

---

---

**ДЕГРАДАЦИЯ,  
ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ**

---

---

УДК 614.76

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ  
УГЛЕВОДОРОДОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ  
АВТОТРАНСПОРТНЫХ НАГРУЗОК ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ**

© 2021 г. А. П. Хаустов<sup>а, \*</sup>, Ж. Д. Кенжин<sup>а</sup>, М. М. Редина<sup>а</sup>, А. М. Алейникова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Российский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

\*e-mail: khaustov-ap@rudn.ru

Поступила в редакцию 12.10.2020 г.

После доработки 15.12.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Рассматривается взаимодействие компонентов городского природного комплекса (поверхностный слой почвы, корневая и надземная части травянистых растений) в условиях загрязнения продуктами деятельности автотранспорта. Цель исследования — идентификация зоны влияния источников загрязнения и специфика накопления поллютантов в почвенно-растительных системах с разным уровнем нагрузки. Анализируется распределение и особенности миграции маркерных соединений — 14-ти полициклических ароматических углеводородов (полиаренов, или ПАУ) на территории г. Москвы (кампус Российского университета дружбы народов и прилегающий Юго-Западный лесопарк) в функциональных зонах, испытывающих разные объемы техногенных нагрузок. Почвы рассмотренной территории по WRB — Albic Retisols (Ochric). Пространственное распределение полиаренов в системе поверхностный почвенный слой—корневая часть—надземная часть растений моделировалось с использованием процедур анализа данных и визуализировалось с использованием ГИС-пакета ArcGIS (метод “Торо to Raster”). Оценены эффекты аэрального массопереноса полиаренов в почвенно-растительную систему как основного пути поступления загрязнителей. Выявлены преобладающие полиарены и факторы, обуславливающие объемы их накопления в функциональных зонах исследуемой территории. Генезис полиаренов оценен на основе количественного соотношения их групп. Показаны различия в условиях и динамике накопления полиаренов разными компонентами почв и растений. Результаты предлагается использовать для обоснования требований к организации мониторинга состояния почв на исследуемой территории, для анализа динамики состояния городской территории и обоснования мер по защите городских территорий в условиях транспортной нагрузки.

*Ключевые слова:* ПАУ, индикаторы загрязнения, автомобильный транспорт, мониторинг почв, Albic Retisols (Ochric)

**DOI:** 10.31857/S0032180X21070066

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения состояния городских территорий связана с ухудшением экологических условий в городских агломерациях, прежде всего, за счет активности автомобильного транспорта. Это способствует росту накопления загрязняющих веществ практически во всех естественных средах и, в итоге, сказывается на здоровье горожан под влиянием ухудшающегося качества городской среды.

В исследовании аккумуляции и закономерностей территориального распределения загрязнителей, их миграционных особенностей получил распространение подход, основанный на идентификации маркерных органических соединений — 16-ти ПАУ согласно перечню Агентства по охране окружающей среды США EPA [30]. Для анализа

состояния системы почва–растение огромный интерес представляют процессы пространственного распределения ПАУ. Согласно данным [18], состав массопотоков в системе почва–растение усложняется функционированием ризосферы — мощного преобразователя вещества почв (включая загрязнители, поступающие с атмосферным переносом) в прикорневой зоне благодаря активности микробиоты.

Городские почвенно-растительные системы подвергаются целому комплексу техногенных воздействий, прежде всего, за счет активности промышленных и транспортных источников загрязнения. В условиях Москвы транспортные нагрузки в формировании загрязнений природных сред преобладают (составляют до 93%). Зоны влияния транспортных магистралей зависят от соб-

ственно активности транспорта, специфики загрязняемых систем и особенностей компонентов выбросов. Как правило, исследуются большие городские территории с учетом разнообразия источников загрязнения. Гораздо меньше внимания уделяется импактным исследованиям, позволяющим проводить оценки трансформации загрязнителей на опытных полигонах в зонах четко выраженных источников, например, отдельных транспортных магистралей. В этой связи локальные модели загрязнения характеризуются значительным разнообразием и представляют большой научный интерес. Для идентификации зон влияния техногенных источников необходимо опираться на надежные маркеры, позволяющие четко отнести изучаемый объект к определенному виду загрязнения.

Исследованиям углеводов (УВ) в почвах и растениях в последнее время уделяется значительное внимание. Это связано с их специфическим поведением как в естественных условиях, так и в условиях техногенных ландшафтов [1, 3–11, 16, 20]. Для локальных моделей трудно найти оптимальное сочетание полиаренов, которое позволило бы провести сравнительный анализ поведения динамических компонентов в системе атмосфера–почва–ризосфера–стебли растений в связи со спецификой каждого индивидуального источника загрязнения. Оценка генезиса органических загрязнителей и их количественного распределения между взаимодействующими почвами и растениями – предмет немногочисленных исследований. Количественные характеристики этих процессов, механизмы поглощения, накопления или превращения (детоксикации) канцерогенов растениями представлены в современных публикациях чаще всего в виде оценок отдельных связей. В большей части исследований, посвященных накоплению ПАУ в почвах и растениях, прослеживаются лишь отдельные компоненты потока опасных веществ; вся цепь – от аэрогенного поступления до накопления поллютантов и продуктов трансформации в органах растений – практически не рассматривается. В связи с этим комплексные оценки потоков ПАУ представляют особый интерес.

Несмотря на то, что часть УВ отнесена к стойким органическим загрязнителям, понятие “стойкие” во многом условно. Последние данные свидетельствуют о том, что динамическое звено почвы – растения вовлекает в круговорот практически все вещества, независимо от их генезиса и состава. Возможность более или менее активной трансформации зависит от благоприятности среды для перевода поллютантов в удобную форму для биогеохимических превращений за счет почвенной микробиоты. Однако техногенные нагрузки способны серьезно влиять на активность почв при накоплении и переработке ими ПАУ.

Цель работы – анализ различия взаимодействия компонентов почвенно-растительных систем с потоками ПАУ в различных функциональных зонах кампуса РУДН, выделенных с учетом интенсивности техногенных нагрузок.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория кампуса расположена на территории Обручевского района Юго-Западного административного округа г. Москвы. Исследования проводятся в рамках проекта по экологическому мониторингу кампуса с 2017 г. Проект инициирован в связи с активным участием РУДН в качестве национального координатора во Всемирном рейтинге университетов UI Green Metric World University Ranking. Система экологического мониторинга кампуса включает регулярные обследования территории (33 точки мониторинга на площади 114 га): замеры концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, снеговом покрове, почвах, корневой и надземной частях растений; оценка состояния растительности, уровней акустической нагрузки, электромагнитных излучений и радиационного фона. Это позволило обосновать выделение на территории кампуса и в прилегающем Юго-Западном лесопарке функциональных зон с различными уровнями техногенной нагрузки. В 2019 г. система мониторинга стала центральным объектом внимания при проведении первого тура по устойчивым кампусам мира, который по предложению руководства UI Green Metric проводился в РУДН [17]. Экспериментальный материал получен в результате мониторинга кампуса РУДН и прилегающей территории Юго-Западного лесопарка в период лета-осени 2019 г.

С экологической точки зрения район представляет интерес ввиду более слабой антропогенной нагрузки в сравнении с Восточным и Юго-Восточным округами Москвы. Превалирующее значение здесь имеет автотранспортный прессинг. Согласно проведенным ранее оценкам [5, 6, 12], антропогенная нагрузка на исследуемой территории обусловлена потоком в среднем 16800–19320 автомобилей (легкового, грузового и пассажирского видов транспорта) в сутки, что в соответствии классификацией относится к высокой интенсивности движения на автотрассах [2]. Произведен расчет максимального разового и валового выброса с целью определения превышений норматива в 0.8 ПДК в зоне кампуса. Его величина по ул. Миклухо-Маклая в районе кампуса РУДН составила 64.1 г/т; из них максимальное значение имеет оксид углерода – 50 г/т. Приоритетными загрязнителями также выступают диоксиды азота, сажа.

