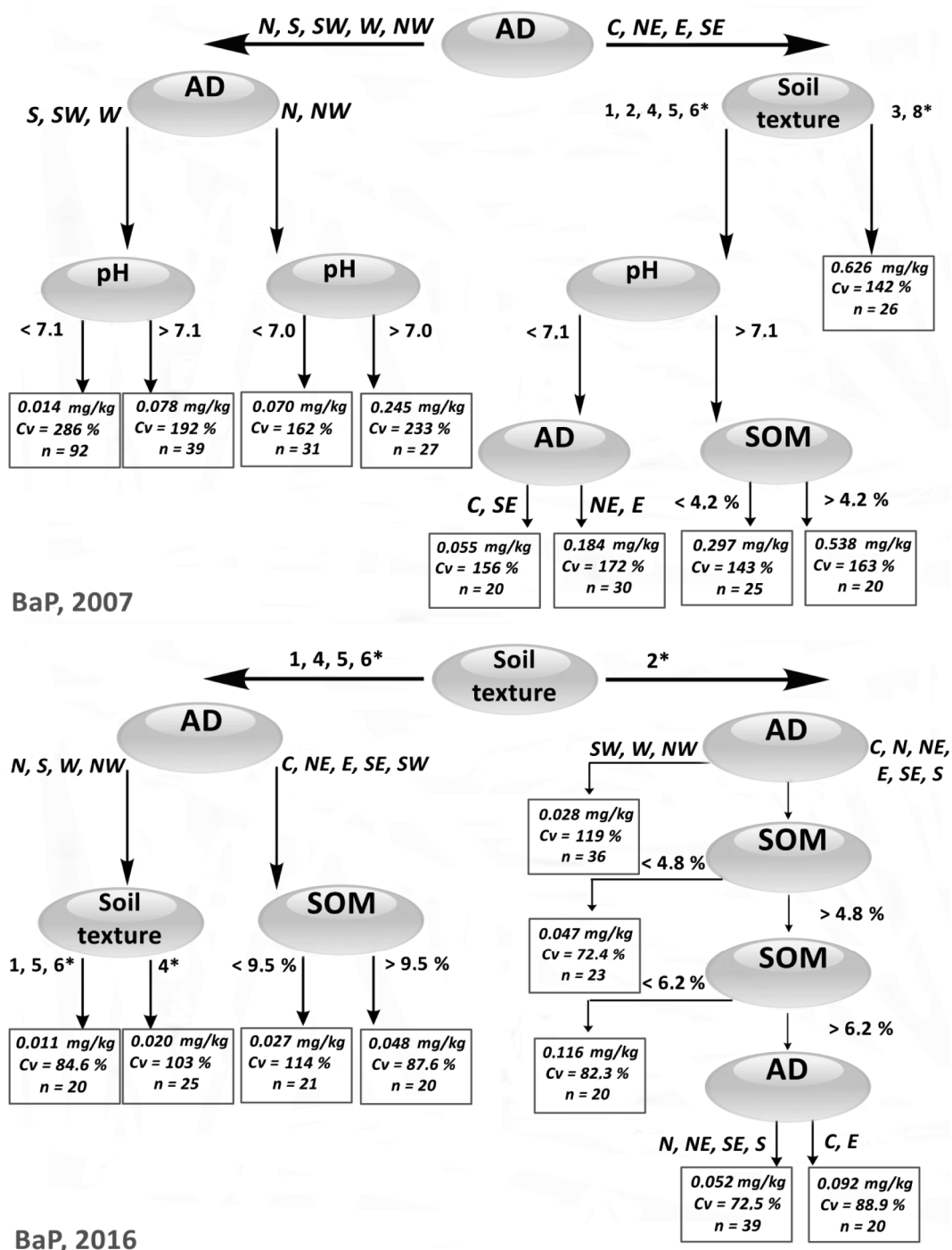


Figure 8. Natural and anthropogenic factors (in ovals) distribution of benzo(a)pyrene (in boxes) in the soil cover of Moscow.

Gradations of soil texture:

- 1 — filled soil; 2 — sandy loam; 3 — sandy loam underlain by filled soil;
- 4 — light loam; 5 — medium loam; 6 — sand; 7 — clay; 8 — loam underlain by filled soil.

Land-use zones:

- residential, traffic, industrial, recreationa

Наименьшее содержание BaП характерно для насыпных грунтов и средне-суглинистых почв, наиболее чистые АО — ЮАО, ЮЗАО и ЗАО.

Оценка эколого-геохимического состояния почв города. Для оценки экологической опасности загрязнения почв использовались гигиенические нормативы — ПДК (для Cu, Zn, Ni, Pb, Hg и BaП) и ОДК (для As и Cd) [31; 32].

