

УДК 504.054;504.064.2.001.18

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-185-230



Ссылки для цитирования:

Жаксылыков Н.Б., Кошелева Н.Е., Завгородняя Ю.А. Оценка загрязнения почв г. Улан-Удэ полициклическими ароматическими углеводородами // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 120. С. 185-230. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-185-230

Cite this article as:

Zhaxylykov N.B., Kosheleva N.E., Zavgorodnyaya Yu.A., Assessment of soil pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons in Ulan-Ude, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 120, pp. 185-230, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-120-185-230

Благодарность:

Полевые работы выполнены по договору № 8/Д-2021 с ФГБУ УралНИИ “Экология”, анализ и интерпретация данных – при поддержке РФФ (проект № 19-77-3004-П).

Acknowledgments:

Field work was carried out under contract No. 8/D-2021 with FGBU Ural Research Institute “Ecology”, data analysis and interpretation were supported by Russian Scientific Foundation (project No. 19-77-3004-П).

Оценка загрязнения почв г. Улан-Удэ полициклическими ароматическими углеводородами

© 2024 г. Н. Б. Жаксылыков*, Н.Е. Кошелева,
Ю. А. Завгородняя

*МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1,*

**<https://orcid.org/0009-0008-4486-9812>, e-mail: niyaz.zh@mail.ru.*

*Поступила в редакцию 14.03.2024, после доработки 20.05.2024,
принята к публикации 21.08.2024*

Резюме: Впервые изучено загрязнение полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) почвенного покрова г. Улан-Удэ, столицы Республики Бурятия. Содержание 16 индивидуальных полиаренов проанализировано в образцах верхнего горизонта фоновых каштановых и городских почв, отобранных в ходе почвенно-

геохимической съемки в июле–августе 2022 г. Средняя концентрация суммы ПАУ в почвенном покрове Улан-Удэ составила 735 нг/г, что превышает концентрацию в фоновых почвах (87 нг/г) более чем в 8 раз. По убыванию суммы ПАУ функциональные зоны образуют ряд: железнодорожная транспортная > автотранспортная > промышленная > одноэтажная селитебная > многоэтажная селитебная > рекреационная. При этом сумма ПАУ в железнодорожной транспортной зоне выше, чем в других функциональных зонах в 2.6–5.2 раза, что указывает на то, что железнодорожный транспорт является самым мощным источником ПАУ в городе. Загрязнение полиаренами почв во всех функциональных зонах определяется преимущественно средне- (46%) и высокомолекулярными (41%) соединениями. Среди низкомолекулярных ПАУ лидирует фенантрен (9% от суммы ПАУ), но более интенсивно аккумулируются среднемолекулярные флуорантен (18%) и пирен (13%), среди высокомолекулярных соединений доминируют бензо(ghi)перилен (12%), бензо(b)флуорантен (10%), индено(1,2,3-cd)пирен (8%) и бенз(a)пирен (6%). Концентрация суммы 16 ПАУ в почвенном покрове города варьирует в пределах 17–9 540 нг/г. Самые высокие уровни загрязнения (3 226–9 540 нг/г) зафиксированы в 9 точках опробования (4% территории города), которые формируют наиболее контрастные локальные аномалии ПАУ. На более чем половине территории Улан-Удэ сумма ПАУ не превышает 500 нг/г. Расчет индикаторных соотношений индивидуальных ПАУ позволил определить доминирующие типы источников, к которым относятся железнодорожный транспорт и сжигание угля. Экологическая опасность загрязнения почв ПАУ в Улан-Удэ на 64% обусловлена бенз(a)пиреном и в меньшей степени – бензо(b)флуорантеном (9.6%), индено(1,2,3-cd)пиреном (7.2%), дибензо(ah)антраценом (6.5%) и бенз(a)антраценом (6.1%).

Ключевые слова: ПАУ; техногенные аномалии; промышленные выбросы; загрязнение от транспорта; экологическая опасность; индикаторные соотношения.

Assessment of soil pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons in Ulan-Ude

© 2024 N. B. Zhaxylykov*, N. E. Kosheleva,
Yu. A. Zavgorodnyaya

*Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation,
<https://orcid.org/0009-0008-4486-9812>, e-mail: niyaz.zh@mail.ru.

Received 14.03.2024, Revised 20.05.2024, Accepted 21.08.2024

Abstract: For the first time, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of the soil cover of Ulan-Ude, the capital of the Republic of Buryatia, was studied. The content of 16 individual polyarenes was analyzed in the upper horizon of background chestnut and urban soils, sampled during soil and geochemical survey in July–August 2022. The average concentration of total PAHs in the soil cover of Ulan-Ude was 735 ng/g, which was 8 times as much as the concentration in the background soils (87 ng/g). The PAH amount in the soil of various functional zones decrease in the following order: railway transport > motor traffic > industrial > one-story residential > multi-story residential > recreational. At the same time, the amount of PAHs in the railway transport zone was 2.6–5.2 times higher than in other functional zones, which indicates that railway transport is the most powerful source of PAHs in the city. Contamination of soils with polyarenes in all functional zones is determined primarily by medium- (46%) and high-molecular-weight (41%) compounds. Among PAHs with low molecular weight, phenanthrene prevailed (9% of the total PAHs), but medium-molecular-weight fluoranthene (18%) and pyrene (13%) showed higher share; high-molecular-weight compounds dominated by benzo(ghi)perylene (12%), benzo(b)fluoranthene (10%), indeno(1,2,3-cd)pyrene (8%) and benzo(a)pyrene (6%). The total amount of 16 PAHs in the soil cover of the city varied within the range of 17–9 540 ng/g. The highest levels of pollution (3 226–9 540 ng/g) were recorded at 9 sampling points (4% of the city), which form the most contrasting local PAH anomalies. In more than half of the territory of Ulan-Ude, the total amount of PAHs did not exceed 500 ng/g. The indicator ratios of individual PAHs made it possible to determine the dominant types of sources, which include railway transport and coal combustion. The contribution to the environmental hazard of soil contamination with PAHs in Ulan-Ude was mainly made by benzo(a)pyrene (64%) and, to a lesser extent, by benzo(b)fluoranthene (9.6%), indeno(1,2,3-cd)pyrene (7.2%), dibenzo(ah)anthracene (6.5%) and benzo(a)anthracene (6.1%).

Keywords: PAHs; anthropogenic anomalies; industrial emissions; transport pollution; environmental hazard; indicator ratios.

ВВЕДЕНИЕ

Города являются своеобразными островами загрязнения, где

под воздействием различных техногенных источников формируются геохимические аномалии в депонирующих средах, создающие риски для общественного здоровья. Среди депонирующих сред главным аккумулятором загрязняющих веществ является почвенный покров из-за своей способности индицировать многолетнее загрязнение (Касимов, 2013). В Улан-Удэ, крупном административном и промышленном центре Республики Бурятия, почвенный покров испытывал на протяжении многих десятилетий значительную техногенную нагрузку, которая обусловлена функционированием объектов промышленности и теплоэнергетики, автотранспорта, очистных сооружений и золоотвалов городских ТЭЦ. Город также является крупным железнодорожным узлом, через который проходит участок Транссибирской магистрали.

Объекты промышленности, теплоэнергетики и транспорт выступают потенциальными источниками различных загрязняющих веществ, в том числе полициклических ароматических углеводородов (ПАУ, полиаренов), которые являются одними из наиболее экологически значимых загрязнителей городских ландшафтов, что обусловлено их высокой мутагенной и канцерогенной активностью и опасностью для здоровья человека (Ровинский и др., 1988; Alegebeleye et al., 2017; Корунов и др., 2020). Это органические соединения бензольного ряда с конденсированными бензольными кольцами, количество которых варьирует от 2 до 7 (Геохимия..., 1996).

ПАУ имеют как природное, так и антропогенное происхождение. Особенностью данной группы соединений является их встречаемость в почвах самых разных ландшафтов (Cui et al., 2022). Вне зависимости от специализации города в нем, как правило, функционируют предприятия топливно-энергетического комплекса и транспорт, поставляющие полиарены в окружающую среду. Образование ПАУ на урбанизированных территориях обусловлено процессом пиролиза органических веществ, сжиганием угля, нефти и древесины в промышленности и энергетике, топлива – в двигателях автомобилей. В Улан-Удэ к этим источникам ПАУ добавляется обширная зона малоэтажной жилой застройки, где для отопления в индивидуальных котлах и печах сжигают уголь и древесину. Кроме того, значительным естественным источником

полиаренов в Улан-Удэ являются лесные пожары. Горение сосновых лесов, произрастающих в данном регионе, продуцирует большее количество полиаренов, чем горение лиственных пород и травянистой растительности (Цибарт, Геннадиев, 2011).