Почвы на территории лесопарка преимущественно дерново-средне-сильноурбоподзолистые

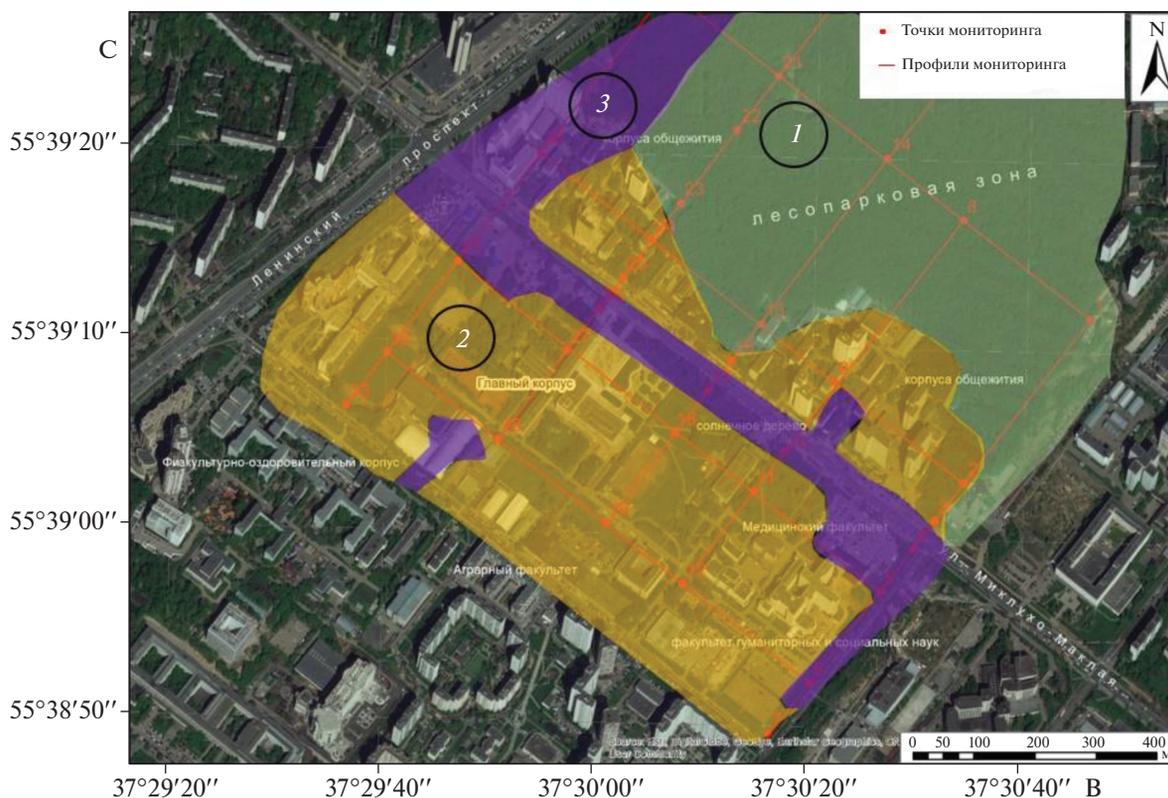


Рис. 1. Схема зонирования исследуемой территории. Зоны: 1 – парковая, 2 – общественно-деловая, 3 – транспортная.

слабо-средненарушенные на моренном покровном суглинке (в соответствии с [28] – Albic Retisols (Ochric)); на территории кампуса – в разной степени нарушенные урбаноземы гумусированные слабо-среднемошные на моренном покровном суглинке [15].

Растительность на территории лесопарка представлена в древесном ярусе преимущественно лиственными растениями с небольшими включениями хвойных пород. Территория кампуса – культивируемые растения, преимущественно газонная растительность и древесная растительность лиственных пород; имеется также преимущественно хвойный участок вблизи главного корпуса университета (юго-западная часть кампуса). В качестве объекта растительности взяты мятлик луговой (*Poa pratensis*), произрастающий в районе лесопарка, и красная овсяница (*Festuca rubra*), произрастающая вдоль автотрасс и административной зоны кампуса, как наиболее распространенные травянистые виды.

Исследуемая территория была поделена на 3 основные зоны с различными уровнями нагрузки: административную зону университета, лесопарковую зону и территорию автотрасс. Через эти зоны построены профили для оценки динамики смены геохимических условий по мере удаления от источника нагрузки. В работе [2] были предва-

рительно обоснованы размеры зон влияния автотрасс на исследуемой территории: от 50 до 600 м в зависимости от магистрали контролируемого вещества (максимум – по сероводороду). В настоящем исследовании они были уточнены благодаря сведениям о состоянии почв и растительности.

На рис. 1 представлена карта-схема районирования территории по интенсивности воздействия автотранспорта: основные профили и точки мониторинга.

**Пробоотбор.** Пробы растительности (*Poa pratensis* и *Festuca rubra*) отобраны 23.10.2019 г. согласно ГОСТ 27262-87. Отбор проб почв проведен в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 методом конверта из поверхностного слоя почвы, глубина изъятия 5–10 см.

**Картографические методы.** При построении карт концентраций ПАУ опробовано несколько моделей из различных картографических пакетов. Все они дали различную степень приближения к фактическим данным, а также конфигурацию изолиний, недостаточно полно отражающую фактическую обстановку техногенной нагрузки за счет выбросов автотранспорта согласно модели рассеивания выбросов [2, 14]. Предпочтение отдано пакету ArcGIS (использован модуль Topo to Raster), основанного на модели ANUDEM (от

Australian National University's Digital Elevation Model – Цифровая модель рельефа Австралийского национального университета). Выбор данного метода для картографирования распространения ПАУ обусловлен стохастическим характером исходных данных. Примеры эффективного применения Tоро to Raster для моделирования окружающей среды представлены в работе Hutchinson et al. [27]. Применение модели ANUDEM предполагает использование дискретизированной методики плоского сплайна с учетом коэффициентов шероховатости рельефа, что позволяет подобранной цифровой модели рельефа следовать резким изменениям земной поверхности. Таким образом, метод максимально учитывает стохастичную природу картографируемого параметра и использует эти знания о поверхностях, накладывая ограничения на процесс интерполяции. Количество входных данных может быть на порядок меньше, чем обычно требуется для адекватного описания поверхности с оцифрованными изолиниями, что в дальнейшем минимизирует затраты на получение достоверных цифровых моделей рельефа.

Для исследуемой территории плотность равномерной входной сети достаточно велика (33 точки на 114 га). Тем не менее, учитывая практическое отсутствие выраженной анизотропии концентраций сумм ПАУ по профилям почвенного покрова, классические методы интерполяции (например, с помощью полиномов) не позволяют получать реальную картину. Поэтому и был выбран вышеназванный модуль, дающий наиболее реальное приближение к фактическим данным.

**Физические и физико-химические характеристики почв** определяли с помощью переносных приборов: температура и влажность – с помощью измерителя влажности и температуры Ada ZHT 100 (6 in 1) A00400 с подключаемым внешним датчиком; pH и Eh – с помощью pH-метра ручного HORIBA LAQUAtwin pH-33. Параметры измеряли in situ одновременно с отбором проб растительности и почв.