По данным 2007 г., в промышленной ФЗ нормативы превышены в 93 % точек (29 из 31), лидируют Zn и Pb (40 %), Zn (20 %) и Zn и BaП (7 %). В рекреационной ФЗ превышения нормативов зафиксированы в 77 % (33 из 43) точек, в 40 % — по Zn и Pb, в 20 % — по Zn, Pb и BaП, в 13 % — по Zn. Наиболее загрязненный округ выделить не удалось, а все «чистые» точки рекреационной зоны расположены в ЗАО, в СЗАО находится одна «чистая» точка. В транспортной ФЗ 70 % (30 из 43) точек имели превышения нормативов по одному или нескольким поллютантам. Лидеры по загрязнению — BaП (19 %) и ассоциация BaП — Zn — Pb (31 %). В транспортной зоне СВАО и СЗАО все точки пробоотбора имели превышения по одному или нескольким поллютантам. Около половины «чистых» точек расположены в ЮАО. В селитебной ФЗ 91 % (175 из 193) точек с превышением ПДК/ОДК, в основном по Zn и Pb (27 %), Zn, Pb и BaП (25 %) и BaП (18 %). Жилая зона наиболее загрязнена в ЮВАО (в 100 % точек опробования), а также в ВАО, ЗАО, САО, ЮАО, ЮЗАО (более 90 % точек с превышением нормативов по одному или нескольким поллютантам). Таким образом, в 2007 г. лидерами по загрязнению почв Москвы были Zn (с частотой превышения ПДК 70 %), Pb (60 %) и BaП (44 %). Превышения по Hg выявлены в 1 % точек, а содержание в почвах Ni было ниже ПДК.

В 2016 г. в промышленной ФЗ частота превышения нормативов уменьшилась до 80 %. Приоритетными поллютантами остались BaП (16,7 %) и Zn — BaП (16,7 %). В СВАО и ВАО все 100 % точек опробования имеют превышения нормативов, в ЮВАО и САО — более 90 %. Наименее загрязненный округ — ЗАО, в котором располагается половина «чистых» точек. В рекреационной ФЗ частота превышения гигиенических нормативов снизилась до 74 % (в 22 % случаев — по Zn и BaП). В трех округах (ЦАО, САО и ВАО) нормативы превышены повсеместно. В СЗАО нормативы не превышались ни по одному из поллютантов, в нем расположена половина всех «чистых» точек столицы, что связано с влиянием национального парка «Лосиный остров». В транспортной ФЗ количество превышений гигиенических нормативов снизилось до 67 %. Большинство точек загрязнены Zn, Pb и BaП. В ЦАО и ВАО превышения ПДК/ОДК наблюдались повсеместно, треть «чистых» точек опробования расположена в ЮАО. В селитебной зоне частота превышений ПДК/ОДК снизилась до 76 % (22 % точек имели превышения по Cu, Zn, Pb, BaП, 18 % точек — Zn, Pb, BaП, 14 % — Zn и BaП). В жилой зоне ЦАО гигиенические нормативы превышены в 100 % точек, в ВАО, ЮВАО и ЗАО — в более 90 % точек. Наименее загрязнена жилая зона ЮАО, где находится почти треть всех «чистых» точек. Таким образом, в 2016 г. по частоте превышения ПДК поллютанты можно расположить в ряд: BaП (62 %) > Zn (50 %) > Pb (37 %) > Cu, As, Cd. Содержание Ni и Hg нигде не превышает ПДК.

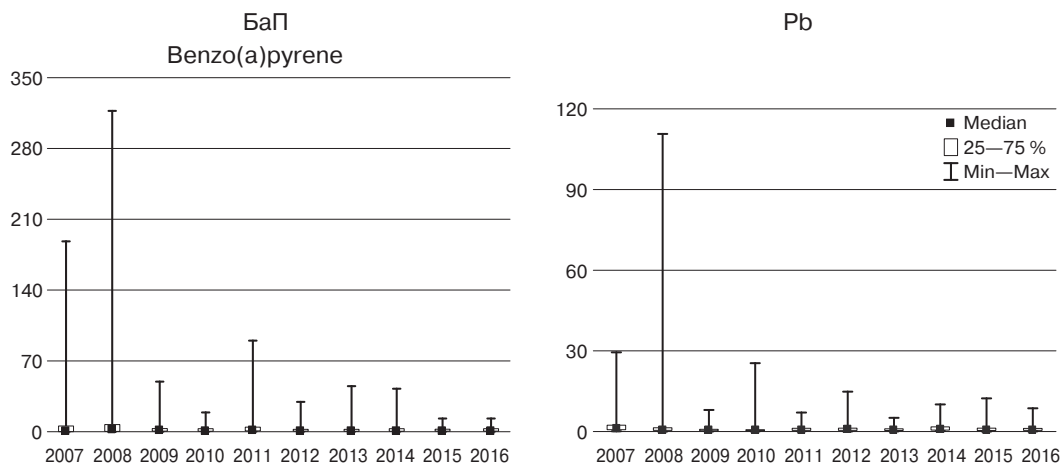


Рис. 9. Динамика коэффициентов экологической опасности K_0
[**Figure 9.** Dynamics of environmental hazard indices K_0]