Полиарены в зависимости от количества бензольных колец можно разделить на низко-, средне- и высокомолекулярные. К низкомолекулярным ПАУ относятся соединения, состоящие из 2–3 колец, к среднемолекулярным – 4-ядерные, к высокомолекулярным – от 5 колец и выше. Низкомолекулярные соединения ПАУ наименее устойчивы, они подвержены фотохимической и биологической деструкции и способны переходить в газовую фазу (Цибарт, Геннадиев, 2013). Более сложные соединения полиаренов отличаются высокой устойчивостью и представляют бóльшую экологическую опасность. Среди них наиболее токсичен бенз(а)пирен (БаП) – соединение с 5 бензольными кольцами, имеющее наивысшую канцерогенную опасность (Ровинский и др., 1988; Майстренко, Ключев, 2004). Однако в почвах Улан-Удэ содержание ПАУ никогда ранее не определялось.

Цель работы – оценить уровни загрязнения ПАУ почвенного покрова в г. Улан-Удэ. Для этого решались следующие задачи: 1) определить содержание и пространственное распределение 16 индивидуальных ПАУ в почвах города; 2) установить уровни загрязнения и состав ПАУ в разных функциональных зонах Улан-Удэ с выявлением основных источников загрязнения почв; 3) оценить экологическую опасность загрязнения ПАУ почвенного покрова в Улан-Удэ. Актуальность данного исследования обусловлена тем, что город Улан-Удэ расположен в нижнем течении р. Селенги, впадающей в оз. Байкал. Озеро является уникальным объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО. Для его сохранения необходим контроль потенциальной опасности источников загрязнения речных, а затем и озерных вод. В основу работы положены результаты почвенно-геохимической съемки на территории г. Улан-Удэ в июле и августе 2022 г.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Материалы и методы исследования. Почвенно-геохимической съемке Улан-Удэ предшествовал анализ космиче-

ских снимков территории и городского генплана. Эти материалы использовались в качестве основы при составлении карты функционального зонирования территории города в ПК ArcGIS 10.3. Выделены промышленная, селитебная с одноэтажной и многоэтажной застройкой, авто- и железнодорожная транспортная и рекреационная зоны. На основе функционального зонирования Улан-Удэ была заложена сеть опробования городских почв (рис. 1).

Летом 2022 г. в пределах города и его окрестностей проведено опробование верхнего (0–10 см) горизонта почв по близкой к регулярной сетке с шагом 700–1 000 м согласно европейской методике (Demetriades, Birke, 2015). Пробы почв отбирались в разных функциональных зонах в 3–5 повторностях, из которых составлялась одна смешанная проба. Всего получено 220 проб городских почв, в качестве фона отобрано 12 проб почв за пределами и на окраинах Улан-Удэ.

Содержание ПАУ в почвах определялось методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием жидкостного хроматографа Agilent 1260 (Agilent Technologies) с флуориметрическим детектором и колонкой Zorbax Extend-C18 в Центре коллективного пользования “Хроматографический анализ объектов окружающей среды” Московского государственного университета (МГУ) им. М.В. Ломоносова.

Физико-химические свойства почв анализировали общепринятыми методами в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ (Кречетов, Дианова, 2009). Удельную электропроводность водной вытяжки (ЕС) измеряли кондуктометром SevenEasy S30 (MettlerToledo, Швейцария), актуальную кислотность – рН-метром (Эксперт-рН, Россия), гранулометрический состав почв – на лазерном гранулометре Analysette 22 comfort (Fritsch, Германия), содержание органического вещества – методом Тюрина с титриметрическим окончанием.

Основные статистические показатели (среднее, min-max, коэффициент вариации C_v) рассчитывались в ПК Statistica 10. Степень контрастности техногенных аномалий ПАУ в городских почвах определяли по коэффициенту концентрации $K_c = C_i/C_f$, где C_i и C_f – содержание полиарена в городских и фоновых почвах

соответственно.

Среди изученных ПАУ БаП и дибензо(ah)антрацен являются наиболее экологически опасными соединениями, что обусловлено их чрезвычайно высокой токсичностью и канцерогенной активностью (Ровинский и др., 1988; Alegbeleye et al., 2017). В РФ гигиенический норматив ПАУ в почвах установлен только для БаП (СанПиН..., 2021). В связи с этим для определения экологической опасности загрязнения городских почв всеми рассматриваемыми ПАУ использовались коэффициенты токсической эквивалентности *TEF* (Nisbet, LaGoy, 1992), характеризующие токсичность индивидуальных структур ПАУ по сравнению с БаП (табл. 1). Экологическая опасность всех изученных ПАУ в городских почвах определялась путем суммирования их содержаний, умноженных на коэффициенты *TEF*, и последующего сравнения суммы токсических эквивалентов с ПДК для БаП путем расчета коэффициента экологической опасности $Ko = \sum TEF / \text{ПДК}$, где ПДК – норматив для БаП, равный 20 нг/г.

Таблица 1. Факторы токсической эквивалентности (*TEF*) для некоторых ПАУ (Nisbet, LaGoy, 1992)

Table 1. Toxicity Equivalence Factors (*TEFs*) for some PAHs (Nisbet, LaGoy, 1992)

ПАУ (количество бензольных колец)	<i>TEF</i>
Бенз(а)пирен (5), дибензо(ah)антрацен (5)	1
Бенз(а)антрацен (4), бензо(b)флуорантен (5), бензо(k)флуорантен (5), индено(1,2,3-cd)пирен (6)	0.1
Антрацен (3), хризен (4), бензо(ghi)перилен (6)	0.01
Нафталин (2), аценафтен (2), флуорен (3), фенантрен (3), аценафтилен (3), флуорантен (4), пирен (4)	0.001

Соотношения различных ПАУ позволяют установить источники их поступления. Соотношения антрацен/антрацен + фенантрен и фенантрен/антрацен разделяют пирогенные и петрогенные источники ПАУ, бензо(k)флуорантен/бензо(b)флуорантен определяет наличие источников ПАУ в зависимости от их удаленности. Соотношения бенз(а)антрацен/бенз(а)антрацен + хризен и флуо-

рантен/флуорантен + пирен указывают на пиролиз углей при образовании ПАУ (Yunker et al., 2002; Sakari, 2012; Tobiszewski, Namieśnik, 2012; Mętrak et al., 2015; Хаустов, Редина, 2017; Шашков, Сидельников, 2022).

Отношение 3-ядерных фенантрена и антрацена позволяет разделять пирогенные и петрогенные ПАУ. Данное соотношение является очень информативным при выявлении образованных в результате пиролиза полиаренов при различных технологиях сжигания и видов топлива (Yunker et al., 2002; Хаустов, Редина, 2019), что очень актуально для Улан-Удэ, где одним из главных источников ПАУ являются работающие на каменном угле ТЭЦ. Значение отношения фенантрена к антрацену >10 индицирует петрогенные источники ПАУ, а <10 – указывает на пирогенные источники. Обратное соотношение антрацен/антрацен + фенантрен указывает на преобладание пирогенных источников образования полиаренов при >0.1 , а значение <0.1 – петрогенных. Отношение бенз(к)флуорантена к бенз(б)флуорантену зависит от расстояния до источника: более высокие значения BkF/BbF определяют наличие локального источника ПАУ, более низкие – свидетельствуют об удаленности источника. Соотношения бенз(а)антрацен/бенз(а)-антрацен + хризен >0.4 и флуорантен/флуорантен + пирен >0.5 указывают на вклад пиролиза углей в аккумуляцию ПАУ.