**Методы химического анализа почв и растительности.** Целью анализа было определение концентраций ПАУ, включенных в перечень приоритетных по [30]: нафталин (Naph), флуорен (Fluorene), фенантрен (Phen), антрацен (An), флуорантен (Flu), пирен (Py), бенз(а)антрацен (BaA), хризен (Chr), бенз(б)флуорантен (BbFlu), бенз(к)флуорантен (BkFlu), бенз(а)пирен (BaP), дибенз(а, h)антрацен (DbA), бенз(г, h, i)перлен (Bghi), индено(1,2,3-сд)пирен (IP). Компонентный анализ проб почв и растительности на содержание ПАУ был проведен согласно ПНД Ф 16.1:2.2:3. 39-03 “Методика выполнения измерений массовой доли бенз(а)пирена в пробах почв, грунтов, твердых отходов и донных отложений методом ВЭЖХ с использованием жидкостного хроматографа “ЛЮМАХРОМ” с

флуориметрическим детектированием” методом ВЭЖХ. Извлечение ПАУ из проб почв и растений осуществляли методом экстракции субкритическими растворителями с помощью системы ASE-350 (Dionex Corporation, США).

Навеску 1 г представительной и воздушно-сухой пробы изучаемого материала (почвы, растения) помещали в экстракционную ячейку и трижды экстрагировали смесью хлористый метилен : ацетон (1 : 1) при температуре и давлении в ячейке 100°C и 1600 psi (11031 кПа) соответственно. Полученные экстракты концентрировали в аппарате Кудерна–Даниша при температуре в термостате 70°C, затем добавляли 3 см<sup>3</sup> гексана и вновь упаривали до полного удаления хлористого метилена и ацетона. Концентрированный экстракт из пробы объемом 3 см<sup>3</sup> очищали от полярных соединений методом колоночной хроматографии на оксиде алюминия II степени активности по Брокману. В качестве элюента использовали 50 см<sup>3</sup> смеси гексан : хлористый метилен (4 : 1). Элюат концентрировали в аппарате Кудерна–Даниша при температуре в термостате 85°C до объема 5 см<sup>3</sup>, затем добавляли 3 см<sup>3</sup> ацетонитрила и вновь упаривали при температуре 90°C до полного удаления гексана. Концентрированный экстракт анализировали на содержание ПАУ.

Анализ концентрации 14-ти видов ПАУ проводился с использованием жидкостного хроматографа Люмахром ООО “Люмекс”, с пламенно-ионизационным FID детектором, колонка Supelco, LC\_PAN 5 мкм (25 см × 2.1 мм), термостатированная при 30°C, подвижная фаза – ацетонитрил-вода. Весь аналитический объем работ выполнен на базе Института биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

В ходе химического анализа в почвах и растениях идентифицированы 14 ПАУ. Границы относительной погрешности в зависимости от диапазона измерений (при вероятности  $P = 0.95, \pm \delta, \%$ ) составляют для нафталина – 16–50, флуорена – 18–40, фенантрена – 20–50, антрацена – 18–50, флуорантена, пирена – 18–46, бенз(а)антрацена – 20–42, хризена – 22–52, бенз[б]флуорантена – 22–42, бенз[к]флуорантена – 18–48, бенз[а]пирена – 18–50, дибенз[а, h]антрацена – 20–48, бенз[ghi]перилена, индено[1,2,3-сд]пирена – 22–44.

**Анализ взаимодействий в почвенно-растительной системе** проведен на основе коэффициентов концентрации КК – отношений концентрации ПАУ в “принимающей” среде к концентрациям в “отдающей” среде:  $КК_{почва-корень} = \frac{\Sigma ПАУ_{почва}}{\Sigma ПАУ_{корень}}$ ;  $КК_{корень-надземн} = \frac{\Sigma ПАУ_{надземн}}{\Sigma ПАУ_{почва}}$ . Значение  $КК > 1$  свидетельствует о накоплении ПАУ принимающей средой за счет потока из отдающей среды; при  $КК < 1$  можно говорить об отсутствии потока ПАУ между средами.

Отметим, что при расчетах КК следует учитывать потенциально возможную ошибку аналитического определения, что свойственно даже весьма точным современным методам. То есть на практике более уверенно можно говорить о наличии потока при  $КК > 1.3$ , а об отсутствии — при  $КК < 0.7$ .

**Анализ содержания ПАУ в компонентах почвенно-растительной системы и оценку факторов**, определяющих их распределение, проводили с применением процедур корреляционного, кластерного и компонентного анализов — многомерных процедур анализа данных, реализованных в пакете STATISTICA. Данные методы широко представлены в специальной литературе. Они использованы для анализа структуры фракционирования данных, выявления взаимосвязей между объектами и между признаками, определения ведущих факторов накопления и миграции ПАУ в почвах и растениях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Взаимосвязи характеристик геохимической обстановки на территории.** Постановка задачи включала анализ распределения ПАУ в почвах, корнях и в надземных частях растений, а также характеристику изменения состава ассоциаций ПАУ на границе почва—корни и корни—надземная часть. По отношению к таким внешним управляющим факторам как влажность и температура проведенный анализ позволил выявить следующие закономерности.

Рассчитаны коэффициенты корреляции между показателями рН, Eh, температурой и влажностью почв, содержанием индивидуальных 14 ПАУ в почве, корнях и надземной частях растений, а также суммарными значениями концентраций (ΣПАУ) и коэффициентами концентрирования ( $КК_{почва-корень}$ ,  $КК_{корень-стебель}$ ).

Установлено, что величины рН и Eh не имеют выраженных корреляционных связей с перечисленными характеристиками и между собой, хотя во многих работах, включая эксперименты в лабораториях, исследователи находят определенные связи между концентрациями отдельных ПАУ и геохимическими обстановками. Считается, что в кислых и хорошо аэрируемых почвах происходит более интенсивное микробиологическое разложение ПАУ независимо от их структур. Исследованиями [1] для ботанического сада МГУ (примерно сходные условия и виды почв с кампусом РУДН) также не выявлено значимых корреляционных связей с рН и содержанием органического углерода в почвах. Для величины влажности получена единственная значимая отрицательная корреляционная зависимость ( $-0.68$ ) с температурой почв, что вполне закономерно.

Полученные связи (точнее, их отсутствие) вполне объяснимы и предсказуемы. Концентра-

ции ПАУ в средах (гидрофобные соединения с крайне низкой растворимостью в воде, стойкие к фотоокислению) не демонстрируют связей с характеристикой влажности, которая, в свою очередь, находится в обратной зависимости с температурой почв (то есть фактором, непосредственно обеспечивающим испарение влаги). Среди прочих характеристик внутренних связей в массиве данных можно отметить следующие зависимости.

Концентрация ΣПАУ почв находится в более тесной связи с концентрацией ΣПАУ в надземной части ( $r = 0.60$ ), чем ΣПАУ в корнях ( $r = 0.26$ ). Возможно, это связано с доминирующим приходом ПАУ из атмосферы, а также с сезонным депонированием растениями и почвами. Процессы гумификации почв во многом обусловлены приходом вещества из опада, а в случае техногенного загрязнения — привнесом в почвы поллютантов, осаждающихся на надземной части растений с последующим их переводом и фиксацией в верхние почвенные горизонты.

Среди всего набора ПАУ в почвах наиболее независимым от ΣПАУ<sub>почв</sub> является Naph с коэффициентом корреляции  $r = 0.78$  (в отличие от прочих ПАУ с силой связи 0.99–1.00). Однако ΣПАУ<sub>почв</sub> достаточно явно коррелирует с концентрациями в надземных частях An (0.74), Flu (0.74), Py (0.69), BaA (0.61), BkFlu (0.55), IP (0.78).

