И.С. Капустина, Н.Е. Кошелева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ БЕНЗ(А)ПИРЕНА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ГОРИЗОНТАХ ПОЧВ Г. СЕРПУХОВА

Для оценки загрязнения поверхностного (0–10 см) горизонта почв г. Серпухова бенз(а)пиреном (БП) летом 2016 г. отобрано 43 почвенных образца. Содержание БП в н-гексановых элюатах измерялось с помощью метода низкотемпературной спектрофлуориметрии Э.В. Шпольского на спектрофлуориметрическом комплексе «Флюорат – Панорама». В отобранных пробах также определены основные физико-химические свойства: pH водной вытяжки, ее удельная электропроводность, содержание органического углерода и гранулометрический состав почв. Среднее содержание БП в поверхностном горизонте городских почв составляет 0,111 мг/кг, что в 74 раз больше, чем в фоновых почвах (0,0015 мг/кг). По степени накопления поллютанта в поверхностных горизонтах почв функциональные зоны образуют ряд: «селитебная усадебная – селитебная многоэтажная – транспортная – промышленная – рекреационная». Выявлены три высококонтрастные аномалии БП, занимающие значительную площадь. В юго-восточной части города две аномалии с максимальным содержанием БП 0,7 и 1,7 мг/кг соответственно сформировались вблизи Серпуховского конденсаторного завода и 250-го завода ЖБИ. Третья аномалия (0,5 мг/кг) приурочена к северной промзоне. Общесанитарный норматив БП в поверхностных горизонтах почв превышен в среднем в 5,6 раза, что свидетельствует о чрезвычайно опасной экологической ситуации в г. Серпухове. Наибольшая кратность превышения ПДК выявлена в селитебной зоне с усадебной (7,5 ПДК) и многоэтажной (6,1 ПДК) застройкой и транспортной зоне (4,8 ПДК). Установлена взаимосвязь накопления БП с природными и антропогенными факторами, влияющими на миграцию и закрепление данного поллютанта в почвах. Основными факторами являются содержание органического углерода, функциональная принадлежность территории и высотная отметка, соответствующая тем или иным геохимическим ландшафтам.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, ПДК, городские почвы, физико-химические свойства, Серпухов, функциональные зоны, факторы накопления.

Бенз(а)пирен (БП) – высокомолекулярное органическое соединение бензольного ряда – относится к группе полициклических ароматических

Капустина И.С., Кошелева Н.Е. Оценка загрязнения и факторы накопления бенз(а)пирена в поверхностных горизонтах почв г. Серпухова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 1. – С. 116–130. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.01.08

Kapustina I.S., Kosheleva N.E. Pollution assessment and accumulation factors of benzo(a)pyrene in topsoils of the city of Serpukhov. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2019. No. 1. Pp. 116–130. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.01.08

углеводородов (ПАУ), его молярная масса 252,32 г/моль. Это токсичное вещество первого класса опасности, обладающее канцерогенными и мутагенными свойствами. БП считается суперзагрязнителем природной среды, который включен Европейским союзом и Агентством по охране окружающей среды США (EPA US) в стандартный список приоритетных токсикантов.

Бенз(а)пирен поступает в почву как из природных источников, в результате трансформации органического вещества почв, так и из техногенных, выбрасывающих продукты сгорания углеводородов. Он также входит в состав органических вяжущих материалов, используемых при строительстве дорог. БП присутствует в дымовых газах, копоти и саже, оседающих на контактирующих с дымом поверхностях, больше всего его в смолистых веществах, содержащихся в продуктах сгорания [1–3].

В настоящее время во многих городах происходит значительное увеличение выбросов одного из крупных источников БП – автотранспорта. Растет число автомобилей, что приводит к расширению сети АЗС, гаражей, моек и станций технического обслуживания. Это вызывает увеличение содержания БП в окружающей среде и, как следствие, в городских почвах, куда он попадает из загрязненного атмосферного воздуха, адсорбируясь на поверхности частиц пыли, аэрозолей и водяного пара. В результате наиболее загрязненными являются почвы транспортных зон, а именно почвы, прилегающие к крупным дорогам [3–5]. Уровень химического загрязнения также довольно велик на парковках, поскольку выхлопные газы прогревающегося двигателя автомобиля сильнее обогащены токсичными веществами, особенно ПАУ, в том числе БП [6].

В 1998–1999 годах на территории Серпухова были проведены комплексные исследования, результаты которых опубликованы в книге «Экологическая ситуация в городе Серпухове и перспективы ее улучшения» [7]. Они включали оценку загрязнения пестицидами, полихлорированными бифенилами, нитратами, фтором и шестью тяжелыми металлами (Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn), оценка загрязнения почв БП в г. Серпухове ранее не проводилась.