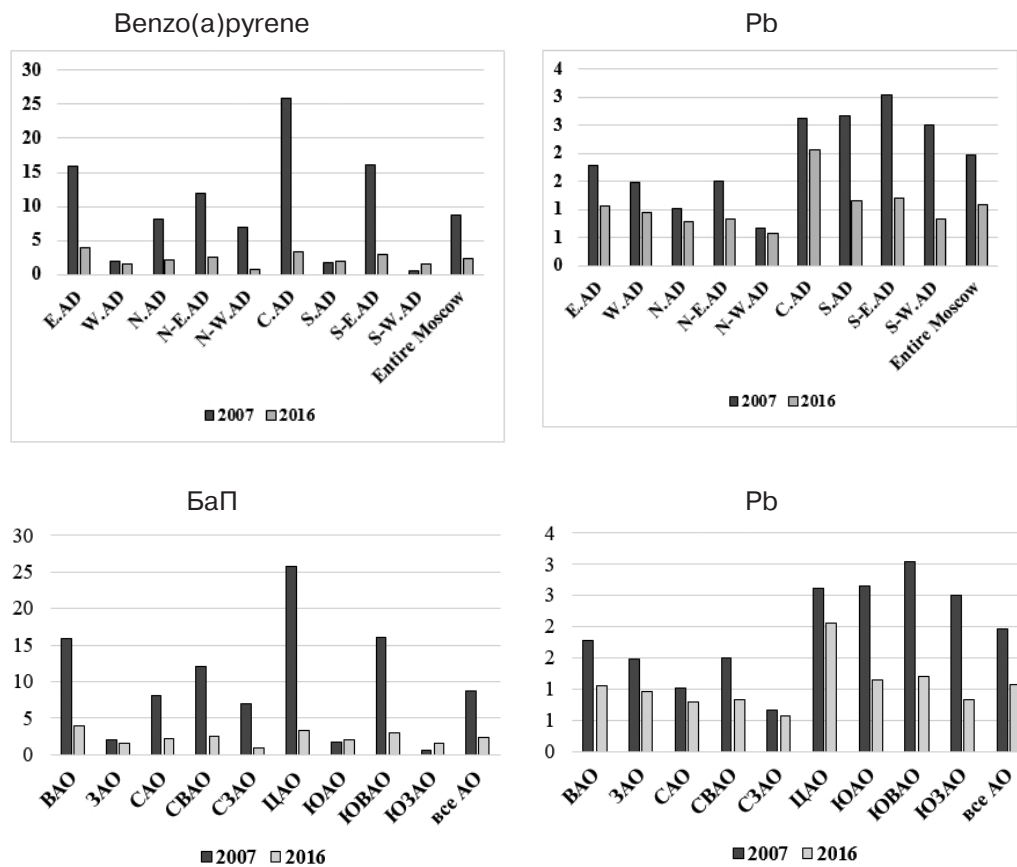


Рис. 10. Изменение средних коэффициентов экологической опасности K_0
по административным округам г. Москвы за 2007—2016 гг.
[**Figure 10.** Change in the average indices of environmental hazard K_0 for administrative
districts of Moscow in 2007—2016]

Наибольшая кратность превышения норматива у BaP: в 2007 г. в селитебной зоне ЮВАО $K_0 = 188$, в селитебной зоне ЦАО — 170 и в промышленной зоне СЗАО — 134. В 2008 г. эти превышения достигли максимальных значений за все время наблюдений: в селитебной зоне ЮВАО $K_0 = 317$, в промышленной зоне ВАО — 282, в рекреационной зоне ЮВАО — 199, в транспортной ЦАО — 174 (рис. 9). Второе место по кратности превышения ПДК занял Pb: в 2007 г. в селитебной зоне ЮАО $K_0 = 29$, в транспортной зоне ЮВАО — 14, в селитебной зоне ВАО и ЮЗАО — 11. В 2008 г. зарегистрирован пик $K_0 = 111$ в селитебной зоне СВАО. К 2016 г. максимальные значения K_0 у BaP уменьшились до 12–13, т.е. более чем в 100 раз, а у Pb — до 3–8 (рис. 9). Средние значения K_0 для BaP за последнее десятилетие понизились во всех округах, за исключением ЮАО и ЮЗАО, а Pb — на всей территории города (рис. 10).