Содержание ΣПАУ<sub>корень</sub> имеет выраженную корреляционную связь с ΣПАУ<sub>надзем</sub> (0.74). Выраженных корреляционных связей концентраций ПАУ в корневой части с содержаниями в почвах не выявлено, что во многом парадоксально. Объяснением могла бы стать регулирующая роль корней: корень действует как своеобразный фильтр, неспособный впустить в растение больше ПАУ, чем некая величина “емкости”, независимо от их концентраций в окружающей среде. Среди концентраций ПАУ, измеренных в корневой части растений, наиболее “независимы” Naph (корреляция с ΣПАУ<sub>корень</sub> всего 0.19) и Fluorene (0.24); относительно невысока корреляция с DbA (0.44). Для остальных ПАУ коэффициент корреляции составляет 0.72–1.00. Корреляция ΣПАУ<sub>корень</sub> с содержаниями ПАУ в надземной части в целом довольно заметная, 0.55–0.76, за исключением Nap (0.21), Fluorene (0.07), Phen (0.25), DbA (0.26). Этот факт свидетельствует о барьерной функции корневой системы даже по отношению к легким наиболее подвижным полиаренам.

Следует отметить, что для коэффициентов концентрации  $КК_{почва-корень}$ ,  $КК_{корень-стебель}$  значимых корреляционных связей вообще не выявлено. Вероятное объяснение этого — сильное влияние аэриального переноса ПАУ и проникновение их в растительный организм непосредственно через надземные части растений.

*Среднее содержание ПАУ в почвах* по данным измерений на 33 точках на территории кампуса и прилегающей лесопарковой зоны составляет 1022.4 мкг/кг; пределы изменений – от 39.7 мкг/кг до 29936.3 мкг/кг. Преобладающие ПАУ: Py (16.1% от ΣПАУ<sub>почв</sub>) > Flu (15.7%) > BbFlu (11.7%) > BaP (10.6%); содержание прочих соединений меньше 10%. Отметим, что преобладающие ПАУ – это 4-кольцевые соединения (молекулярная масса 202) и 5-кольцевой BbFlu. Анализ взаимосвязей внутри ассоциации ПАУ на основе кластерного анализа (Евклидовы расстояния, метод Варда) показал, что полиарены четко разделяются на группы согласно молекулярным массам: наиболее нетипичным является Naph, выделяется группа 3–4-кольцевых ПАУ и 5–6-кольцевых. Такое распределение в целом традиционно для присутствия ПАУ в средах и обусловлено, прежде всего, физико-химическими свойствами ПАУ, их реакционной способностью и стойкостью в окружающей среде. Отметим, что здесь показаны оценки средних характеристик распределения ПАУ в почвах кампуса. Однако значения концентраций индивидуальных ПАУ и ΣПАУ на конкретных точках мониторинга могут варьировать в довольно широких пределах в зависимости от уровня антропогенной нагрузки (преимущественно транспортной), характеристик почв, состояния микробиоты и растительности, участвующих в деструкции полиаренов. Коэффициент вариации распределения ΣПАУ в почвах на 33 точках мониторинга составил 3.99.

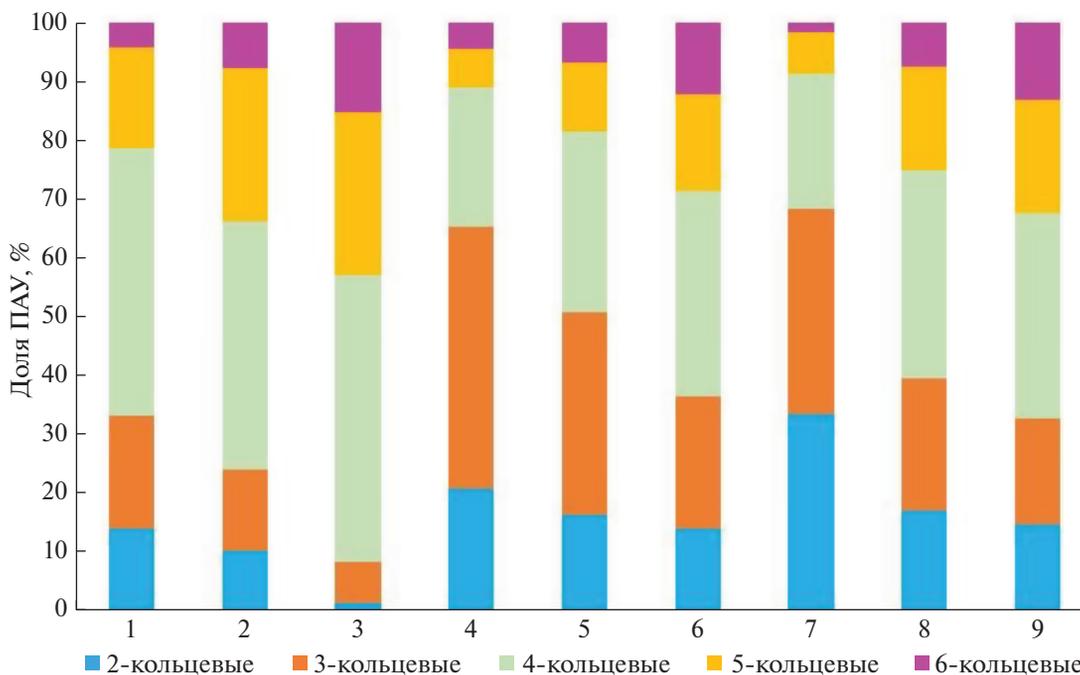
*Концентрации ΣПАУ в корнях растений* практически в 3 раза меньше по сравнению с почвами (в среднем 302.6 мкг/кг при диапазоне 88.5–1316.6 мкг/кг). Наиболее значительные концентрации имеют Naph (18.1% от ΣПАУ<sub>корень</sub>) > Phen (17.8%) > Flu (11.8%) > Py (10.9%). Концентрации прочих ПАУ составляют менее 10%. Такую картину можно объяснить, скорее всего, большей биодоступностью ПАУ с относительно небольшими размерами молекул (2–4 кольца), причем An благодаря форме молекулы и специфическим физико-химическим свойствам в гораздо меньшей степени растворим, а значит, и менее доступен для растительности. Взаимосвязи внутри ассоциации ПАУ, оцененные с помощью кластерного анализа (Евклидова метрика, метод Варда для объединения объектов и переменных) вновь соответствуют молекулярным массам: выделяется группа наиболее легких (Naph, Fluogene, An, Phen) и более тяжелых ПАУ (подгруппы 4–5-кольцевых BbFlu, Chr, BkFlu, BaP, BaA, Py, Flu и 6-кольцевые Bghi и IP). Коэффициент вариации распределения ΣПАУ на 33 точках мониторинга меньше, чем для почв, в 1.5 раза (2.64). Это может быть свидетельством упорядочивающей роли корневой системы для потока ПАУ.

Еще одна особенность распределения ПАУ в корнях по сравнению с почвами и надземными частями растений – выраженное преобладание 2–4-кольцевых соединений.

*Среднее содержание ΣПАУ в надземной части растений ΣПАУ<sub>надзем</sub>* составляет 294.5 мкг/кг (пределы изменений 108.7–1320.2), а среднее содержание индивидуальных ПАУ убывает в ряду Phen (25.2% от ΣПАУ<sub>надзем</sub>) > Naph (16.1%) > Flu (11.6%) > Py (10.3%) (концентрации прочих ПАУ менее 10%). Внутри ассоциации ПАУ выделяются следующие группировки: отдельная группа легких 2–3-кольцевых Naph, Fluogene, Phen; группа прочих ПАУ (An, с крайне низкой растворимостью, и ПАУ, имеющие более 4 колец), состоящая из подгрупп: 3–4-кольцевые An, Fu, Py, и IP, подгруппа более тяжелых 4–5-кольцевых BaA, BkFlu, BbFlu, BaP, Chr и Bghi; DbA. Коэффициент вариации распределения ΣПАУ на 33 точках мониторинга составил 2.79. Это большее разнообразие (по сравнению с корнями) может объясняться также поступлением части ПАУ в растения из атмосферы: упорядоченный корнями поток ПАУ (определяемый, очевидно, в очень значительной степени свойствами растения) дополняется поступлениями из атмосферы, заметно различными порциями на разных точках наблюдений. Это приводит к интенсивным вариациям ΣПАУ и разнообразию в надземных частях растений.