Целью работы является оценка загрязнения поверхностного горизонта почв г. Серпухова БП. Для ее достижения решались следующие задачи:

- определить уровни содержания и пространственное распределение БП в почвенном покрове города;
- установить природные и антропогенные факторы, влияющие на миграцию и закрепление БП в поверхностном горизонте почв;
- оценить уровень загрязнения БП почвенного покрова Серпухова.

Объект исследования. Серпухов площадью 32,1 км² является административным центром Серпуховского района, находящегося на юге Московской области. Город расположен на левом берегу реки Оки, в месте впадения в нее реки Нары. Значительная часть территории приурочена к Москворецко-Окской озерно-ледниковой и моренно-эрозионной равнине, сложенной плотными слабопроницаемыми моренными суглинками, местами перекрытыми флювиогляциальными отложениями.

В геоморфологическом отношении исследуемая территория неоднородна, долины рек Оки и Нары хорошо разработаны, склоны асимметричны. Водораздельные участки, приуроченные к автономным ландшафтам (рис. 1) с абсолютными высотами 170–175 м, – террасовидные, очень слабо полого всхолмленные поверхности, незначительно наклоненные к долинам Оки и Нары. На отметках от 117–122 до 160–165 м расположены надпойменные террасы – области выноса и частичной аккумуляции продуктов жидкого и твердого стока (трансэлювиально-аккумулятивные ландшафты). Отметки пойм рек (трансупераквальные ландшафты) могут достигать 117–122 м [7].

Рис. 1. Карта-схема родов элементарных геохимических ландшафтов г. Серпухова с точками отбора проб из поверхностного (0–10 см) горизонта почв

В пределах Московско-Окской моренно-эрозионной равнины преобладают липово-дубовые широколиственные, широколиственно-еловые и сосново-еловые леса [8]. Исследуемый район расположен в зоне смешанных лесов, где распространены дерново-подзолистые почвы [9].

На территории города широко распространены почвы с нарушенным морфологическим профилем. По степени нарушенности выделяются полностью разрушенные при градостроении почвы, частично нарушенные и ненарушенные. Ненарушенные почвы сохранились под естественными лесами. В жилой многоэтажной застройке и промышленной зоне верхний горизонт перемешанный, с примесью строительно-бытового мусора и промышленных отходов, содержит большое количество органического углерода. Значительное количество растений в транспортной и промышленной зоне угнетено из-за большой антропогенной нагрузки. Для почв садово-огородных участков характерны мощный хорошо окультуренный гумусовый горизонт и зернистая структура [7].

Городские почвы находятся под действием химического загрязнения, главным источником которого является промышленность (рис. 2). Машиностроение и металлообработка обеспечивают производство 35 % общего объема промышленной продукции Серпухова, 22 % приходится на пищевую, 21 % на химическую, 10 % на легкую и текстильную отрасли [10].

Рис. 2. Карта функционального зонирования территории г. Серпухова

Другим источником загрязнения города является транспорт: Серпухов представляет собой транспортный узел благодаря выгодному расположению и развитой инфраструктуре. Через Серпухов проходят железнодорожные (магистраль Курского направления Московской железной дороги Москва – Тула) и автомобильные (автомагистраль М2 «Крым» и трасса А108 «Московское Большое Кольцо») дороги.

Для территории Серпухова выполнено функциональное зонирование, поскольку вид использования городских территорий определяет уровень антропогенного воздействия на изучаемый ландшафт и условия формирования геохимических аномалий [11]. Выделено 5 зон: селитебные – многоэтажная и усадебная, промышленная, транспортная и рекреационная (рис. 2), среди которых наибольшие площади занимают селитебные зоны: многоэтажная – 9,3 км², усадебная – 8,2 км². Площадь промышленной зоны также велика и составляет 5,6 км², другие зоны распространены значительно меньше.

Методы и материалы. Почвенно-геохимические исследования на территории Серпухова проводились в июле 2016 года. Опробовался поверхностный (0–10 см) горизонт, поскольку эта часть почвенного профиля является наиболее уязвимой. Методом «конверта» с расстоянием между точками отбора в 3–5 м отобрано 43 смешанных пробы [12]. В качестве фоновых для города использовались пробы из поверхностных горизонтов дерново-подзолистых почв Приокско-Террасного заповедника в 10–12 км к востоку-юго-востоку от Серпухова. Эта территория выбрана в качестве фоновой из-за одинаковых с городом ландшафтно-геохимических условий.