Выводы

Анализ многолетней динамики содержания поллютантов в почвах отдельных АО Москвы показал двукратное увеличение содержания Cu, Cd, As в ЦАО и Cd в ЗАО и СЗАО, а также As в САО, СВАО и ВАО в 1,4–2,3 раза. Во всех АО наметилась тенденция к снижению загрязнения Zn, Pb и Hg. По сравнению с 2007 г. в 2016 г. среднее содержание всех ТММ в почвах города уменьшилось или осталось неизменным, за исключением As. Концентрация BaP во всех округах, кроме ЮАО и ЮЗАО, уменьшилась в 4–8 раз. Наблюдаемое уменьшение содержания ТММ и BaP в почвах Москвы может быть обусловлено значительным сокращением выбросов от автотранспорта и промышленных источников. Однако говорить об улучшении экологической ситуации в Москве преждевременно, поскольку при ежегодном мониторинге городских почв такие опасные ТММ как Sb, Mo, W, Cr, V не определяются.

Пространственное распределение ТММ и BaP в почвах Москвы определяется в первую очередь количеством и геохимической специализацией источников загрязнения, которые сильно различаются по административным округам. Центральный, Восточный, Юго-Восточный округа лидируют по загрязнению Cu и Pb, особенно в щелочных почвах. Центральный и Юго-Восточный округа выделяются по загрязнению Hg, также наиболее выраженному в щелочных почвах. Центральный, Северо-Восточный, Юго-Восточный и Южный округа наиболее загрязнены Zn, количество которого увеличивается с ростом pH, и Cd, который интенсивно аккумулируется в органическом веществе. Почвы тяжелого гранулометрического состава в Юго-Восточном, Южном и Юго-Западном округах наиболее сильно обогащены Ni. Северо-Восточный, Юго-Восточный и Западный округа отличаются высокими концентрациями As, особенно в почвах легкого грансостава с высоким содержанием органического вещества. По содержанию BaP лидирует Восточный округ, за ним следуют Центральный, Северо-Восточный и Юго-Восточный. Содержание поллютантов в почвах разных ФЗ различается слабо.

Частота превышения гигиенических нормативов к 2016 г. уменьшилась. В транспортной зоне она стала меньше на 3 %, в основном за счет Zn, Pb и BaP. Наибольший антропогенный пресс испытывают транспортные зоны ЦАО и ВАО, наименьший — ЮАО. Количество загрязненных Cu — Zn — Pb — BaP точек в

селитебной зоне уменьшилось на 15 %, наиболее загрязнены почвы ЦАО, ВАО, ЮВАО, ЗАО, наименее — ЮАО. Экологическая ситуация в рекреационной зоне также несколько улучшилась за счет уменьшения на 3 % частоты превышений ПДК/ОДК Zn и BaP. Наиболее чистые рекреационные территории в СЗАО и ЗАО, наиболее загрязненные — в ЦАО, САО и ВАО. В промышленной зоне частота превышения нормативов сократилась на 13 %. Основными загрязнителями являются Zn, Pb и BaP с максимальным содержанием в промзонах СВАО, ВАО, ЮВАО и САО. Превышения ПДК максимальны для BaP, однако их кратность за 10-летний период снизилась более чем в 100 раз.

В последнее десятилетие в Москве увеличились объемы работ по санации почв с ликвидацией неорганизованных свалок, озеленением территории города и заменой/рекультивацией поверхностного слоя почв. Однако, как показали наши исследования, использование торфо-песчаных смесей, обогащенных органическим веществом, приводит к ускоренному накоплению в городских почвах многих ТММ, особенно Cd, Cu, As, Ni, Hg. Повышенная аккумулярующая способность рекультивационных смесей на основе песка и торфа отчетливо проявилась у Pb, Zn и BaP, содержание которых в 2016 г. обнаружило тенденцию к повышению в почвах с легким гранулометрическим составом, обусловленным внесением торфо-песчаных смесей. Это делает необходимым оптимизацию состава рекультивационных материалов.

© Кошелева Н.Е., Цыхман А.Г., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Благодарности:

Работа выполнена в рамках сотрудничества географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и Государственного природоохранного бюджетного учреждения «Мосэкомониторинг».