**Распределение ПАУ в функциональных зонах кампуса.** Анализ валовых концентраций 14 ПАУ показал следующую картину распределения в системе почва–корни–надземная часть растения в выделенных зонах. Взаимосвязи внутри групп ПАУ серьезно различаются в разных зонах территории и в разных частях почвенно-растительно-растительной системы. Для рассмотренной территории характерно превышение концентраций практически всех ПАУ в транспортной и административно-деловой зонах по сравнению с фоновой (парковой) зоной. На рис. 2 показано распределение тяжелых и легких групп ПАУ в почвах, корневых и надземных частях растений.

Следует отметить высокое содержание тяжелых ПАУ в почвенном слое на территории, прилегающей к автотрассе. В процентном отношении в почвенном слое преобладают 4-кольцевые ПАУ, тогда как содержание прочих полиаренов значительно варьирует от парковой к транспортной зоне. Наиболее ярко это видно на примере 2- и 3-кольцевых ПАУ: в транспортной зоне их вклады минимальны, тогда как в парковой зоне их содержание превышает 30%. В целом это распределение соответствует приведенным выше примерам для условий техногенно нагруженных территорий. Эти различия в перераспределении довольно четко прослеживаются в абсолютных значениях концентраций в выделенных зонах, в особенности



**Рис. 2.** Процентное соотношение концентраций 14-ти ПАУ в парковой, транспортной и общественно-деловой зонах. Цифрами обозначены содержания ПАУ в почвах: 1 – в парковой, 2 – в общественно-деловой, 3 – в транспортной зонах; в корнях: 4 – в парковой, 5 – в общественно-деловой, 6 – в транспортной зонах; в надземных частях растений: 7 – в парковой, 8 – в общественно-деловой, 9 – в транспортной зонах.

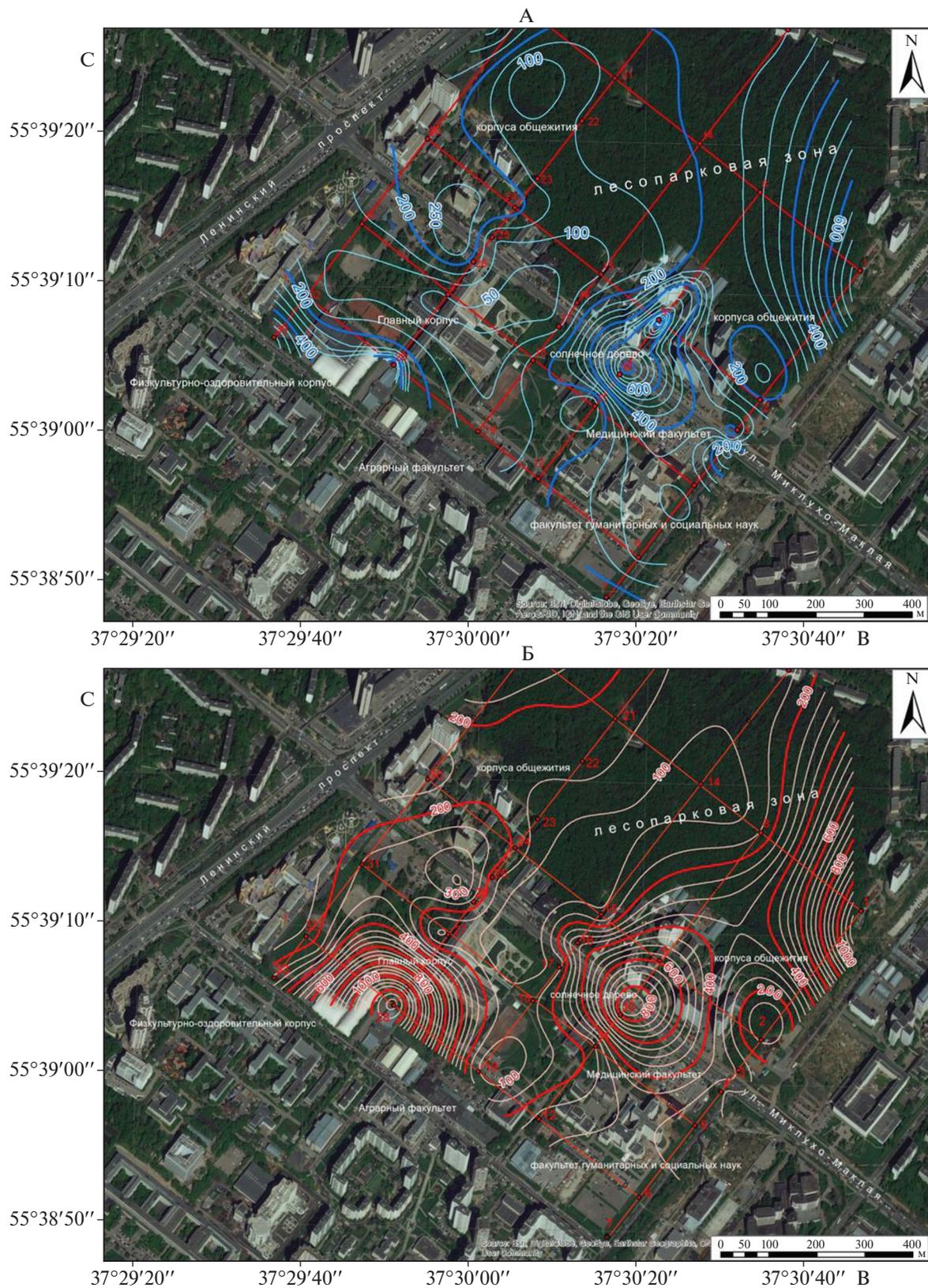
для почв (табл. 1). Явно выделяется транспортная зона с повышенными уровнями загрязненности, однако прирост концентраций ПАУ не везде одинаков. Так, очевидно перераспределение от преобладания легких (2–3 кольца) ПАУ в почвах парковой зоны к доминированию 5–6-кольцевых полиаренов в общественно-деловой и транспортной зонах.

Хорошо прослеживается изменение пирогенного характера загрязнения ассоциацией ПАУ почв, корней и стеблей растений в различных функциональных зонах. Так, в почвах общественно-деловой зоны 2–3-кольцевые ПАУ составляют около 24% от суммарного содержания полиаренов. В корнях их доля увеличивается до 50.9%, а в надземной части (очевидно за счет влияния атмосферного переноса и поступления через поверхности растений) несколько уменьшится до 39.6%.

В транспортной зоне наблюдается явное преобладание в почвах высокомолекулярных ПАУ (более 90%), что вполне согласуется с представлениями о влиянии транспортной инфраструктуры и собственно автомобилей с двигателями внутреннего сгорания на окружающую среду. В корнях и надземных частях растений доля 4–6-кольцевых ПАУ уменьшается примерно до 2/3, причем снова атмосферный перенос способствовал более высоким содержаниям ПАУ в надземных частях растительности.

В парковой зоне содержание легких 2–3-кольцевых полиаренов в почвах достигает 1/3. Максимальное содержание 2–3-кольцевых ПАУ характерно для корневых частей растений, причем здесь и в абсолютных значениях соотношение их с тяжелыми ПАУ является максимальным (2.2). Очевидно, такая картина формируется за счет того, что в парковой (фоновой) зоне основным фактором насыщения растительных организмов (корней) являются ограниченные способности растений поглощать ПАУ, а не собственно высокие концентрации ПАУ в почвах. Эта способность формируется благодаря растворимости ПАУ (следовательно, их поступлению в удобной для растений форме). В надземных частях растений парковой зоны доля 2–3-кольцевых ПАУ еще больше – 68%, а соотношение масс легких и тяжелых полиаренов составляет 1.9. Вероятное объяснение этому – преимущество при распространении ПАУ на фоновых территориях их более летучих форм (тяжелые нелетучие оседают с твердыми частицами в транспортной зоне).