Для идентификации видов конкретных хозяйственной деятельности или источников загрязнения в качестве маркеров используются отдельные наборы ПАУ. При сжигании древесины в окружающую среду в основном поступают 4–5-ядерные флуорантен и БаП, а сжигание угля сопровождается выбросами фенантрена, флуорантена, пирена и хризена. Данный набор полиаренов является основным в выбросах при добыче, транспортировке, хранении, коксовании и сжигании углей (Журавлева и др., 2020). Концентрация 3-ядерного фенантрена может на порядок превышать концентрации других ПАУ и достигать в структуре выбросов 50%. При сжигании углей в меньшем количестве образуются высокомолекулярные БаП и бензо(б)флуорантен (Журавлева и др., 2016). В целом содержание индивидуальных ПАУ в углях зависит от типа исходного растительного материала, участвовавшего в углеобразовании, а также от термодинамических условий протекания

данного процесса (Laumann et al., 2011; Журавлева и др., 2020).

Территория исследования. Улан-Удэ расположен в пределах Иволгино-Удинской межгорной впадины, у слияния рек Селенги и Уды. На западе, севере, северо-востоке город ограничен хребтами Хамар-Дабан и Улан-Бургасы, на юго-востоке и юге – Селенгинским среднегорьем, хребтами Ганзуринский и Цаган-Дабан. Территория Улан-Удэ относится к Селенгино-Витимской геоморфологической провинции глыбово-сводовых и сводово-глыбовых эрозионно-денудационных горных хребтов и котловин забайкальского типа, геоморфологической области Селенгинское среднегорье (География..., 2016).

Самым холодным месяцем в Улан-Удэ является январь со средней температурой воздуха от -19 до -22 °С, самым теплым – июль с температурой $24-25$ °С. Ориентация нескольких горных хребтов Бурятии с юго-запада на северо-восток обуславливает существование орографического барьера, который затрудняет прохождение влажных воздушных масс на территорию, расположенную к югу и востоку от Байкала, что определяет ее засушливость. Положение Улан-Удэ в котловине и межгорных понижениях способствует формированию более засушливых сухостепных условий. Для региона в целом характерно неравномерное распределение осадков в течение года, и их летний максимум, $80-90\%$ годовых осадков, в регионе выпадает в виде дождей (География..., 2016). Среднее годовое количество осадков в Улан-Удэ колеблется в пределах $300-400$ мм.

В Улан-Удэ в течение года преобладают ветры западных и северо-западных румбов. Среднегодовые скорости ветров в городе не превышают $2-3$ м/с, что объясняется расположением Улан-Удэ в межгорных понижениях и залесенностью (География..., 2016).

Территория Улан-Удэ относится к Хамардабано-Южнозabayкальской средне-горнотаежной, лесостепной и горно-котловинно-степной провинции и горно-долинному Удинско-Хилокскому округу дерново-подбуров, подбуров, буроземов грубогумусовых, аллювиальных, черноземов, серогумусовых, светлогумусовых, черноземов квазиглеевых, каштановых и комплекса засоленных почв. Эта почвенная провинция характеризуется

наличием средне- и относительно мощных, преимущественно суглинистых, кислых, нейтральных и слабощелочных, недостаточно и временно избыточно увлажненных, умеренно холодных и умеренно длительно промерзающих почв с растительностью средней и повышенной продуктивности (Кузьмин, 1993; Экологический..., 2015).

Основными почвами исследуемой территории являются дерново-подбуры на склонах горных хребтов, соответствующие условиям южной тайги, их распространение обусловлено проявлением вертикальной поясности, экспозицией склонов. В межгорных понижениях и котловинах сложились сухостепные условия с преобладанием каштановых почв. На пойменных территориях распространены аллювиальные серогумусовые и темногумусовые почвы (Убугунов и др., 2012; Убугунов, 2020).

В г. Улан-Удэ и пригородах распространены в основном урбаноземы и агроземы, а также антропогенные аналоги аллювиальных гумусовых и темногумусовых почв, черноземов, т. е. урбо-, агро- и урбоагропочвы. Встречаются также серые, серогумусовые и каштановые почвы (Белозерцева и др., 2022).

Под влиянием урбанизации в Улан-Удэ наблюдается техногенная трансформация почв. По содержанию физической глины городские почвы (25.5%) уступают фоновым (31.6%), преобладают супесчаные почвы, различия между функциональными зонами незначительны. Максимальным содержанием физической глины (26.7%) отличаются почвы селитебной одноэтажной зоны, меньше всего ее в почвах транспортной железнодорожной зоны (19.8%). Кислотно-щелочная реакция среды в фоновых почвах нейтральная (рН 7.1), в некоторых зонах города отмечено их слабое подщелачивание. При среднегородском значении рН 7.4 различия между функциональными зонами незначительны, слабощелочная реакция (рН 7.6) характерна для почв промышленной зоны, в рекреационной зоне рН (6.9) ниже фоновых значений.

Минерализация водной вытяжки, определяемая по удельной электропроводности ЕС, в почвах Улан-Удэ составляет в среднем 288 мкСм/см, что в 1.5 раза ниже фоновых значений, при существенной вариабельности внутри функциональных зон. Наибольшей электропроводностью (690 мкСм/см) отличается транспорт-

ная железнодорожная зона, что почти в 2 раза выше, чем в селитебной одноэтажной зоне. Минимальная ЕС (38 мкСм/см) зафиксирована в рекреационной зоне, где противогололедные реагенты используются мало. Среднее по городу содержание органического углерода $C_{орг}$ составляет 3.19% при фоновом содержании 4.3% и высокой пространственной изменчивости. Наиболее высокое содержание $C_{орг}$ отмечено в почвах транспортной железнодорожной (5.5%) и промышленной (4%) зон, наименьшее (2.08%) – в селитебной многоэтажной зоне, что связано со слабым озеленением и незначительным использованием удобрений на придворовых территориях.

Растительность на территории города представлена преимущественно ассоциациями соснового леса с рододендровым подлеском. Растительный покров Улан-Удэ и его окрестностей неоднородный, он испытывает высокую антропогенную нагрузку и повышенную степень деградации из-за сочетания неблагоприятных факторов.

Техногенные источники загрязнения. Улан-Удэ вошел в приоритетный список городов с очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха (Базаров и др., 2022). В городе функционирует 3 467 промышленных источников загрязнения атмосферы и более чем 20 000 автономных источников теплоснабжения (Общегородской..., 2013). Основными стационарными источниками загрязнения являются ведущие предприятия городской теплоэнергетики ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 и крупные промышленные предприятия: локомотивовогоремонтный, авиационный заводы, завод по производству металлических конструкций “Улан-Удэстальмост” (рис. 1). В меньшей степени загрязнение городской среды связано с предприятиями строительной (кирпичный, бетонный, силикатный заводы) и пищевой (птицефабрики, мясокомбинат, кондитерский завод) промышленности, стекольным, судостроительным заводами (Дамбиев и др., 2016; Григорьева, Коновалов, 2018). Источниками поллютантов служат также золошлакоотвалы ТЭЦ, очистные сооружения города, свалка ТБО. В 2022 г. в атмосферный воздух Улан-Удэ поступило 23.3 тыс. тонн выбросов от стационарных источников загрязнения. Основными поллютантами

являются диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода, взвешенные частицы (Гос. доклад..., 2023). Контроль загрязнения воздуха ПАУ по БАП выполнен в 2017–2019 гг. в 142 городах РФ, включая города Байкальского региона – Слюдянку, Байкальск, Листвянку (Корунов и др., 2020), однако Улан-Удэ, на территории которого размещены более мощные источники загрязнения ПАУ, в этот перечень не вошел.

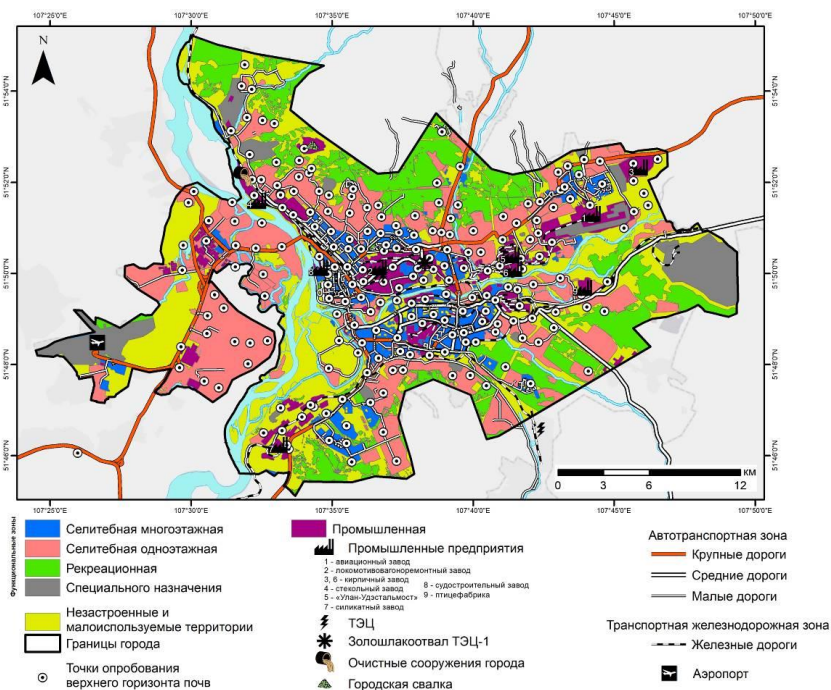


Рис. 1. Карта функционального зонирования территории г. Улан-Удэ с точками отбора почвенных проб и крупными источниками загрязнения.