Содержание БП в городских почвах определялось в лаборатории углеродистых веществ биосферы географического факультета МГУ (аналитик Н.И. Хлынина). Образцы почв высушивались без подогрева и просеивались через сито с размером ячеек 1 мм. БП экстрагировался из почв при комнатной температуре сначала н-гексаном, затем хлороформом. Его содержание в н-гексановых элюатах измерялось с помощью метода низкотемпературной спектрофлуориметрии Э.В. Шпольского [13]. Анализ проводился на спектрофлуориметрическом комплексе «Флюорат – Панорама» («Люмэкс», Санкт-Петербург). В отобранных пробах также определены основные физико-химические свойства: pH водной вытяжки (соотношение почва: вода 1:5) с помощью потенциометрического метода pH-метром «Seven S-20-K»; ее удельная электропроводность ЕС с помощью кондуктометра «Seven Easy S30»; содержание органического углерода C_{орг} методом Тюрина с титриметрическим окончанием; гранулометрический состав почв – на лазерном гранулометре «Analysette 22. Laserklasse 1».

Полученные данные обрабатывались в программном пакете «STATISTICA 10»: вычислялись выборочные средние M , максимальные и минимальные значения, стандартное отклонение σ , коэффициент вариации $C_v = \sigma/M$ и др. В пакете S-PLUS методом регрессионных деревьев проанализирована пространственная неоднородность содержания БПв зависимости от природных и антропогенного факторов. Метод позволяет прогнозировать содержание БП в почвах при разных сочетаниях влияющих факторов и оценить их значимость [3].

Карта содержания БП составлялась путем интерполяции полученных данных в программном пакете ArcGIS (модуль ArcMap) методом «Spline (TENSION)». За основу взяты векторные данные из базы Open Street Map.

Оценка экологической опасности загрязнения проводилась путем сравнения содержания БП в городских почвах с предельно допустимой концентрацией, которая составляет 0,02 мг/кг согласно ГН 2.1.7.2041–06. Коэффициент экологической опасности $K_o = C_i/\text{ПДК}$ характеризует кратность превышения ПДК. Степень химического загрязнения БП оценивалась 4 категориями K_o : чрезвычайно опасная (> 5 ПДК), опасная (2–5 ПДК), допустимая (1–2 ПДК) и чистая (от фонового уровня до ПДК).

Трансформация физико-химических свойств почв в городе. По сравнению с фоновыми свойства городских почв значительно изменены (таблица). Происходит сдвиг реакции среды в щелочной диапазон, основная часть почв характеризуется нейтральной и слабощелочной реакцией среды, тогда как фоновые почвы – средне- и слабокислые. Содержание легкорастворимых солей почти в 4–5 раз больше, чем на фоновой территории, что можно объяснить использованием противогололедных реагентов. Гранулометрический состав утяжеляется: наибольшие площади города заняты почвами супесчаного и легкосуглинистого состава, тогда как в фоновых почвах преобладает фракция связного песка.

Увеличено и содержание органического углерода $C_{\text{орг}}$, его среднее содержание в городе составляет 2,5 %, что в 1,3 раза выше фоновых значений. Наибольшее количество $C_{\text{орг}}$ имеют почвы вблизи промзон и в селитебной многоэтажной зоне. В рекреационной и селитебной зонах органическое вещество представлено природными фракциями гумуса [14], а в промышленной зоне в его составе преобладают труднорастворимые органические соединения, которые слабо разрушаемы почвенными микроорганизмами, что усиливает его аккумуляцию. Источниками данных соединений выступают асфальтовое покрытие, выбросы промышленного сектора и автотранспорта [15].

**Физико-химические характеристики поверхностных горизонтов почв
г. Серпухова и фоновой территории в Приокско-Террасном заповеднике**

Функциональ- ныезоны	Среднее значение pH (min–max)	Среднее значение ЕС, мкСм/см (min–max)	Среднее содержание С _{орг} , % (min–max)	Среднее содержание физической глины, % (min–max)
Фоновая	5,2 (4,9–5,4)	31,4 (20,3–49,0)	1,9 (1,8–2)	7,9 (7,1–8,6)
Промышленная	7,4 (6,9–7,7)	140 (101–218)	2,8 (1,2–7,4)	24,2 (7,1–39,9)
Многоэтажная селитебная	7,4 (6,9–7,8)	141 (62,2–205)	2,6 (0,6–7,4)	22,5 (8,7–30,8)
Усадебная селитебная	7,3 (6,6–8,1)	121 (64,7–206)	2,4 (1,1–5,6)	20,1 (5,7–42,9)
Транспортная	7,4 (7,2–7,5)	136 (119–159)	2,3 (1,9–2,7)	17,4 (7,8–31,6)
Рекреационная	7,1 (5,9–7,6)	133 (58,9–214)	2,5 (1,9–3,2)	24,3 (8,3–32,9)

Содержание бенз(а)пирена в фоновых и городских почвах. Среднее содержание БП в фоновых почвах составляет 0,001 5 мг/кг, что значительно ниже ПДК. Таким образом, они относятся к чистой категории и могут быть использованы в качестве эталона сравнения.