Пространственное распределение ПАУ в почвах исследуемой территории согласно рис. 3, А, имеет весьма неоднородный характер, что определяется условиями их миграции и накопления (в частности, спецификой гранулометрического состава – преобладанием мелких частиц в придорожных зонах по предварительным визуальным оценкам на профилях), и техногенным изменением почв.



**Рис. 3.** Суммарное содержание ПАУ (мкг/кг почв или сухого веса растительного материала): А – в почвенном покрове, Б – в корневой системе растений, В – в надземной части растительности.

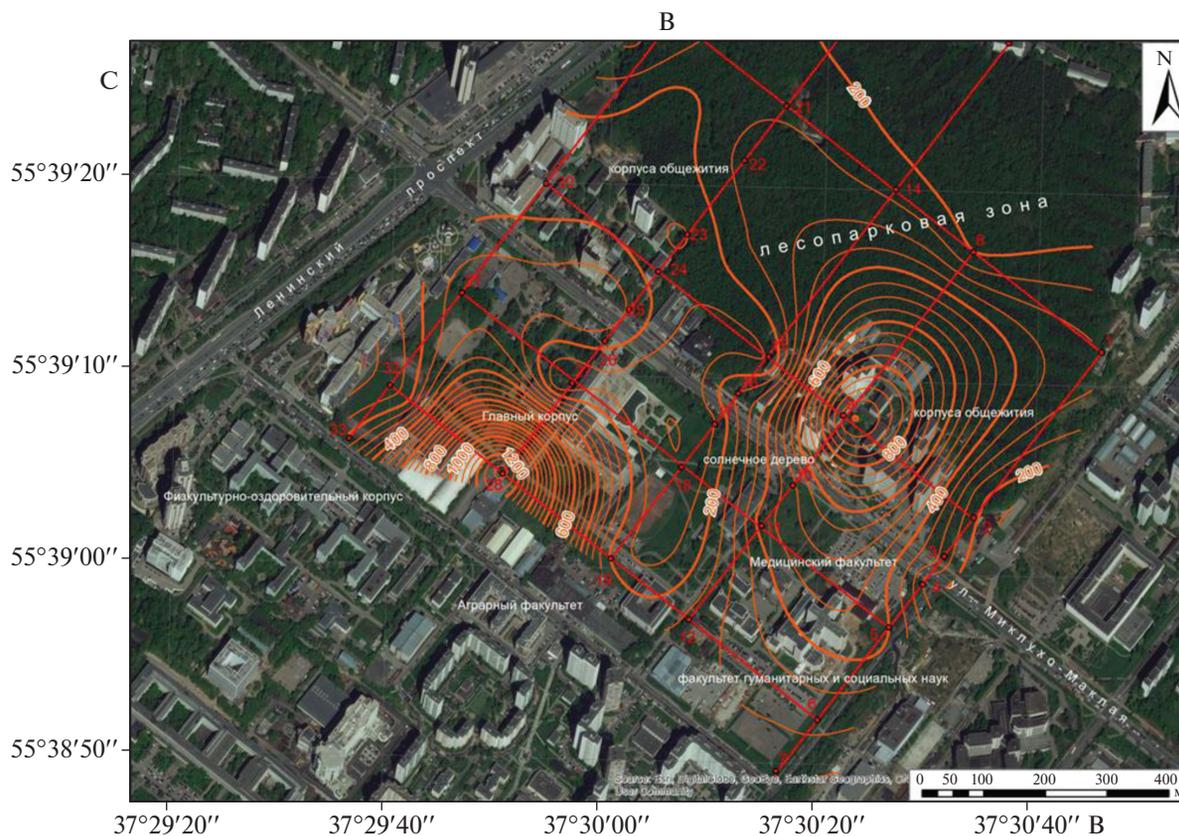


Рис. 3. Окончание.

В то же время огромное влияние на распределение сумм ПАУ и компоновку их состава имеет неравномерный характер выбросов автотранспорта и их приход из асфальта и шин при торможении. Специальными исследованиями [19] доказано, что эффект торможения по выбросу ПАУ в атмосферу из различных типов асфальтового покрытия может быть сопоставим с выбросами от сгорания топлива. В том же исследовании показано, что профиль ПАУ шин имеет характерные отличия от профилей выхлопа дизельного и бензиновых двигателей и может достигать 234.4 мг/кг. Опасность обозначенного эффекта состоит в том, что в силу липофильных свойств ПАУ, они достаточно быстро сорбируются мелкими частицами резины и асфальта и могут продолжительно находиться в воздухе в зоне вдыхания человеком. В то же время часть частиц осаждается на почвы и растения, формируя четко видимые зоны загрязнения, в частности максимумы на точках 4, 16, между точками 21 и 29. На территории кампуса такие зоны выявлены у светофоров и стоянок автотранспорта; загрязнение здесь вызвано максимальными выбросами на малых оборотах двигателей и их прогревом.

Вполне естественно, что миграция и трансформация вновь образующихся соединений в

почвах и растениях будут протекать с аномальными отклонениями от идеализированных растворов ПАУ.

Наибольшая концентрация ПАУ характерна для почв, прилегающих к автотрассе и в нескольких участках административной зоны (согласно схеме зонирования, представленной на рис. 1). Кроме этого, отчетливо прослеживается влияние Ленинского проспекта в парковой зоне и присветофорной части с ул. Миклухо-Маклая. На последней также выявлены аномалии в почвах, обусловленные повышенными концентрациями ПАУ в почвах близ автобусных остановок. Данные аномалии можно связать с дизельными двигателями автобусов, выбрасывающими на малых оборотах максимальное количество полиаренов.

Анализ аккумуляции исследуемых ПАУ в указанных зонах может говорить о типично антропогенном характере загрязнения территории: выявлено наличие значительного количества многокольцевых ПАУ, что связано с активностью транспорта. В исследованиях [26, 29] приведены данные о принадлежности 6-кольцевого Bghi к маркерам выбросов автомобильного транспорта, а в работе [21] преобладание BbFlu над BkFlu явно выделяет транспортную зону города. Таким образом, выяв-

Таблица 1. Распределение ПАУ в системе почва-растение в функциональных зонах исследуемой территории