Работа выполнена при финансовой поддержке Русского географического общества (проект РФФИ № 17-05-41024-РГО).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М.* Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016. 276 с.
- [2] *Ачкасов А.И., Варавва К.В., Самаев С.Б.* и др. Интенсивность и тенденции изменения химического загрязнения почв Москвы // *Геоэкологические проблемы Новой Москвы*. М.: Медиа-ПРЕСС, 2013. С. 65–70.
- [3] *Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М.* Многолетняя динамика и факторы накопления бенз(а)-пирена в городских почвах (на примере ВАО Москвы) // *Вестник Московского университета*. Серия 17: Почвоведение. 2011. № 2. С. 25–35.
- [4] *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) // *Вестник Московского университета*. Серия 5: География. 2010. № 1. С. 11–20.
- [5] *Ладонина Н.Н., Ладонин Д.В., Наумов Е.М., Большаков В.А.* Загрязнение тяжелыми металлами почв и травянистой растительности Юго-Восточного округа г. Москвы // *Почвоведение*. 1999. № 7. С. 885–893.
- [6] *Прикладная геохимия*. Вып. 6: Экологическая геохимия Москвы и Подмосковья / ред. Э.К. Буренков, А.А. Кременецкий. М.: ИМГРЭ, 2004. 326 с.

- [7] Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Архангельская А.А., Звягинцев А.М., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Лезина Е.А. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 6. С. 473–482.
- [8] Агапкина Г.И., Чиков П.А., Шелепчиков А.А., Бродский Е.С., Фешин Д.Б., Буханько Н.Г., Балашова С.П. Полициклические ароматические углеводороды в почвах Москвы // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2007. № 3. С. 38–47.
- [9] Официальный сайт ГПБУ «Мосэкомониторинг». URL: <http://www.mosecom.ru> (дата обращения: 14.03.2018).
- [10] О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2016 году / под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПиООС; НИиПИ ИГСП, 2017. 363 с.
- [11] ГОСТ 17.4.1.02–83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008. 5 с.
- [12] Москва в 2000–2013 гг.: краткий статистический справочник. М.: Мосгорстат, 2014. 74 с.
- [13] Вагнер Б.Б., Манучаряц Б.О. Геология, рельеф и полезные ископаемые Московского региона. М.: Изд-во МГПУ, 2003. 82 с.
- [14] Климат Москвы в условиях глобального потепления / под ред. А.В. Кислова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2017. 288 с.
- [15] Саульская Т.Д. Экологические проблемы постиндустриального развития г. Москвы: дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2018. 158 с.
- [16] Битюкова В.Р. Интегральная оценка экологической ситуации городов России // Региональные исследования. 2014. № 4. С. 49–57.
- [17] Битюкова В.Р., Саульская Т.Д. Изменение антропогенного воздействия производственных зон Москвы в постсоветский период // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 3. С. 34–41.
- [18] Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia // Atmosphere. 2018. Vol. 9. No. 2. 24 p. doi:10.3390/atmos9020050.
- [19] Герасимова М.И. География почв России. М.: МГУ, 2007. 312 с.
- [20] Мартыненко И.А., Прокофьева Т.В., Строганова М.Н. Состав и строение почвенного покрова лесных, лесопарковых и парковых территорий г. Москвы // Лесные экосистемы и урбанизация. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. С. 69–90.
- [21] Комитет лесного хозяйства Московской области // Сайт Правительства Московской области. URL: <http://mosreg.ru> (дата обращения: 14.03.2018).
- [22] Махрова А.Г. Субурбанизация и постсубурбанизация в условиях развитой агломерации (на примере Московской столичной агломерации) // Экономика и география. СПб.: Междунар. центр соц.-эконом. исслед. «Леонтьевский центр», 2013. С. 211–237.
- [23] Единая межведомственная информационно-статистическая система. URL: <http://fedstat.ru> (дата обращения: 14.04.2018).
- [23] Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП Филимонов, 2014. 560 с.
- [25] Охрана окружающей среды в России: стат. сб. / Федеральная служба государственной статистики. М., 2016.
- [26] Саульская Т.Д. Реновация производственных зон Москвы и ее экологическая оценка // Известия РАН. Серия географическая. 2018. № 1. С. 77–88.
- [27] Прокофьева Т.В., Мартыненко И.А., Иванников Ф.А. Систематика почв и почвообразующих пород Москвы и возможность их включения в общую классификацию // Почвоведение. 2011. № 5. С. 611–623.
- [28] Кошелева Н.Е., Корляков И.Д., Хайбрахманов Т.С. Условия формирования и параметры аномалий тяжелых металлов и металлоидов в почвенном покрове Восточного округа Москвы // Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых: мат-лы межд. науч. конф. Минск, 2017. С. 87–90.