Fig. 1. Map of land use zones of the city of Ulan-Ude with soil sampling sites and main pollution sources.

Главные объекты теплоэнергетики – Улан-Удэ ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 – работают на тугнуйских каменных углях. Анализ содержания ПАУ в образцах тугнуйского угля и золошлаковых отходов

двух ТЭЦ показал, что сумма 16 рассматриваемых ПАУ в образце угля достигает 19 188 нг/г с высокой долей каждой группы ПАУ. Низко- и высокомолекулярные структуры составляют 30.1 и 29.3% от суммы ПАУ, преобладают среднемолекулярные ПАУ с долей 40.6%. Состав тугуйских углей определяется 2–3-ядерными нафталином (10.6% от суммы ПАУ) и фенантреном (10.9%), 4-ядерными хризен (16.4%), флуорантеном (10.9%), пиреном (8.8%), 5–6-ядерными бензо(b)флуорантеном (9.2%) и бензо(ghi)периленом (7.4%).

В золошлаковых отходах двух улан-удэнских ТЭЦ относительно близкое суммарное содержание полиаренов: 68 нг/г – ТЭЦ-1, 72.2 нг/г – ТЭЦ-2. В отходах ТЭЦ-1 на долю низко- и среднемолекулярных структур приходится 40 и 42.1% соответственно, высокоядерных ПАУ значительно меньше – 17.9%. В структуре ПАУ золошлака ТЭЦ-1 доминируют 3-ядерный фенантрен (26.7%) и 4-ядерные флуорантен (16.7%), хризен (11.7%) и пирен (9.5%). В отходах ТЭЦ-2 наблюдается похожая картина: преобладают низко- и среднемолекулярные ПАУ, доли которых 43.1 и 43.2% соответственно, а именно: низкомолекулярный фенантрен (29.4%) и среднемолекулярные флуорантен (15.3%), хризен (10.1%), бенз(а)антрацен (9.8%) и пирен (7.9%).

С промышленным сжиганием нефти связано поступление флуорантена, пирена, хризена. При сжигании бытовых отходов образуются пирен, фенантрен, флуорантен (Хаустов, Редина, 2019).

Улан-Удэ является крупным транспортным узлом, через него проходит участок Транссибирской магистрали и федеральная автотрасса “Байкал”. Таким образом, помимо стационарных источников, поступление поллютантов в городскую среду обусловлено автомобильным и железнодорожным транспортом и объектами их инфраструктуры. Автотранспортный поток в городе на 77% состоит из легковых автомобилей, около 21% связано с движением грузового транспорта, из которых 11% приходится на долю дизельных автомобилей.

Оценка выбросов автотранспорта также была выполнена Санкт-Петербургским институтом прикладной экологии и гигиены (ИПЭГ) в 2012 г., в рамках которой проведены натурные об-

следования интенсивности и состава автотранспортных потоков на основных дорогах Улан-Удэ. По объему выбросов в атмосферу – 23.5 тыс. тонн в год – автотранспорт в Улан-Удэ не уступает стационарным источникам. Наибольшая интенсивность движения в городе (более 5 000 авт./час) зафиксирована на ул. Бабушкина, наименее загруженной является ул. Домостроительная (70 авт./час). На других 15 автодорогах города также установлена высокая интенсивность движения транспорта – 2 000–5 000 авт./час.

Состав автотранспортных выбросов представлен в основном 4–6-ядерными соединениями, если используется бензин, тогда как от сжигания дизельного топлива больше поступают более “легкие” структуры ПАУ (Miguel et al., 1998). Так, при сжигании бензина в двигателях автомобилей в выбросах концентрируются высокомолекулярные бензо(ghi)перилен и индено(1,2,3-cd)-пирен, а от автомобилей на дизельном топливе – аценафтилен, фенантрен, флуорантен и пирен с высокой долей бензо(k)флуорантена и бензо(b)флуорантена. Нафталин преобладает среди низкомолекулярных структур в выбросах автомобилей независимо от вида топлива (Mart et al., 1999; Медведева, 2013). Под влиянием автотранспорта в почвах интенсивно накапливаются 3-ядерные фенантрен и антрацен, 4-ядерные флуорантен и пирен, 5–6-ядерные бензо(b)флуорантен, БаП, бензо(ghi)перилен и индено(1,2,3-cd)-пирен (Morville et al., 2004; Devos et al., 2006; Emoyan et al., 2020).

В городе широко распространены районы с индивидуальной жилой застройкой, которая не подключена к центральной системе тепловодоснабжения. В Улан-Удэ насчитывается около 43 тыс. индивидуальных жилищных строений такого типа. В этих районах города в отопительный сезон используют автономные источники теплоснабжения – котлы и печи, в которых сжигается в основном древесина хвойных пород и в меньшей степени уголь. При сжигании углей в частных домах могут формироваться техногенные аномалии, связанные с накоплением в почвах аценафтилена, антрацена, пирена, хризена, флуорантена, бенз(а)антрацена, БаП (Bojakowska, Sokołowska, 2001; Касимов и др., 2016).

В 2012 г. Санкт-Петербургским институтом прикладной экологии и гигиены (ИПЭГ) была проведена оценка загрязнения атмосферного воздуха автономными источниками теплоснабже-

ния с обследованием 1 015 источников (5% от их общего числа в городе), которые обеспечивают теплом 995 домов в разных районах Улан-Удэ. Установлено, что в 77.7% случаев в качестве автономных источников теплоснабжения используют печи, а в 22.3% случаев котлы, при этом 50% всех котлов являются самодельными. Доля древесины, используемой в качестве топлива в данных отопительных системах, оценивается в 81.9%, преобладают (93% от всей сжигаемой древесины) сосновые дрова. На уголь приходится 17.4%, 77% от которого составляет тугнуйский каменный уголь.

Поступление полиаренов в городские почвы связано и с влиянием лесных пожаров. Установлено, что при горении хвойной растительности образуются в основном низкомолекулярные структуры, такие как нафталин и флуорен, возможно поступление 4-ядерного пирена. В небольшом количестве в разных соотношениях поступают 4–6-ядерные бензо(ghi)перилен, хризен, бенз(а)антрацен; образование средне- и высокомолекулярных ПАУ связано с горением смолистых компонентов древесины (Цибарт, Геннадиев, 2011; Максимова и др., 2013).

Большинство одних и тех же средне- и высокомолекулярных соединений ПАУ могут поступать из различных источников, т. е. похожие наборы поллютантов могут аккумулироваться в почвенном покрове и от выбросов автотранспорта, и от объектов теплоэнергетики, при этом в условиях города происходит их наложение. Это учитывалось при анализе и выявлении основных источников поллютантов в отдельных функциональных зонах, так как их загрязнение формируется под воздействием не только локальных, но и удаленных источников, расположенных в других зонах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ПАУ в фоновых и городских почвах. Состав ПАУ в верхнем слое фоновых и городских почв показан на рисунке 2. По сравнению с фоном в структуре загрязнения городских почв наблюдается более равномерное распределение долей индивидуальных ПАУ. В городе заметно выше содержание 2–3-ядерных антрацена (12%), нафталина (9%), флуорена (7%) и 4-ядерного бенз(а)антрацена (7%). В фоновых почвах вариабельность долей

ПАУ значительнее, больше всего накапливаются средне- и высокомолекулярные структуры: флуорантен (16%), бензо(ghi)перилен (13%), пирен (12%), бензо(b)флуорантен (11%). Доля большинства 2–3-ядерных ПАУ не превышает 1%, только у фенантрена она составляет 10%.