ПАУ	Почвы			Корни			Наземные части растений		
	ОД	Т	П	ОД	Т	П	ОД	Т	П
	2-кольцевые, мкг/кг	$\frac{8.2-41.5}{19.8}$	$\frac{7.7-162.4}{34.0}$	$\frac{8.3-113.8}{28.7}$	$\frac{29.4-90.6}{48.1}$	$\frac{30.2-115.3}{63.4}$	$\frac{20.9-103.3}{52.6}$	$\frac{17.4-56.8}{37.1}$	$\frac{33.5-109.9}{60.5}$
3-кольцевые, мкг/кг	$\frac{5.5-103.8}{26.8}$	$\frac{10.5-1676.7}{172.9}$	$\frac{14.5-99.3}{39.0}$	$\frac{29.2-174.3}{63.8}$	$\frac{36.7-126.3}{78.5}$	$\frac{26.4-81.0}{55.1}$	$\frac{30.5-126.5}{77.5}$	$\frac{67.5-127.3}{95.5}$	$\frac{64.7-112.3}{93.1}$
4-кольцевые, мкг/кг	$\frac{6.5-278.1}{81.8}$	$\frac{21.6-12244.1}{1202.3}$	$\frac{22.1-165.7}{92.4}$	$\frac{18.3-563.8}{99.4}$	$\frac{26.2-541.2}{150.4}$	$\frac{19.4-89.5}{36.1}$	$\frac{24.9-143.5}{68.8}$	$\frac{33.8-539.7}{149.4}$	$\frac{30.2-95.9}{49.1}$
5-кольцевые, мкг/кг	$\frac{9.9-255.1}{49.9}$	$\frac{11.7-6423.9}{684.2}$	$\frac{14.5-58.4}{34.9}$	$\frac{8.8-289.4}{50.2}$	$\frac{11.3-387.5}{82.9}$	$\frac{1.8-41.3}{11.4}$	$\frac{5.7-112.0}{26.5}$	$\frac{7.6-376.6}{70.4}$	$\frac{0.6-38.6}{13.9}$
6-кольцевые, мкг/кг	$\frac{0.0-79.8}{15.1}$	$\frac{0.0-3429.3}{372.3}$	$\frac{0.0-34.7}{8.4}$	$\frac{0.0-119.8}{20.9}$	$\frac{4.4-239.4}{56.3}$	$\frac{0.0-6.7}{2.4}$	$\frac{3.0-28.1}{15.1}$	$\frac{0.0-250.8}{52.3}$	$\frac{0.0-24.8}{9.2}$
Суммарное содержание, мкг/кг	$\frac{39.8-758.3}{193.3}$	$\frac{73.0-23936.3}{2465.7}$	$\frac{68.8-430.4}{203.4}$	$\frac{102.5-1187.0}{282.4}$	$\frac{128.3-1316.6}{431.6}$	$\frac{88.5-310.1}{157.5}$	$\frac{108.7-413.7}{225.1}$	$\frac{158.1-1320.2}{428.0}$	$\frac{122.7-297.6}{209.1}$
Доля 2-3-кольцевых, %	33.3	24.1	8.4	65.5	50.9	36.4	68.3	39.6	32.9
Доля 4-6-кольцевых, %	66.7	75.9	91.6	34.5	49.1	63.6	31.7	60.4	67.1
Соотношение масс 2-3-кольцевых и 4-6-кольцевых	0.5	0.3	0.1	2.2	0.7	0.5	1.9	1.0	0.6

Примечание. Над чертой – диапазон значений, под чертой – средние значения по данным опробования на 33 точках. Функциональные зоны: ОД – общественно-деловой; Т – транспортная, П – парковая.

ленная картина распределения ПАУ в почвах соответствует транспортному происхождению загрязнений.

*Корневая система* проявила относительно самостоятельную по сравнению с почвенной средой картину накопления ПАУ в различных зонах кампуса, однако корень как фильтр регулирует поступление ПАУ в растительный организм, и концентрации ПАУ меньше по сравнению с их содержанием в почвах. Картографические материалы позволяют отметить увеличение накопления ΣПАУ в районе проезжей части дороги и административной зоны; при этом меньшие концентрации выявлены в лесопарковой зоне (рис. 3, Б).

Аномалия в районе главного корпуса (точка 28) скорее всего обусловлена локальным загрязнением за счет слива в почвы отработанного моторного топлива, успевшего деградировать в почвах, но активно перерабатывающегося ризосферой на данный момент времени. Аналогичная аномалия наблюдается в районе точки 9, находящейся в непосредственной близости от авторемонтных мастерских и стоянки транспорта.

*ПАУ в наземной части растений.* На рис. 3, В показано высокое содержание ΣПАУ в тканях растительности (надземной части) как в общественно-деловой зоне, так и в зоне автотрассы. Данный факт может объясняться возможностью синтеза ПАУ в наземной части растений (листьях) [13], а также поступлением части ПАУ из почв с формированием двух максимумов в районе точек 28 и 9. По-видимому, здесь корневая часть не справляется с ролью фильтра. Повышенные содержания ПАУ также связаны с более вероятным источником поступления непосредственно из атмосферы.

Выявленные закономерности накопления ПАУ надземными частями растений хорошо коррелируют с динамикой распространения газообразных загрязнителей от автомагистралей, которая была оценена для рассмотренной территории ранее [14].

Исследования содержания полиаренов в различных органах растений показывают, что трансформация состава ПАУ растений в целом обусловлена изменением содержания полиаренов в надземной части растения за счет ее большей биомассы [22, 25]. По данным авторов этих работ отмечается преобладание легких полиаренов, в основном флуорена, фенантрена и антрацена — соединений, которые синтезируются в самом растении, а также естественного синтеза нафталина, характерного для надземной части растений. Значительное содержание ПАУ в растениях, вероятно, связано с тем, что легкие ПАУ, как уже говорилось выше, предположительно являются необходимыми компонентами растений, участвующими в процессах обмена веществ. В условиях за-

грязнения у растений активизируется способность к поглощению ПАУ с поверхности, и в ткани проникают более легкие полиарены [3, 22, 23]. Отметим, что в нашем случае в среднем ПАУ доминировали в растительности в другом составе ( $\text{Phen} > \text{Naph} > \text{Flu} > \text{Py}$ ). При этом на фоновой точке 14 (лесопарковая зона) эти 4 полиарена составляют 59% от ΣПАУ, а 4–6-кольцевые ПАУ составили 39%. На точке 29 в транспортной зоне вклад перечисленных 4 ПАУ составил 28%, а на 4–6-кольцевые ПАУ пришлось 63%, из которых наиболее значительны вклады Bghi и BbFlu — ярких индикаторов транспортных источников. Таким образом, однозначно утверждать, что генерация ПАУ надземными частями растений имеет естественный характер, преждевременно. Еще одним доводом в пользу поступления ПАУ от выбросов автотранспорта стали полученные ранее оценки индикаторных соотношений, подтвердившие пирогенное происхождение ассоциаций ПАУ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил показать заметные различия в распределении ПАУ в компонентах природных сред в функциональных зонах исследуемой территории с различным уровнем антропогенной нагрузки. Выявлены различия как в суммарных концентрациях ПАУ, так и в составе их ассоциаций в почвах, корнях и надземных частях растений в зависимости от близости к автотрассам как основным источникам поступлений ПАУ.

Роль транспорта как доминирующего источника загрязнений четко определяется оценкой присутствия маркерных соединений, типичных для транспортных выбросов (BbFlu, Bghi), а также подтверждена расчетами индикаторных соотношений ПАУ, проведенными ранее.

Для транспортной зоны характерно накопление в большем процентном соотношении тяжелых многокольцевых ПАУ в почвах, корнях и надземной части растительности. Существуют некоторые пределы (значения максимального насыщения) для этих сред, нарушающие процессы и механизмы естественного массообмена ПАУ. Они четко выражены в зонах вдоль автомагистралей и фиксируются низкими коэффициентами перехода практически всего пула полиаренов.

Сложность оценок для объектов городской среды обусловлена наложением многих природных и антропогенных процессов. Условно приняв лесопарковую территорию фоновой, мы не отрицаем также вклад в суммарные концентрации ПАУ их привноса от удаленных источников, что способно исказить модели накопления ПАУ от локальных источников.

Пространственные вариации ΣПАУ в почве оказались практически не связанными с вари-

циями СПАУ в корнях. Это можно объяснить регулирующей ролью коревой системы. Заслуживают внимания процессы деградации ПАУ в ризосфере растений, однако эти микробиологические процессы не входили в область исследования. В целом можно говорить о роли корня как фильтра, пропускающего в растение лишь определенное количество ПАУ, не превышающее некую критическую величину.

Попытки связать закономерности накопления и миграции ПАУ в почвах с показателями влажности, температуры почв, Eh и pH показали крайне незначительные влияния этих характеристик, что объясняется липофильным характером и низкой растворимостью ПАУ.