- [29] Состояние почвенного покрова города Москвы / Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. URL: http://www.dpioos.ru/eco/ru/condition_soil (дата обращения: 14.03.2018).
- [30] *Саен Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П.* и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- [31] ГН 2.1.7.2041-06. ПДК химических веществ в почве. М.: Издательство стандартов, 2006. 14 с.
- [32] ГН 2.1.7.2511-09. ОДК химических веществ в почве. М.: Издательство стандартов, 2009. 11 с.
- [33] *Rawls W.J., Pachepsky Ya.A.* Using field topographic descriptors to estimate soil water retention // *Soil Science*. 2002. Vol. 167. No. 6. Pp. 423–435.
- [34] *Водяницкий Ю.Н.* Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // *Почвоведение*. 2013. № 7. С. 871–881.
- [35] *Судницын И.И., Куренина И.И., Фронтасьева М.В., Павлов С.С.* Химический состав почв г. Москва и г. Дубна // *Агрохимия*. 2009. № 7. С. 66–70.
- [36] *Ладонин Д.В.* Элементы платиновой группы в почвах и уличной пыли Юго-Восточного административного округа г. Москвы // *Почвоведение*. 2018. № 3. С. 274–283.
- [37] *Власов Д.В.* Геохимия тяжелых металлов и металлоидов в ландшафтах Восточного округа Москвы: дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2015. 160 с.
- [38] Восток — запад Москвы: пространственный анализ социально-экологических проблем / под ред. Н.С. Касимова. М.: Географ. ф-т МГУ, 2016. 70 с.
- [39] *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768 с.
- [40] *Водяницкий Ю.Н.* Сродство тяжелых металлов и металлоидов к фазам-носителям в почвах // *Агрохимия*. 2008. № 9. С. 87–94.
- [41] *Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Лобанов А.А.* Индикационное значение соотношений полициклических ароматических углеводородов в системе снег — почва при разных условиях землепользования // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2017. № 5. С. 24–31.
- [42] *Лодыгин Е.Д., Чуков С.Н., Безносиков В.А., Габов Д.Н.* Полициклические ароматические углеводороды в почвах Васильевского острова (Санкт-Петербург) // *Почвоведение*. 2008. № 12. С. 1494–1500.
- [43] *Faure P., Landais P., Schlepp L., Michels R.* Evidence for Diffuse Contamination of River Sediments by Road Asphalt Particles // *Environ. Sci. Technol*. 2000. Vol. 34. Pp. 1174–1181.

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 15.03.2018

Дата принятия к печати: 15.04.2018

Для цитирования:

Коселева Н.Е., Цыхман А.Г. Пространственно-временные тренды и факторы загрязнения почвенного покрова Москвы // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2018. Т. 26. № 2. С. 207–236. DOI 10.22363/2313-2310-2018-26-2-207-236

Сведения об авторах:

Коселева Наталья Евгеньевна — доктор географических наук, ведущий научный сотрудник кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. *Контактная информация:* e-mail: natalk@mail.ru

Цыхман Анжела Гаджикеримовна — магистр кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. *Контактная информация:* e-mail: angelagadjikerimova@mail.ru

Spatial-temporal trends and factors of soil cover pollution in Moscow

N.E. Kosheleva, A.G. Tsykhman

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie gory St., Moscow, 119991, Russian Federation

The distribution and factors of heavy metal and metalloid (HMM) and benzo(a)pyrene (BaP) accumulation were studied in soils of 9 administrative districts (ADs) of Moscow, according to monitoring data in more than 2200 points for 2007–2016, accomplished by the State environmental institution “Mosekomonitring”. The main physicochemical properties (pH, organic matter C_{org} and texture), the total content of Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, Hg, As and BaP in soil samples were determined, land-use zoning of sampling sites was carried out and monoelemental geochemical maps were compiled. A twofold increase in the content of Cu, Cd, As in the Central AD (CAD) and Cd in the Eastern AD (EAD) and the North-Eastern (NEAD), as well as As in the CAD, NEAD and EAD was established; in all the ADs the soil pollution with Zn, Pb and Hg has been reduced. Concentration of BaP in almost all the districts decreased by 4–8 times. Anthropogenic and soil-geochemical factors of accumulation and dispersion of pollutants were determined using the regression tree method. Spatial factor is the most significant, because the quantity and geochemical specialization of pollution sources vary greatly in different parts of the city. The spatial geochemical heterogeneity of the urban soils caused by atmospheric fallouts is enhanced due to the influence of physical and chemical properties of soils: a rise in pH and C_{org} values leads to an increase in the content of Cu, Zn, Pb, Hg and Cd, As, respectively; changes in the texture affect the content of Zn, Ni, Cd, As and BaP. Comparison with MPCs/TPCs showed that the traffic zone is influenced by the greatest anthropogenic press in CAD and EAD, the residential one — in the CAD, EAD, South-Eastern and Western ADs, the recreational — in the CAD, EAD and Northern AD, the industrial — in the Eastern, South-Eastern, North-Eastern, and Northern ADs. By 2016, the MPCs/TPCs of pollutants in the urban soils were violated less frequently.