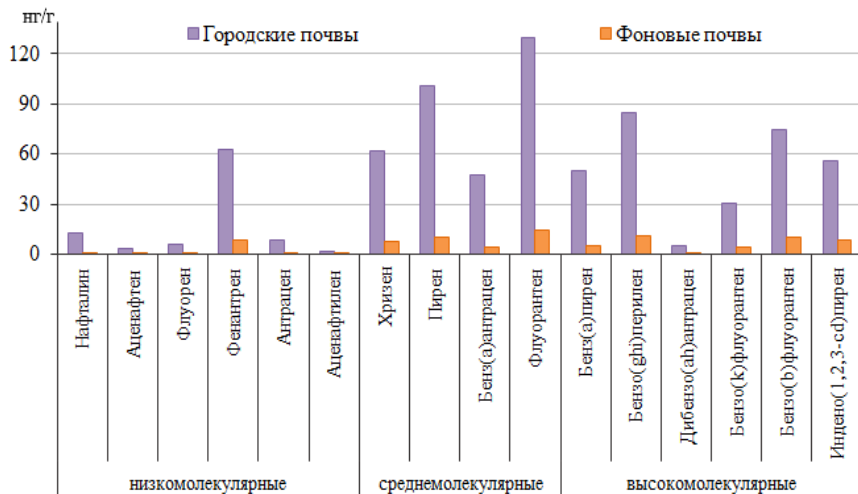


Рис. 2. Содержание индивидуальных полиаренов в почвах Улан-Удэ и в фоновых почвах.

Fig. 2. PAHs content in urban and background soils of the city of Ulan-Ude.

Среднее содержание суммы всех 16 анализируемых ПАУ в городских почвах 735 нг/г превышает фоновые значения в 8.5 раз. Наибольшей суммой – 2 102 нг/г – характеризуется транспортная железнодорожная зона, что превышает ее величину в других функциональных зонах в 2.6–5.2 раза (табл. 2, рис. 3). По уровню содержания ПАУ в почвах выделяются также автотранспортная (806 нг/г) и промышленная (797 нг/г) зоны.

Соотношение низко-, средне- и высокомолекулярных ПАУ указывает на преобладание последних в почвах функциональных зон Улан-Удэ и в фоновых почвах.

Таблица 2. Сумма ПАУ, среднее %-ное содержание низко- (Н), средне- (С) и высокомолекулярных (В) ПАУ и соотношение между ними в верхнем горизонте почв по функциональным зонам Улан-Удэ и в фоновых почвах
Table 2. The total content of PAHs, the average percentage of low- (H), medium- (C) and high-molecular-weight (H) PAHs and the ratio between them in the upper soil horizon in the land use zones of Ulan-Ude and in background soils

Функциональные зоны города	Сумма ПАУ, нг/г	Доля Н в сумме ПАУ	Доля С в сумме ПАУ	Доля В в сумме ПАУ	Соотношение Н : С : В
Промышленная (41)	797	16.3%	46.8%	37.0%	1: 2.9: 2.3
Селитебная многоэтажная (56)	487	11.0%	42.1%	46.9%	1: 3.8: 4.2
Селитебная одноэтажная (76)	789	10.8%	46.1%	43.0%	1: 4.3: 4.0
Автотранспортная (22)	806	14.0%	40.1%	45.9%	1: 2.9: 3.3
Транспортная железнодорожная (7)	2102	16.8%	60.9%	22.3%	1: 3.6: 1.3
Рекреационная (18)	405	12.3%	44.3%	43.4%	1: 3.6: 3.5
Город в целом (220)	735	12.8%	46.3%	40.9%	1: 3.6: 3.2
Фон (12*)	87	12.6%	41.9%	45.5%	1: 3.3: 3.6

Примечание. *В скобках – количество проб.
Note. *The number of samples is in parentheses.

Вариабельность данных соотношений среди функциональных зон незначительна, за исключением транспортной железнодорожной зоны, где доля среднемoleкулярных ПАУ увеличивается до 61%, а высокомолекулярных – уменьшается до 22 %.

В фоновых почвах концентрации ПАУ незначительны, их сумма составляет всего 87 нг/г (табл. 3). Так же, как в городских почвах, доминируют средне- и высокомолекулярные соединения, их концентрации составляют 36.4 и 39.6 нг/г соответственно. Среди низкомолекулярных соединений интенсивнее всего накапливается фенантрен (8.6 нг/г), из среднемoleкулярных ПАУ – флуорантен (14.2) и пирен (10.2). Бензо(ghi)перилен (11.4 нг/г), бензо(b)флуорантен (9.9), индено(1,2,3-cd)пирен (8.1) преобладают среди высокоядерных полиаренов.

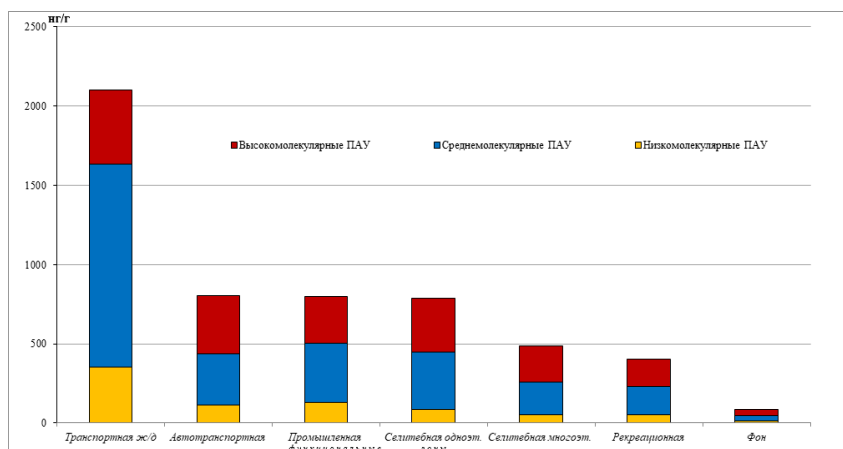


Рис. 3. Содержание низко-, средне- и высокомолекулярных ПАУ в верхнем горизонте почв по функциональным зонам Улан-Удэ и в фоновых почвах.

Fig. 3. Content of low-, medium- and high-molecular-weight PAHs in the upper horizon of urban soils by land use zones of the city of Ulan-Ude.

Таблица 3. Среднее содержание ПАУ в верхнем (0–10 см) горизонте почв по функциональным зонам г. Улан-Удэ, нг/г

Table 3. Mean content of PAHs in the upper horizon of urban soils by land use zones of the city of Ulan-Ude, ng/g

ПАУ (количество колец)	Фон (12*)	Промышленная (41)	Жилая многоэт. (56)	Жилая одноэт. (76)	Автотранспортная (22)	Транспортная ж/д (7)	Рекреационная (18)	Среднее в городе (220)
Нафталин (2)	0.88	15.4	5.61	14.7	12.1	35.8	6.36	12.5
Аценафтен (2)	0.32	5.06	1.57	2.99	3.13	7.20	1.71	3.08
Флуорен (3)	0.59	10.5	3.29	5.83	6.19	17.2	3.62	6.29
Фенантрен (3)	8.56	86.1	38.7	50.7	82.1	270	33.2	62.7
Антрацен (3)	0.45	10.1	3.63	9.64	7.79	20.4	4.27	8.11
Аценафтилен (3)	0.15	2.41	0.85	1.51	1.58	2.55	0.86	1.50
Сумма низкомолекулярных ПАУ	10.9	130	53.7	85.4	113	353	50	94.2
Хризен (4)	7.44	67.9	40.4	68.3	60.5	179	33.8	62.0
Пирен (4)	10.2	113	57.8	107	95.5	408	50.6	101
Бенз(а)антрацен (4)	4.60	48.1	30.8	56.9	45.2	110	24.5	47.5
Флуорантен (4)	14.2	144	75.8	132	122	583	70.7	130

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

ПАУ (количество колец)	Фон (12*)	Про- мыш- ленная (41)	Жилая многоэт. (56)	Жилая одноэт. (76)	Авто- тран- спортная (22)	Транс- портная ж/д (7)	Рекреа- ционная (18)	Среднее в городе (220)
Сумма средне- молекулярных ПАУ	36.4	373	205	364	323	1280	180	341
Бенз(а)пирен (5)	5.51	47.7	35.9	62.2	53.8	59.9	26.7	50.0
Дибензо(ah)антрацен (5)	0.58	5.89	3.14	5.60	6.71	8.22	2.70	5.06
Бензо(k)флуорантен (5)	4.16	28.9	22.1	35.9	32.3	63.1	18.5	30.7
Бензо(b)флуорантен (5)	9.88	72.6	54.9	81.4	83.4	182	42.8	74.2
Бензо(ghi)перилен (6)	11.4	86.3	66.1	91.9	118	101	51.5	84.7
Индено(1,2,3-cd)пирен (6)	8.10	53.2	45.9	62.6	76.0	54.3	33.6	55.9
Сумма высоко- молекулярных ПАУ	39.6	295	228	340	370	469	176	301

Примечание. *В скобках – количество проб.
Note. *The number of samples is in parentheses.