Развитие системы экологического мониторинга кампуса требует учета особенностей техногенных нагрузок в различных функциональных зонах с соответствующей доработкой программ мониторинга. В частности, более пристального внимания заслуживают процессы накопления в средах тяжелых (4–6 колец) ПАУ в нагруженной транспортной зоне, а также микробиологические процессы.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы искренне признательны сотрудникам Института биологии Коми НЦ УрО РАН Д.Н. Габову и Е.В. Яковлевой за активное участие в проведении аналитических определений ПАУ в исходных пробах.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агапкина Г.И., Ефименко Е.С., Бродский Е.С. и др.* Приоритетные органические загрязнители в почве дендропарка Ботанического сада МГУ имени М.В. Ломоносова. Сообщение 2. Особенности вертикального распределения полициклических ароматических углеводородов в профиле урбо-дерново-подзолистой почвы // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2015. № 3. С. 37–45.
2. *Боева Д.В., Хаустов А.П.* Оценка влияния автотранспорта на территорию кампуса Российского университета дружбы народов // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 4. С. 419–430.  
<https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-4-419-430>
3. *Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Яковлева Е.В.* Полициклические ароматические углеводороды в почвах техногенных ландшафтов // Геохимия. 2010. № 6. С. 606–610.
4. *Геннадиев А.Н.* Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 192 с.
5. *Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Кошовский Т.С.* Факторы и тренды формирования природно-техногенных ассоциаций полиаренов в системе снег-почва // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 43–47.
6. *Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И.* Карты устойчивости почв к загрязнению нефтепродуктами и полициклическими ароматическими углеводородами: метод и опыт составления // Почвоведение. 2007. № 1. С. 80–92.
7. *Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С.* Поступление и поведение полициклических ароматических углеводородов, в пахотных, залежных и лесных почвах таежной зоны (Тверская область) // Почвоведение. 2017. № 3. С. 311–320.
8. *Константинова Е.Ю., Сушкова С.Н., Минкина Т.М. и др.* Полициклические ароматические углеводороды в почвах промышленных и селитебных зон Тюмени // Известия Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329(8). С. 66–79.
9. *Красильников П.В.* Устойчивые соединения углерода в почвах: происхождение и функции // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1131–1131.
10. *Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Габов Д.Н., Чуков С.Н.* Полициклические ароматические углеводороды в почвах Васильевского острова (Санкт-Петербург) // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1494–1500.
11. *Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С.* Эколого-геохимическая оценка состояния запечатанных почв Восточной Москвы // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25(4).  
<https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-4-480-509>
12. *Пискарева В.М., Кошовский Т.С., Геннадиев А.Н.* Концентрации и потоки полициклических ароматических углеводородов в аквальных ландшафтах дельт Дона, Кубани и Волги // 4-е Виноградские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2020. С. 990–994.
13. *Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 226 с.
14. *Силаева П.Ю., Хаустов А.П.* Транспортная нагрузка на кампус РУДН // Потаповские чтения-2019. М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. С. 142–146.
15. *Строганова М.Н., Мягкова А.Д., Прокофьева Т.В., Губанков А.А.* Почвенная карта Москвы (с пояснительным текстом) // Экологический атлас Москвы. М.: АБФ/АВФ, 2000.
16. *Хаустов А.П., Редина М.М.* Парадоксы концентрирования углеводородов в компонентах геосистем (на примере ПАУ) // Сергеевские чтения: геоэкологиче-

- ские аспекты реализации национального проекта “Экология”. Диалог поколений. М.: РУДН, 2020. С. 94–103.
17. Хаустов А.П., Редина М.М., Алейникова А.М., Мамджанов Р.Х., Силаева П.Ю. Проект экологического мониторинга кампуса Российского университета дружбы народов // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. № 25(4). С. 562–584. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-4-562-584>
  18. Хаустов А.П., Редина М.М., Яковлева Е.В. Водопроявления подземных вод как геохимические системообразующие объекты (интерпретация на основе распределения ПАУ) // Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология. 2018. № 3. С. 3–17.
  19. Третьяков В.А., Корнев Л.В., Кривошеева О.Б. Воздействие шин на окружающую среду и человека. М.: Нефтехимпром, 2006. 154 с.
  20. Цибарт А.С., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С. Полициклические ароматические углеводороды в пирогенных почвах заболоченных ландшафтов Мещеры // Почвоведение. 2016. № 3. С. 312–320.
  21. Шестова Е.В., Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Тимофеев И.В. Загрязнение полициклическими ароматическими углеводородами почв города Северобайкальска // Доклады Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. 2019. С. 281–285.
  22. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Влияние бенз[а]пиренового загрязнения на ростовые процессы и состав полиаренов растений // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 45–51.
  23. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Полициклические ароматические углеводороды в почвах и растениях нижнего яруса южной кустарниковой тундры в условиях техногенеза // Почвоведение. 2014. № 6. С. 685–696.
  24. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Василевич Р.С., Гончарова Н.Н. Участие растений в формировании состава полициклических ароматических углеводородов торфяников // Почвоведение. 2020. № 3. С. 316–329.
  25. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Вежов К.С. Накопление полиаренов в почвах и кустарниках *Betula nana* в условиях Южной Тундры // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2018. № 2(34). С. 33–42.
  26. Freeman D.L., Cattell F.C. Woodburning as a source of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons // Environ. Sci. Technol. 1990. V. 24. P. 1581–1585.
  27. Hutchinson M.F. ANUDEM version 5.3, user guide. Canberra: Fenner School of Environment and Society, Australian National University. 2011. [https://fennerschool.anu.edu.au/files/usedem53\\_pdf\\_16552.pdf](https://fennerschool.anu.edu.au/files/usedem53_pdf_16552.pdf)
  28. IUSS Working Group WRB. 2014. World reference base for soil resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
  29. Menichini E. Urban air pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons: levels and sources of variability // Sci. Tot. Environ. 1992. V. 116. P. 109–135. Priority Pollutant List. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/priority-pollutant-list-epa.pdf>

## Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Soil-Plant System as Affected by Motor Transport in the Urban Environment

A. P. Khaustov<sup>1,\*</sup>, Zh. D. Kenzhin<sup>1</sup>, M. M. Redina<sup>1</sup>, and A. M. Aleinikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, 117198 Russia

\*e-mail: [khaustov-ap@rudn.ru](mailto:khaustov-ap@rudn.ru)

The article focuses on the interaction of the components of the urban natural complex (surface layer of soil, rhizosphere and above-ground phytomass of herbaceous plants) polluted by the products of motor transport. The aim of the study is to identify the zone of influence of pollution sources and the specific features of pollutants accumulation in soil-plant systems with different levels of load. The distribution and migration of “markers” – 14 polycyclic aromatic hydrocarbons (polyarenes, or PAHs) are analyzed in the southwest of Moscow (the campus of the RUDN University and the adjacent area of the Southwest Forest Park) in functional zones differing by the volumes of technogenic loads. The soils of the considered territory according to WRB are Albic Retisols (Ochric). The spatial distribution of polyarenes in the system: surface soil layer–rhizosphere–above-ground part of plants was modeled using data analysis procedures and visualized using the ArcGIS software (“Topo to Raster” method). The effects of aerial mass transfer of polyarenes into the soil–plant system as the main pathway for the entry of pollutants were evaluated. The prevailing polyarenes and the factors determining the volumes of their accumulation in the functional zones of the studied area were revealed. The genesis of polyarenes was estimated based on the indicator ratios of their groups. Differences in the conditions and dynamics of polyarenes accumulation by different soil and plants components are shown. The results are proposed to be used to substantiate the requirements for organization of soil monitoring in the studied area, to analyze the dynamics of the state of an urban territory and to justify measures to protect urban areas under conditions of traffic load.

**Keywords:** PAH, pollution indicators, automobile transport, soil monitoring, Albic Retisols (Ochric)