В поверхностных горизонтах почв г. Серпухова содержание данного поллютанта составляет в среднем 0,111 мг/кг, превышая фоновое в 74 раза. Среднее содержание БП в почвах города по функциональным зонам неоднородно – от 0,052 мг/кг в рекреационной зоне, что объясняется отсутствием прямых источников БП, до 0,122 мг/кг в многоэтажной селитебной зоне, что связано с выбросами автотранспорта и промышленности (рис. 3). К усадебной зоне приурочен наиболее высокий локальный максимум БП, что, вероятно, обусловлено совокупным воздействием автотранспорта, печного отопления в домах и выбросами Серпуховского конденсаторного завода, который примыкает к данной зоне.

Распределение бенз(а)пирена по территории города. Анализ карты распределения БП в поверхностных горизонтах почв (рис. 4) показал, что территорию города отличает неоднородная контрастная пространственная структура загрязнения. Прослеживаются три ярко выраженные аномалии, занимающие значительную площадь. В юго-восточной части города две аномалии с максимальным содержанием БП 0,7 и 1,7 мг/кг (35 и 85 ПДК соответственно) сформировались вблизи Серпуховского конденсаторного завода и 250-го завода ЖБИ. Третья аномалия (0,5 мг/кг, или 25 ПДК) приурочена к северной промзоне, где размещены НПП СКИЗЭЛ, «Универсальные пищевые технологии», завод Mareven Food Central, Серпуховский механический экспериментальный завод. Ее контрастность усилива-

ется под влиянием Московского шоссе, однако наибольшее воздействие оказывает завод URSA, являющийся самым крупным в России производителем материалов для тепло- и звукоизоляции.

Рис. 3. Диаграмма размаха содержания бенз(а)пирена (мг/кг) в поверхностном горизонте почв разных функциональных зон г. Серпухова

Рис. 4. Содержание БП в поверхностных горизонтах почв г. Серпухова

Экологическая опасность загрязнения городских почв бенз(а)пиреном. Рассматривая превышения санитарно-гигиенического норматива по БП, можно выделить селитебную и транспортную зоны – они являются самыми загрязненными с превышением ПДК в среднем в 7,5, 6,1 и 4,8 раза соответственно. В жилой застройке на юго-востоке и севере Серпухова зафиксированы аномально высокие значения 25–85. Наименее загрязнены рекреационная ($K_o = 2,6$) и промышленная ($K_o = 3,2$) зоны. Среднее по городу превышение общесанитарного норматива БП в почвах составляет 5,6 раза, что свидетельствует о чрезвычайно опасном состоянии городских почв.

Эколого-геохимическое состояние почвенной территории города по СанПиН 2.1.7.1287–03 относится к 4 категориям загрязнения БП: неопасной (41,9 % опробованных точек с содержанием БП ниже ПДК), допустимой (13,9 %, 1–2 ПДК), опасной (18,6 %, 2–5 ПДК) и чрезвычайно опасной (25,6 %, > 5 ПДК). На рис. 5 приведены данные по категориям загрязнения почв БП в каждой функциональной зоне г. Серпухова. В 58,1 % проб содержание БП превышает ПДК, а в 25,6 % проб – более чем в 5 раз.

В усадебной застройке, промышленной и рекреационной зонах практически половину площади (52,9–42,9 %) занимают почвы с неопасным загрязнением БП. В селитебной многоэтажной зоне наибольшую площадь (44,4 %) занимают опасно загрязненные почвы, а в транспортной зоне половина территории относится к чрезвычайно опасной категории загрязнения.

Рис. 5. Частота превышения ПДК по БП в почвах разных функциональных зон г. Серпухова

Влияние природных и антропогенных факторов на загрязнение почв бенз(а)пиреном. При значительном загрязнении БП почв г. Серпухова целесообразно выявить компоненты почв, которые способствуют его

прочному закреплению в верхних горизонтах и тем самым препятствуют миграции из почвенной толщи [2, 3, 16].

В городских условиях разложение БП происходит замедленно, что связано с нейтральной и слабощелочной реакцией среды, при которой он накапливается [17, 18]. Многочисленные опыты показали, что биodeградация высокомолекулярных ПАУ, к которым относится БП, проходит медленнее, нежели низкомолекулярных полиаренов [3, 19].