Наибольшими концентрациями низкомолекулярных ПАУ характеризуются почвы транспортной железнодорожной зоны – 353 нг/г, что в 3.75 раза превышает среднюю для города величину. Довольно высокое содержание низкомолекулярных ПАУ в промышленной (130 нг/г) и автотранспортной (113 нг/г) зонах. Во всех функциональных зонах Улан-Удэ наиболее интенсивно аккумулируется 3-ядерный фенантрен, с меньшей интенсивностью – нафталин и антрацен. Железнодорожная зона значительно опережает другие зоны города по накоплению и средне- и высокомолекулярных ПАУ. Содержание среднемoleкулярных ПАУ достигает 1280 нг/г, в основном за счет флуорантена (583 нг/г) и пирена (408 нг/г).

ПАУ являются приоритетными органическими поллютантами, связанными с деятельностью автомобильного и железнодорожного транспорта. Это подтверждают работы по изучению влияния железнодорожного транспорта на загрязнение почв ПАУ в Польше (Wiłkomirski et al., 2018). Их поступление при эксплуатации железнодорожного транспорта связано с (1) мобильными источниками, такие как локомотивы и другие элементы подвижного состава, (2) износом элементов конструкций подвижного состава, (3) испарением нефтепродуктов, использовавшихся для консервации железнодорожных шпал, (4) утечкой топлива и грузов, (5) сжиганием топлива, масел, горюче-смазочных материалов и других нефтепродуктов, используемых при эксплуатации подвижных составов (Wiłkomirski et al., 2011; Wiłkomirski et al., 2018).

Анализ содержания ПАУ в почвах, приуроченных к железнодорожным зонам на северо-востоке Польши, выявил неодинаковую интенсивность аккумуляции полиаренов на участках разного функционального назначения. Так, суммарная концентрация 17 исследованных ПАУ в почвах существенно возрастает от участка очистки подвижного состава (1 867–15 376 нг/г) до максимальной вблизи железнодорожной платформы (10 647–62 289 нг/г). Загрязнение почв под воздействием железных дорог определяется в основном 4- и 5-ядерными структурами ПАУ, в наименьшей степени – 3-ядерными соединениями. Среди 4–6-ядерных ПАУ интенсивно аккумулируются флуорантен, пирен, хризен, бензо(b)флуорантен, бензо(ghi)перилен, БаП (Mętrak et al., 2015).

Изучение экологического состояния двух основных железнодорожных объектов ЦАО г. Москвы (Белорусский вокзал и Три вокзала) показало повышенное содержание БАП на участках, прилегающих к железнодорожному полотну. Содержание БАП в почвах на объекте “Белорусский вокзал” варьировало от 6.2 до 11 890 нг/г при среднем содержании 570 нг/г. Превышения средней концентрации БАП относительно фоновых почв, расположенных вблизи объекта, достигают почти в 36 раз. На железнодорожном объекте “Три вокзала” содержание БАП находится в пределах 30–3 890 нг/г при средней концентрации 470 нг/г. Среднее содержание БАП в почвах данного объекта превышает фоновые концентрации в 94 раза. По кратности превышения ПДК в почвах этих железнодорожных объектов установлены высокий (Три вокзала) и очень высокий (Белорусский вокзал) уровни загрязнения (Макаров, 2014).

Проведено сравнение полученных для почв Улан-Удэ результатов с данными для почв Байкальска (Иркутская обл.). Источниками ПАУ в обоих городах являются выбросы промышленных предприятий и теплоэнергетики (в Байкальске это целлюлозно-бумажный комбинат и местная ТЭЦ), а также авто- и железнодорожный транспорт. Как и в Улан-Удэ, через Байкальск проходит федеральная автотрасса “Байкал” и участок Транссибирской магистрали. Установлено, что во всех функциональных зонах Байкальска интенсивнее всего аккумулируются флуорантен и бензо(б)флуорантен, они на 61.1 и 29.4% определяют загрязнение почвенного покрова ПАУ в Байкальске (Кошелева и др., 2024). В почвах Улан-Удэ более разнообразный состав загрязнения, несмотря на доминирование 4-ядерных флуорантена и пирена (рис. 2). В почвах Байкальска аккумуляция 4-ядерных полиаренов составляет 62.3% от суммы 16 анализируемых ПАУ, 30.7% приходится на долю высокомолекулярных соединений. Для почв Улан-Удэ также характерно преобладание средне- и высокомолекулярных ПАУ, однако среднемолекулярные полиарены незначительно превышают долю 5–6-ядерных, тогда как в Байкальске превышение составляет более чем в 2 раза.

Соотношения между тремя группами ПАУ в функциональных зонах Байкальска сильно варьируют. В почвах промышлен-

ной и рекреационной зон доля 4-ядерных ПАУ достигает 89 и 90%, в автотранспортной 34%, в железнодорожной транспортной 67%. Автотранспортная зона является единственной с максимальной долей высокомолекулярных ПАУ (56%). Для Улан-Удэ характерны незначительные колебания в соотношении средне- и высокомолекулярных ПАУ, за исключением транспортной железнодорожной зоны, где доля 4-ядерных ПАУ больше 5–6-ядерных в 2.7 раза (табл. 2). В Байкальске загрязнение почв в автотранспортной зоне более чем в 13 раз выше, чем в железнодорожной, что говорит о более значительном влиянии автотранспорта на аккумуляцию ПАУ в почвах. Промышленная зона уступает по сумме ПАУ автотранспортной в 1.8 раза. В Улан-Удэ сумма полиаренов в железнодорожной транспортной зоне, наоборот, превышает автотранспортную и промышленную зоны в 2.6 раза. В целом превышение в содержании ПАУ в почвах Байкальска над фоновыми составляет 5 раз, а в Улан-Удэ оно достигает в 8.5 раза.

Пространственное распределение ПАУ в городских почвах. Сумма всех 16 исследуемых ПАУ в почвенном покрове Улан-Удэ варьирует в диапазоне 17–9 540 нг/г. В 77 пробах верхнего горизонта почв, то есть на 35% территории Улан-Удэ, концентрация суммы ПАУ не превышает 250 нг/г. Около 22% площади города занято почвами с суммарным содержанием полиаренов в пределах 250–500 нг/г, на 26% площади города значение суммы ПАУ колеблется от 500 до 1 000 нг/г, на 10% – от 1 000 до 2 000 нг/г, а на 3% территории Улан-Удэ – от 2 000 до 3 000 нг/г.

Наиболее высокие уровни концентрации суммы ПАУ – 3 226–9 540 нг/г – установлены в 9 точках опробования (4% городской территории). Они образуют девять наиболее контрастных локальных аномалий в почвах города, показанных пунсонами голубого и синего цвета на рисунке 4.

В аномалии 1, которая расположена в железнодорожной функциональной зоне, сумма ПАУ достигает 3 226 нг/г. Эта аномалия располагается вблизи железнодорожных путей, станции Заудинской и промзоны, в 360 м северо-восточнее находится мясокомбинат. Неподалеку складировается строительный мусор и движутся грузовые автомобили по частично грунтовой, частично ас-

фальтированной автодороге. Загрязнение почв в данной аномалии обусловлено преимущественно среднемолекулярными ПАУ, их доля достигает 76%. Интенсивнее всего накапливаются флуорантен и пирен: их вклады в сумму ПАУ равны 34.5 и 26.8% соответственно.