Keywords: soil pollution, heavy metals and metalloids, benzo(a)pyrene, urban landscapes, land-use zoning, Moscow, physicochemical properties, regression analysis, maximum permissible concentration (MPC), tentative permissible concentration (TPC)

REFERENCES

- [1] Kasimov NS, Vlasov DV, Kosheleva NE, Nikiforova EM. *Geochemistry of landscapes in the Eastern Moscow*. Moscow: APR Publ.; 2016.
- [2] Achkasov AI, Varava KV, Samaev SB, et al. Intensity and trends of chemical contamination in soils of Moscow. *Geoecological problems of New Moscow*. Moscow: Media PRESS Publ.; 2013. p. 65–70.
- [3] Kosheleva NE, Nikiforova EM. Multiyear dynamics and factors of accumulation of benzo(a)-pyrene in urban soils (on the example of the Eastern Administrative District, Moscow). *Moscow University Soil Science Bulletin. Serie 17: Pochvovedenie*. 2011;66(2): 65–74.
- [4] Nikiforova EM, Kasimov NS, Kosheleva NE, Novikova OV. Spatio-temporal trends in lead compounds pollution of urban soils and plants (on the example of the Eastern Administrative District, Moscow). *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya: Geografiya*. 2010;1: 11–20.
- [5] Ladonina NN, Ladonin DV, Naumov EM, Bolshakov VA. Contamination of soils and herbaceous vegetation with heavy metals in the South-Eastern Administrative District of Moscow. *Eurasian Soil Science*. 1999;32(7): 799–807.
- [6] Burenkov AK, Kremenetskii AA. (eds.) *Applied geochemistry. Issue 6. Environmental geochemistry of Moscow and Moscow region*. Moscow: IMGRE Publ.; 2004.

- [7] Kuznetsova IN, Glazkova AA, Shalygina IYu, Nahaev MI, Arkhangelskaya AA, Zvyagintsev AM, Semutnikova EG, Zakharova PV, Lesina EA. Seasonal and diurnal variability of particulate matter PM10 in surface air of Moscow habitable districts. *Optika atmosfery i okeana*. 2014;27(6): 473–482.
- [8] Agapkina GI, Chikov PA, Shelepchikov AA, Brodskii ES, Feshin DB, Bukhan'ko NG, Balashova SP. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Moscow. *Moscow University Soil Science Bulletin. Serie 17: Pochvovedenie*. 2007;62(3): 149–158.
- [9] State environmental organization “Mosekomonitring”. Available from: <http://www.mosecom.ru>
- [10] Kulbachevsky AO. (ed.) *Report on the state of the environment in Moscow in 2016*. Moscow: DPiOOS Publ.; NIIPI IGCP Publ.; 2017.
- [11] *GOST (State Standard) 17.4.1.02.—83: Nature Protection. Soils. Classification of Chemicals for Pollution Control*. Moscow: Izd. Standartov Publ.; 2008.
- [12] *Moscow in 2000—2013: Brief statistical guide*. Moscow: Mosgorstat Publ.; 2014.
- [13] Wagner BB, Manucharyants BO. *Geology, topography and mineral resources of the Moscow region*. Moscow: Publishing house of Moscow State Pedagogical University; 2003.
- [14] Kislov AV. (ed.) *The climate of Moscow in the conditions of global warming*. Moscow: MSU Publishing House; 2017.
- [15] Saulskay TD. *Environmental problems of postindustrial development of the Moscow city*. Moscow: MSU Publ.; 2018.
- [16] Bityukova VR. Integral assessment of ecological situation in Russian cities. *Regional studies*. 2014;32(4): 49–57.
- [17] Bityukova VR, Saulskay TD. Change in anthropogenic impact of industrial zones of Moscow in the post-Soviet period. *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya: Geografiya*. 2017;3: 34–41.
- [18] Varentsov M, Wouters H, Platonov V, Konstantinov P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: a modeling study for multiple summers over Moscow, Russia. *Atmosphere*. 2018;9(2): 24. doi:10.3390/atmos9020050.
- [19] Gerasimova MI. *Geography of soils in Russia*. Moscow: Moscow State University Publ.; 2007.
- [20] Martynenko IA, Prokofieva TV, Stroganova MN. The composition and structure of the soil cover of forest, parkland and park zones of Moscow. In: *Forest ecosystems and urbanization*. Moscow: The partnership of scientific publications KMK Publ.; 2008. p. 69–90.
- [21] Moscow region Government website. *Committee of forestry of the Moscow region*. Available from: <http://mosreg.ru> (accessed: 14.03.2018).
- [22] Makhrova AG. Suburbanization and postsuburbanization within the developed Metropolitan area (on the example of the Moscow Metropolitan area). In: *Economics and geography*. Saint Petersburg: International social-economic research center «Leontiev center» Publ.; 2013. p. 211–237.
- [23] General interdepartmental information and statistical system. Available from: <http://fedstat.ru> (accessed: 14.04.2018).
- [24] Kasimov NS. (ed.) *The regions and cities of Russia: integrated assessment of the environment state*. Moscow: IP Filimonov Publ.; 2014.
- [25] Federal agency of state statistics. *Environmental protection in Russia. Statistical book*. Moscow; 2016.
- [26] Saulskay TD. Renovation of industrial zones in Moscow and environmental assessment. *Izvestiya RAS. Geographical series*. 2018;1: 77–88.
- [27] Prokof'eva TV, Martynenko IA, Ivannikov FA. Classification of Moscow soils and parent materials and its possible inclusion in the classification system of Russian soils. *Eurasian Soil Science*. 2011;44(5): 561–571.
- [28] Kosheleva NE, Korlyakov ID, Khaybrakhmanov TS. Conditions of formation and parameters of anomalies of heavy metals and metalloids in the soil cover of the Eastern district of Moscow. In: *Modern problems of geochemistry, geology and prospecting of mineral deposits: materials of the international scientific conference*. Minsk; 2017. p. 87–90.