Для определения роли природных и антропогенного факторов, влияющих на пространственные различия в уровне накопления БП в почвах Серпухова, проведен многофакторный регрессионный анализ. Для этого использованы данные о свойствах почв, определяющих их способность прочно связывать БП (рН, ЕС, содержание $C_{орг}$ и физической глины, оксидов Fe и Mn), а также ландшафтные характеристики – функциональная принадлежность и абсолютная высота территории. Результаты анализа показали связь уровней содержания БП с ведущими факторами, а также позволили объяснить его пространственное распределение в почвенном покрове города.

Интенсивность накопления БП в поверхностном горизонте почв при различных комбинациях влияющих на это факторов характеризует дендрограмма (рис. 6). Наиболее значимым фактором аккумуляции БП является содержание органического углерода. Имеющаяся выборка разбилась на две неравные по объему части. Среднее содержание БП в 7 пробах, где $C_{орг} > 3,07 \%$, составляет 0,33 мг/кг. В остальных пробах при пониженном содержании органики ($< 3,07 \%$) БП в среднем в 3 раза меньше. Это говорит о том, что высокое содержание органического вещества в почвах способствует накоплению БП, что было ранее отмечено и другими авторами [16, 20].

При небольшом ($< 3,07 \%$) содержании $C_{орг}$ аккумуляция БП зависит от принадлежности к той или иной функциональной зоне, что является вторым по значимости фактором (см. рис. 6). Функциональное назначение территории определяет характер и уровень техногенной нагрузки на почвы. Максимальное накопление БП наблюдается в селитебной многоэтажной и в транспортной зонах, поскольку в них сосредоточено наибольшее количество транспорта и дорог с высокой интенсивностью движения. Эти зоны испытывают двойную нагрузку: не только от автотранспорта, но и от выбросов промышленности, которые распространяются воздушным путем и осаждаются в соседних зонах. Меньшее накопление наблюдается в промышленной, усадебной, которая испытывает воздействие прилегающей к ней промышленной зоны, и рекреационных зонах.

Рис. 6. Природные и антропогенные факторы (в овалах) накопления БП в поверхностных горизонтах почв Серпухова. Для конечных узлов (в прямоугольниках) приводятся средняя концентрация БП, коэффициент вариации C_v и число точек опробования n . Функциональные зоны: 1 – промышленная; 2 – селитебная многоэтажная; 3 – селитебная усадебная; 4 – транспортная; 5 – рекреационная

Кроме рассмотренных выше факторов, на закрепление БП заметное влияние оказывает положение в рельефе, которое характеризуется элементарным геохимическим ландшафтом, расположенным в определенном диапазоне высотных отметок. Он определяет формирование и направление миграционных потоков БП, интенсивность и соотношение процессов его выноса, транзита и аккумуляции [11, 21]. Автономные ландшафты (> 171 м) занимают значительную часть левобережья р. Оки, к ним приурочены значительные площади селитебной многоэтажной и транспортной зон. Отсюда происходит вынос БП и его аккумуляция на надпойменных террасах – содержание БП в городских почвах на водораздельных поверхностях в 5 раз меньше, чем на террасах (см. рис. 6).

В промышленной, усадебной и рекреационной зонах также наблюдается перераспределение БП в зависимости от рельефа: наибольшее накопление БП (0,08 мг/кг) характерно для пойм и нижних надпойменных террас (< 148 м). Вдвое меньшее накопление БП в этих зонах наблюдается в верхних частях склонов долины р. Оки (> 148 м), откуда загрязнитель мигрирует в нижележащие геохимические позиции. На высотных отметках более 148 м проявляется действие еще одного фактора – pH. Известно, что рост pH приводит к увеличению прочности закрепления БП почвенными компонентами [18], что наблюдается и в данном случае.

Выводы. Среднее содержание БП в поверхностных горизонтах почв г. Серпухова составляет 0,111 мг/кг, что превышает фоновое значение в 74 раза. Эколого-геохимическое состояние почв города, оцениваемое по содержанию БП, неоднородно. По степени накопления поллютанта в поверхностных горизонтах почв функциональные зоны образуют ряд «сели-тебная усадебная – селитебная многоэтажная – транспортная – промышленная – рекреационная».

Общесанитарный норматив БП в городских почвах превышен в среднем в 5,6 раза, что указывает на чрезвычайно опасное загрязнение почв Серпухова. Максимальная кратность превышения ПДК наблюдается в усадебной (средний $K_0 = 7,5$) и многоэтажной жилой застройке ($K_0 = 6,1$). Загрязнение городских почв БП относится к 4 категориям: неопасной (41,9 % территории с содержанием БП < ПДК), допустимой (13,9 %, 1–2 ПДК), опасной (18,6 %, 2–5 ПДК) и чрезвычайно опасной (25,6 %, > 5 ПДК). Наиболее контрастные аномалии БП ($K_0 = 25 \dots 85$) выявлены вблизи конденсаторного завода, 250-го завода ЖБИ и в северной промзоне.