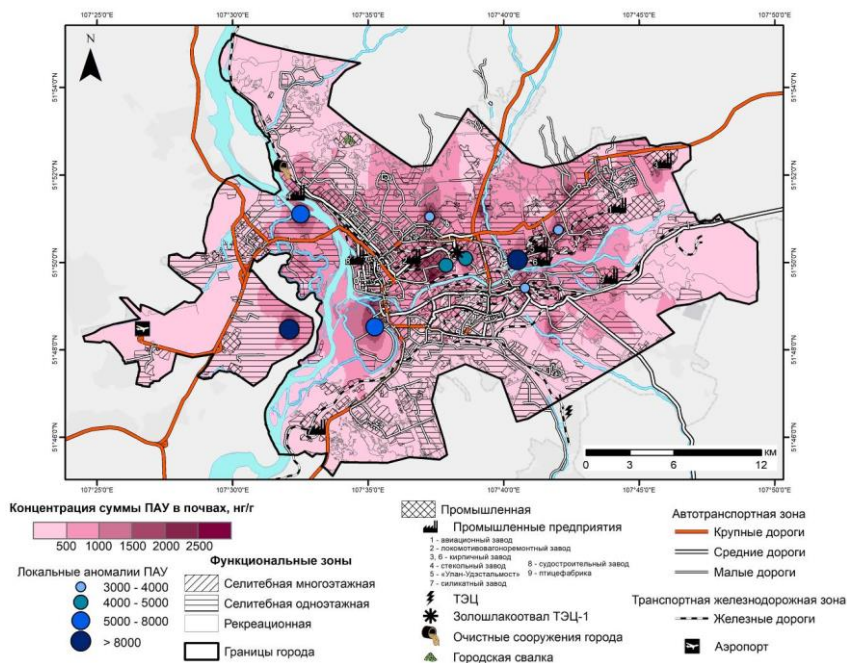


Рис. 4. Распределение суммы ПАУ в верхнем (0–10 см) слое почв г. Улан-Удэ.

Fig. 4. Distribution of total content of PAHs in in the upper horizon of soils of the city of Ulan-Ude.

В локальной аномалии 2 сумма ПАУ составляет 3 887 нг/г. Она расположена в селитебной одноэтажной зоне вблизи гаражного кооператива, севернее промзоны локомотивовогоноремонтного завода. Этот участок занимает среднюю часть склона, т. е. нахо-

дится в трансэлювиальной позиции. На 48% аномалия сформирована среднемолекулярными ПАУ, главным образом флуорантен и пирен, среди высокомолекулярных полиаренов следует отметить бензо(ghi)перилен. Доля флуорантена и пирена составляет 19.1 и 15.6% от общей суммы ПАУ, доля бензо(ghi)перилена – 10.6%.

Локальная аномалия 3, где суммарная концентрация ПАУ достигает 3 974 нг/г, расположена в северо-восточной части Улан-Удэ, в пос. Матросова. Она находится в одноэтажной селитебной зоне, в 500 м от промплощадки авиационного завода и 650–700 м от предприятия “Улан-Удэстальмост”. Загрязнение почв этого участка, вероятно, обусловлено близостью промышленных объектов и продуктами сжигания угля и древесины в котлах и печах частной застройки. В данной аномалии, как и в предыдущей, специфику загрязнения на 48% определяют среднемолекулярные структуры. Интенсивнее всего аккумулируются 4-ядерные флуорантен и пирен, а также 5-ядерный бензо(b)флуорантен, их доли в общей структуре загрязнения составляют 15, 14.5 и 12.5% соответственно.

Локальная аномалия 4 с суммой ПАУ 4 194 нг/г находится в промышленной зоне, приуроченной к золошлакоотвалу ТЭЦ-1 в центральной части города. В ее формировании участвуют в основном средне- и высокомолекулярные полиарены: среди 4-ядерных соединений – флуорантен (38.5%) и пирен (31%), а среди 5–6-ядерных ПАУ – бензо(ghi)перилен (33%). На долю данных поллютантов приходится 17.7, 14.3 и 14.2% от общей суммы ПАУ соответственно.

Пятая аномалия, где сумма ПАУ составляет 4 382 нг/г, расположена на незначительном расстоянии от предыдущей, в центральной части города, вблизи промышленной зоны ТЭЦ-1 и локомотивовогоноремонтного завода. Аномалия находится в автотранспортной зоне, вблизи крупной асфальтированной дороги, к ней примыкает жилая одноэтажная зона. Аномалия на 73% определяется средне- и высокомолекулярными ПАУ. Среди 4-ядерных ПАУ интенсивнее всего аккумулируются флуорантен и пирен, в структуре общего загрязнения их доли составляют 13.4 и 11.2%. Среди высокомолекулярных ПАУ почти одинаковый вклад (13.9–

10.6%) в суммарное загрязнение дают четыре соединения: бензо(ghi)перилен, бензо(b)флуорантен, индено(1,2,3-cd)пирен и БаП.

Шестая локальная аномалия расположена на острове Богородский. Суммарная концентрация ПАУ здесь составляет 5 415 нг/г. Примечательно, что аномалия удалена от промышленных зон, а ближайшая селитьба находится более чем в 1 км юго-западнее. Данная аномалия находится вблизи асфальтированной дороги, по которой движется спецтехника на дизельном топливе, и административных зданий Муниципального унитарного предприятия “Водоканал”. На острове коммунальными службами минимум два раза в год проводятся санитарные рубки и сжигание сухостоя, а также сжигание сухой травы для защиты водозаборных сооружений. Аномалия характеризуется незначительной аккумуляцией низкомолекулярных ПАУ с долей 9% от суммы ПАУ. Среди среднемолекулярных структур доминируют флуорантен и пирен (36.8 и 29.8% от суммы данной группы ПАУ и 16.8 и 13.6% от общей суммы полиаренов). Из 5–6-ядерных соединений интенсивнее всего накапливаются бензо(ghi)перилен (27.8% от суммы данной группы ПАУ), бензо(b)флуорантен (21.5%) и бенз(a)пирен (20.8%), их доли от суммы ПАУ – 12.6, 9.8 и 9.5% соответственно. Перечисленные 4–6-ядерные полиарены определяют на более чем 62% уровень содержания ПАУ в данной аномалии.

Следующие две локальные аномалии 7 и 8 сформировались в почвах левобережья р. Селенги, в пределах селитебной одноэтажной зоны. Аномалия 7, где сумма полиаренов равна 6 785 нг/г, расположена севернее 8-ой, в ней доминируют средне- и высокомолекулярные структуры с концентрациями 3 159 и 3 563 нг/г при доле 2–3-ядерных соединений менее 1%. Среди 4-ядерных полиаренов интенсивно аккумулируются флуорантен и пирен с долями 29.4 и 26.6% от суммы среднемолекулярных ПАУ и 13.7 и 12.4% от всех ПАУ. На бензо(ghi)перилен, бензо(b)флуорантен и БаП приходится 25.9, 22 и 21% от всех 5–6-ядерных ПАУ, в суммарном содержании ПАУ их доля составляет 13.6, 11.5 и 11% соответственно. Перечисленные средне- и высокоядерные ПАУ составляют более чем 62% суммы ПАУ.

В аномалии 8 сумма ПАУ достигает 8 468 нг/г, она так же обусловлена средне- и высокомолекулярными ПАУ, доля низкомолекулярных ПАУ составляет менее 4%. Из 4-ядерных структур преобладают флуорантен и пирен (31.6 и 33.4% от суммы всех среднемолекулярных ПАУ). Среди 5–6-ядерных соединений интенсивно аккумулируются бензо(ghi)перилен (24% от суммы высокомолекулярных ПАУ), бензо(b)флуорантен (23.3%), БаП (20.9%) и индено(1,2,3-cd)пирен (20.2%). В общей сумме ПАУ 15.3% приходится на пирен, 14.5% – на флуорантен, 12.1% – бензо(ghi)перилен, 11.7% – бензо(b)флуорантен, 10.5% – БаП, 10.2% – индено(1,2,3-cd)пирен, что составляет более 74% общей суммы.