- [29] Department for environmental management and protection of Moscow. *Condition of soil cover in the Moscow city*. Available from: http://www.dpioos.ru/eco/ru/condition_soil (accessed: 14.03.2018).
- [30] Saet YE, Revich BA, Yanin EP, et al. *Geochemistry of the environment*. Moscow: Nedra Publ.; 1990.
- [31] *Hygienic standards 2.1.7.2041-06. Maximum permissible concentrations (MPCs) of chemical substances in the soils*. Moscow: Standard publishing house; 2006.
- [32] *Hygienic standards 2.1.7.2511-09. Tentative permissible concentrations (TPCs) of chemicals substances in the soils*. Moscow: Standard publishing house; 2009.
- [33] Rawls WJ, Pachepsky YaA. Using field topographic descriptors to estimate soil water retention. *Soil Science*. 2002;167(6): 423–435.
- [34] Vodyanitskii YN. Contamination of soils with heavy metals and metalloids and its ecological hazard (analytic review). *Eurasian Soil Science*. 2013;46(7): 793–801.
- [35] Sudnitsyn II, Kurenina II, Frontasyeva MV, Pavlov SS. Chemical composition of soils in Moscow and Dubna. *Agrochemistry*. 2009;7: 66–70.
- [36] Ladonin DV. Platinum-group elements in soils and street dust of the South-Eastern administrative district of Moscow. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(3): 268–276.
- [37] Vlasov DV. *Geochemistry of heavy metals and metalloids in landscapes of the Eastern district of Moscow*. Moscow: MSU Publ.; 2015.
- [38] Kasimov NS. (ed.) *East — West of Moscow: a spatial analysis of socio-environmental problems*. Moscow: Faculty of geography, MSU Publ.; 2016.
- [39] Perelman AI, Kasimov NS. *Landscape geochemistry*. Moscow: Astreya-2000 Publ.; 1999.
- [40] Vodyanitskii YN. The affinity of heavy metals and metalloids to the phases-carriers in soils. *Agrochemistry*. 2008;9: 87–94.
- [41] Zhidkin AP, Gennadiev AN, Lobanov AA. Indication significance of the relations of individual polycyclic aromatic hydrocarbons in the “snow–soil” system under different land-use conditions. *Vestnik Moskovskogo Unviersiteta. Seriya: Geografiya*. 2017;5: 24–32.
- [42] Lodygin ED, Chukov SN, Beznosikov VA, Gabov DN. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Vasilievsky island (St. Petersburg). *Eurasian Soil Science*. 2008;41(12): 1321–1326.
- [43] Faure P, Landais P, Schlepp L, Michels R. Evidence for diffuse contamination of river sediments by road asphalt particles. *Environ. Sci. Technol*. 2000;34: 1174–1181.

Article history:

Received: 15.03.2018

Revised: 15.04.2018

For citation:

Kosheleva NE, Tsykhman AG. Spatial-temporal trends and factors of soil cover pollution in Moscow. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2018; 26(2): 207–236. DOI 10.22363/2313-2310-2018-26-2-207-236

Bio Note:

Kosheleva Natalya Evgenevna — Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher of the Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Geographical Faculty of Moscow State University. *Contact information:* e-mail: natalk@mail.ru

Tsykhman Anzhela Gadzhikerimovna — Master of the Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Geographical Faculty of Moscow State University. *Contact information:* e-mail: angelagadjikerimova@mail.ru