Концентрация БП в поверхностном горизонте городских почв зависит от их физико-химических свойств (в первую очередь, содержания органического углерода), от техногенной нагрузки, различающейся по функциональным зонам, а также от высотной отметки, определяющей вынос БП из автономных ландшафтов, миграцию в транзитных и формирование зон аккумуляции БП в подчиненных.

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

Библиографический список

1. Никифорова Е.М., Козин И.С., Цирд К. Особенности загрязнения городских почв полициклическими ароматическими углеводородами в связи с влиянием отопления // Почвоведение. – 1993. – № 1. – С. 91–102.
2. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах / А.Н. Геннадиев, Ю.И. Пиковский, В.Н. Флоровская [и др.]. – Изд-во Моск. ун-та, 1996. – 192 с.
3. Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Многолетняя динамика и факторы накопления бенз(а)пирена в почвах (на примере ВАО Москвы) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. – 2011. – № 2. – С. 24–35.
4. Benzo[a]pyrene in urban environments of eastern Moscow: pollution levels and critical loads / N.S. Kasimov, N.E. Kosheleva, E.M. Nikiforova, D.V. Vlasov // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2017. – Vol. 17. – P. 2217–2227. DOI 10.5194/acp-17-2217-2017
5. Global atmospheric emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from 1960 to 2008 and future predictions / H. Shen, Ye Huang, R. Wang, D. Zhu, W. Li, G. Shen, B. Wang, Y. Zhang, Y. Chen, Y. Lu, H. Chen, T. Li, K. Sun, B. Li, W. Liu, J. Liu, S. Tao // Environ Sci Technol. – 2013. – Vol. 47 (12). – P. 6415–6424. DOI:10.1021/es400857z

6. Persistent organic pollutants, heavy metals and radioactivity in the urban soil of Priština City, Kosovo and Metohija / L. Gulan, B. Milenkovic, T. Zeremski, G. Milic, B. Vuckovic // *Chemosphere*. – 2017. – Vol. 171. – P. 415–426. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.064
7. Экологическая ситуация в городе Серпухове и перспективы ее улучшения / под ред. Ф.И. Хакимова, А.Ю. Поповой, А.С. Керженцева. – М.: Полтекс, 2000. – 228 с.
8. Левицкая Н.Н. Критерии и индикаторы для оценки состояния лесов Московской области: дис. ... канд. биол. наук. – М., 2012. – 159 с.
9. Почвы Московской области и их использование / Л.Л. Шишов [и др.]; Почвен. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН. – М., 2002. – 500 с.
10. OpenMP [Электронный ресурс]. – URL: <https://infourok.ru/gorod-serpuhov-istoriya-osobennosti-naseleniya-otraslevooy-sostavpromishlennosti-transportnaya-sistema-ekologicheskaya-situaciya-1062567.html> (дата обращения: 06.09.2018).
11. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрель-2000, 1999. – 768 с.
12. Методические рекомендации по оценке загрязнения городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами / В.А. Большаков, Т.И. Борисочкина, Ю.Н. Водяницкий, З.Н. Кахнович, В.В. Мясников // Почвен. ин-т им. Докучаева. – М., 1999. – 32 с.
13. Алексеева Т.А., Теплицкая Т.А. Спектрофлуориметрические методы анализа ароматических углеводородов в природных и техногенных средах / под ред. Ф.Я. Ровинского. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 215 с.
14. Водяницкий Ю.Н. Органическое вещество в городских почвах // Почвоведение. – 2015. – № 8. – С. 921–931.
15. Evidence for contamination of river sediments by road asphalt particles / P. Faure, P. Landais, L. Schlepp, R. Michels // *Environ. Sci. Technol.* – 2000. – Vol. 34 (7). – P. 1174–1181.
16. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в связи с гумусным и структурным состоянием почв / А.Н. Геннадиев, С.С. Чернянский, Ю.И. Пиковский, Т.А. Алексеева // География и окружающая среда. – СПб.: Наука, 2003. – С. 124–133.
17. Никифорова Е.М., Теплицкая Т.А. Техногенные геохимические аномалии тяжелых углеводородов в почвах северо-запада Русской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 1979. – № 5. – С. 29–36.
18. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 224 с.
19. Degradation of benzo[a]pyrene by *Mycobacterium vanbaalenii* PYR-1 / J.D. Moody, J.P. Freeman, P.P. Fu, C.E. Cerniglia // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2004. – Vol. 70 (1). – P. 340–345.
20. Distributions, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in topsoil at Ji'nan city, China / J. Dai, S. Li, Y. Zhang [et al.] // *Environ. Monit. Assess.* – 2008. – Vol. 147. – P. 317–326. DOI 10.1007/s10661-007-0123-3
21. Геннадиев А.Н., Глазовская М.А. География почв с основами почвоведения. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.

References

1. Nikiforova Ye.M., Kozin I.S., Tsird K. Osobennosti zagryazneniya gorodskikh pochv politsiklicheskimy aromatcheskimy uglevodorodami v svyazi s vliyaniem otopleniya [Main features of urban soils' pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons under the influence of heating]. *Pochvovedeniye*. 1993, no.1, pp. 91–102.
2. Gennadiyev A.N., Pikovskiy Yu.I., Florovskaya V.N. Geokhimiya politsiklicheskich aromatcheskich uglevodorodov v gornykh porodakh i pochvakh [Geochemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons in rocks and soils]. Moscow, Moscow State University, 1996, 192 p.
3. Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. Multiyear dynamics and factors of accumulation of benzo(a)pyrene in urban soils (on the example of Eastern administrative okrug of Moscow). *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2011, vol. 66, no. 2, pp. 65–74.
4. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Vlasov D.V. Benzo[a]pyrene in urban environments of eastern Moscow: pollution levels and critical loads // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, vol. 17, pp. 2217–2227. DOI: 10.5194/acp-17-2217-2017

5. Shen H., Huang Ye, Wang R., Zhu D., Li W., Shen G., Wang B., Zhang Y., Chen Y., Lu Y., Chen H., Li T., Sun K., Li B., Liu W., Liu J., Tao S. Global atmospheric emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from 1960 to 2008 and future predictions // *Environ Sci Technol.* 2013, vol. 47(12), pp. 6415–6424. doi:10.1021/es400857z
6. Gulan L., Milenkovic B., Zeremski T., Milic G., Vuckovic B. Persistent organic pollutants, heavy metals and radioactivity in the urban soil of Priština City, Kosovo and Metohija // *Chemosphere.* Vol. 171. 2017. pp. 415–426. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.064.
7. Ekologicheskaya situatsiya v gorode Serpukhove i perspektivy yeye uluchsheniya [The environmental situation in the city of Serpukhov and the prospects for its improvement] / Eds. F.I. Khakimov, A.Yu. Popova, A.S. Kerzhentsev. Moscow, POLTEKS, 2000, 228 p.
8. Levitskaya N.N. Kriterii i indikatory dlya otsenki sostoyaniya lesov Moskovskoy oblasti [Criteria and indicators for assessing the state of forests in the Moscow region]. Ph. D. thesis Moscow, 2012, 159 p.
9. Pochvy Moskovskoy oblasti i ikh ispol'zovaniye [Soils of the Moscow region and their use]. Moscow, Pochvennyy institut im. V.V. Dokuchayeva RASKHN, 2002, vol. 1. 500 p.
10. OpenMP, available at: <https://infourok.ru/gorod-serpuhov-istoriya-osobennosti-naseleniya-otraslevoy-sostav-promishlennosti-transportnaya-sistema-ekologicheskaya-situatsiya-1062567.html> (accessed in October 06, 2018)
11. Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geokhimiya landshafta [Landscape geochemistry]. Moscow, Astreya-2000, 1999, 768 p.
12. Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke zagryazneniya gorodskikh pochv i snezhnogo pokrova tyazhelymi metallami [Guidelines for the pollution assessment of urban soils and snow cover with heavy metals]. Eds. V.A. Bol'shakov, T.I. Borisochnikina, YU.N. Vodyanitskiy, Z.N. Kakhnovich, V.V. Myasnikov. Moscow, Pochvennyy institut im. Dokuchayeva, 1999, 32 p.
13. Alekseyeva T.A., Teplitskaya T.A., Spektrofluorimetricheskiye metody analiza aromaticeskikh uglevodorodov v prirodnykh i tekhnogennykh sredakh [Spectrofluorimetric methods for the analysis of aromatic hydrocarbons in natural and man-made media]. Pod red. F.YA. Rovinskogo. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981. 215 p.
14. Vodyanitskii Y.N. Organic matter of urban soils: A review. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, no. 8, pp. 802–811. DOI: 10.1134/S1064229315080116
15. Faure P., Landais P., Schlepp L., Michels R. Evidence for contamination of river sediments by road asphalt particles // *Ibid. Environ. Sci. Technol.*, 2000, 34(7), pp. 1174–1181.
16. Gennadiyev A.N., Chernyanskiy S.S., Pikovskiy YU.I., Alekseyeva T.A. Geokhimiya politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov v svyazi s gumusnym i strukturnym sostoyaniyem pochv [Geochemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons as influenced by humus and structural state of the soils]. Saint Petersburg, Nauka, Geografiya i okruzhayushchaya sreda, 2003, pp. 124–133.
17. Nikiforova Ye.M., Teplitskaya T.A. Tekhnogennyye geokhimicheskiye anomalii tyazhelykh uglevodorodov v pochvakh severo-zapada Russkoy ravniny [Technogenic geochemical anomalies of heavy hydrocarbons in the soils of the northwest of the Russian Plain]. *Bulletin of Moscow State University ser. 5, Geografiya.* 1979, no 5, pp. 29–36.
18. Rovinskiy F.YA., Teplitskaya T.A., Alekseyeva T.A. Fonovyy monitoring politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov [Background monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988, 224 p.
19. Moody J.D., Freeman J.P., Fu P.P., Cerniglia C.E. Degradation of benzo[a]pyrene by *Mycobacterium vanbaalenii* PYR-1 // *Appl Environ Microbiol.* 2004, vol. 70(1), pp. 340–345.
20. Dai J., Li S., Zhang Y. et al. Distributions, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in topsoil at Ji'nan city, China // *Environ. Monit. Assess.* 2008. Vol. 147, pp. 317–326. DOI 10.1007/s10661-007-0123-3
21. Gennadiyev A.N., Glazovskaya M.A. Geografiya pochv s osnovami pochvovedeniya [Soil geography with the basics of soil science]. Moscow, Vysshaya shkola, 2008, 464 p.

Получено 2.11.2018

I. Kapustina, N. Kosheleva

POLLUTION ASSESSMENT AND ACCUMULATION FACTORS OF BENZO(A)PYRENE IN TOPSOILS OF THE CITY OF SERPUKHOV

To assess the pollution of the surface (0–10 cm) soil horizon of the city of Serpukhov with benzo(a)pyrene (BaP) 43 soil samples were collected in the summer 2016. The content of BaP in n-hexane eluates was measured using the E.V. Shpolsky method of low-temperature spectrofluorimetry at the “Fluorat-Panorama” spectrofluorimetric complex. The main physical and chemical properties, including pH of the aqueous extract, its specific conductivity, the content of organic carbon and the particle size distribution of the soils were also determined in the samples. The average content of BaP in the urban topsoils is 0.111 mg/kg, which is 74 times more than in the background soils (0.0015 mg/kg). According to the degree of pollutant accumulation in the surface soil layer, the land-use zones form a sequence: residential low-rise > residential multistoried > traffic > industrial > recreational. Three high contrast anomalies of BaP, which occupy a significant area, were identified. In the southeastern part of the city, two anomalies with a maximum BaP content of 0.7 and 1.7 mg/kg respectively were formed near the Serpukhov Capacitor Plant and the 250th Concrete Product Plant. The third anomaly (0.5 mg/kg) is confined to the northern industrial zone. The general sanitary standard of BaP in the surface soil horizons is exceeded 5.6 times on average, which indicates an extremely dangerous environmental situation in the city of Serpukhov. The greatest factor of exceeding the MPC was found in the residential zone with low-rise (7.5 MPC) and high-rise (6.1) housing and in the traffic zone (4.8). An interrelation of the BaP accumulation with natural and anthropogenic factors influencing the migration and fixation of this pollutant in soils was established. The main factors are the content of organic carbon, the type of land use of the territory and the altitude value corresponding to certain geochemical landscape.

Keywords: benzo(a)pyrene, MPC, urban soils, physical-chemical properties, Serpukhov, land-use zones, accumulation factors.

Капустина Ирина Сергеевна (Москва, Россия) – магистрант, кафедра «Геохимия ландшафтов и география почв», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ленинские горы д. 1, e-mail: irinaskapustina@gmail.com).

Кошелева Наталья Евгеньевна (Москва, Россия) – д-р геогр. наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв (119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, e-mail: natalk@mail.ru).

Kapustina Irina (Moscow, Russia) – Graduate Student, Department of Landscape Geochemistry and Geography of Soils, Lomonosov Moscow State University (119991, Moscow, Leninskiye Gory, 1, e-mail: irinaskapustina@gmail.com).

Kosheleva Natalia (Moscow, Russia) – Doctor of Geographical Sciences, Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Geography of Soils (119991, Moscow, Leninskiye Gory, 1, e-mail: natalk@mail.ru).