Абсолютный максимум суммы ПАУ 9 540 нг/г зафиксирован в локальной аномалии 9 в транспортной железнодорожной зоне. Аномалия примыкает на юге к небольшой промышленной зоне, где размещены малые предприятия по обработке металла, ремонту автомобилей и изготовлению мебели, севернее нее проходит асфальтированная автодорога, а в 350 м к востоку расположен бетонный завод. В этой аномалии интенсивно накапливается 3-ядерный фенантрен (1 461 нг/г), что составляет 77.7% от суммы всех низкомолекулярных ПАУ и 15.3% от суммы всех 16 рассматриваемых ПАУ. Среди среднемолекулярных соединений лидируют флуорантен и пирен (2 612 и 1 701 нг/г), они на 46.5 и 30.3% определяют загрязнение данной группой ПАУ и на 27.4 и 17.8% – загрязнение всеми ПАУ. В группе высокомолекулярных соединений выделяется бензо(b)флуорантен (891 нг/г), что составляет 43.7% от всех 5–6-ядерных ПАУ и 9.3% от суммы ПАУ. Таким образом, флуорантен, пирен, фенантрен и бензо(b)флуорантен на 70% определяют загрязнение этого участка железнодорожной зоны.

Устанавливая источники ПАУ в рассмотренных аномалиях, следует учитывать наложение нескольких видов источников. Аномалии 1 и 9 сформировались в основном под воздействием железнодорожной инфраструктуры, при этом близость автомобильных дорог обусловила поступление полиаренов от легкового и грузового транспорта. Кроме того, вблизи данных аномалий расположены предприятия пищевой и строительной промышленности, выбросы которых также могут содержать ПАУ. В образо-

вании аномалий 3–5 ведущую роль сыграли крупные промышленные предприятия, однако нельзя не отметить влияние одноэтажной жилой зоны, где для генерации тепла и приготовления пищи сжигаются уголь и древесина. Этот источник ПАУ определенно сказывается и на усилении контрастности аномалий 7 и 8.

Анализируя состав всех локальных аномалий ПАУ, следует выделить пару флуорантен–пирен: эти 4-ядерные ПАУ доминируют не только среди среднемолекулярных соединений, но и выступают как приоритетные поллютанты в целом среди всех 16 исследуемых ПАУ. Значительная роль в формировании аномалий принадлежит также высокомолекулярным полиаренам – бензо(ghi)перилену, бензо(b)флуорантену и БаП. Можно отметить и индено(1,2,3-cd)пирен, который в значительных концентрациях присутствует в аномалиях 5 и 8. Данная группа средне- и высокомолекулярных ПАУ образует основное “ядро” аномалий, где их суммарный вклад в загрязнение ПАУ достигает 73–74%.

Индикаторные соотношения ПАУ. Соотношение антрацена A к сумме антрацена и фенантрена P используется для разделения петрогенных и пирогенных источников ПАУ. Для города в целом и для большей части функциональных зон города среднее значение $A/(A+P) > 0.1$, что указывает на преобладание пирогенных источников ПАУ (табл. 4). Однако если рассматривать распределение значений данного соотношения по функциональным зонам, то однозначного вывода о доминировании одного типа источника сделать нельзя. Более половины точек опробования (57.7%) характеризуются значением $A/(A+P) < 0.1$, что говорит о преобладании петрогенных источников ПАУ. Так, в двух транспортных зонах средние значения составляют 0.07 и 0.09, при этом на 100% территории железнодорожной зоны значения $A/(A+P) < 0.1$. Для промышленной и в селитебной одноэтажной зон средние соотношения равны 0.10 и 0.14, а значения $A/(A+P) < 0.1$ наблюдаются на 65.8 и 48.3% территории данных зон соответственно. Это говорит об изменении роли и степени воздействия пирогенных и петрогенных источников в пределах отдельных функциональных зон.

Таблица 4. Индикаторные отношения ПАУ в верхнем горизонте городских почв по функциональным зонам г. Улан-Удэ

Table 4. Indicator ratios of PAHs in the upper horizon of urban soils by land use zones of the city of Ulan-Ude

Индикаторное отношение		Промышленная (41*)	Транспортная авто (22)	Транспортная ж/д (7)	Селитебная многоэт. (56)	Селитебная одноэт. (76)	Рекреационная (18)	Город в целом (220)
Антрацен/ антрацен+фенантрен <i>A/(A+P)</i>	Среднее	0.10	0.09	0.07	0.11	0.14	0.13	0.12
	Мин.	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	Макс.	0.27	0.22	0.09	0.37	0.80	0.44	0.80
Фенантрен/ антрацен <i>P/A</i>	Среднее	11.2	11.9	13.9	10.7	9.68	9.16	10.5
	Мин.	2.72	3.46	10.6	1.72	0.26	1.26	0.26
	Макс.	25.2	24.3	23.4	24.6	24.6	21.3	25.2
Бенз(к)флуорантен/ бенз(б)флуорантен <i>BkF/BbF</i>	Среднее	0.38	0.38	0.38	0.40	0.41	0.42	0.40
	Мин.	0.18	0.28	0.30	0.31	0.21	0.36	0.18
	Макс.	0.56	0.56	0.45	0.56	0.59	0.50	0.59

Продолжение таблицы 4
Table 4 continued

Индикаторное отношение		Промышленная (41*)	Транспортная авто (22)	Транспортная ж/д (7)	Селитебная многоэт. (56)	Селитебная одноэт. (76)	Рекреационная (18)	Город в целом (220)
Флуорантен/ флуорантен + пирен <i>FL/(FL+PY)</i>	Среднее	0.57	0.56	0.57	0.57	0.58	0.59	0.58
	Мин.	0.49	0.53	0.52	0.50	0.49	0.49	0.49
	Макс.	0.63	0.60	0.61	0.61	0.66	0.65	0.66
Бенз(а)антрацен/ бенз(а)антрацен + хризен <i>BaA/(BaA+C)</i>	Среднее	0.40	0.39	0.40	0.42	0.40	0.41	0.41
	Мин.	0.29	0.29	0.37	0.28	0.27	0.36	0.27
	Макс.	0.48	0.51	0.45	0.51	0.54	0.50	0.54

Примечание. *В скобках – количество проб.
Note. *The number of samples is in parentheses.

Наиболее высокие значения $A/(A+P)$ выявлены в почвах селитебной одноэтажной зоны (0.8 и 0.7). Первый максимум (0.8) находится на левобережье Селенги, второй – на северо-восточной окраине Улан-Удэ, оба максимума приурочены к жилым кварталам с индивидуальными системами отопления, в которых сжигают древесину и уголь.

Другой вариант отношения 3-ядерных фенантрена и антрацена P/A так же используется для разделения пирогенных и петрогенных источников. Данное соотношение является очень информативным для определения образовавшихся в результате пиролиза полиаренов при различных технологиях сжигания и видах топлива (Yunker et al., 2002; Хаустов, Редина, 2019). Значение $P/A > 10$ индицирует петрогенные ПАУ, а < 10 указывает на пирогенные ПАУ. Среднее значение P/A в почвенном покрове Улан-Удэ 10.5 и в большинстве функциональных зон оно больше 10 (табл. 4), что указывает на незначительное преобладание петрогенных источников, хотя на 50% территории города $P/A < 10$. Рекреационная и селитебная одноэтажные зоны характеризуются наименьшими средними значениями данного соотношения (9.16 и 9.68). Самое высокое значение 13.9 установлено в транспортной железнодорожной зоне.

Рассматривая разброс значений P/A в каждой зоне, можно отметить наличие разных типов источников в каждой зоне. Например, в промышленной зоне минимум $P/A = 2.72$, т. е. близко к 3, что указывает на сжигание древесины и угля. Максимум (25.2) определенно связан с хранением и использованием различных видов нефтепродуктов и топлива при эксплуатации транспортных средств, так как участки железных дорог часто проходят вблизи промышленных предприятий и используются для транспортировки сырья и готовой продукции.

Сопоставление результатов диагностики преобладающего в каждой функциональной зоне типа источников ПАУ показало их совпадение при выраженном отклонении средних значений $A/(A+P)$ и P/A от пороговых и расхождение при приближении к ним. Так, в железнодорожной зоне, согласно обоим показателям, в почвах преобладают петрогенные источники, тогда как в селитебной одноэтажной и рекреационной зонах доминируют пироген-

ные. В других зонах наблюдается значительная пространственная вариабельность значений обоих соотношений, показывающих преобладание то одного, то другого типа источников ПАУ.

Отношение бенз(к)флуорантена к бенз(б)флуорантену BkF/BbF зависит от расстояния до источника: более высокие значения BkF/BbF определяют наличие локального источника ПАУ, более низкие свидетельствуют о его удаленности (Aubin, Farant, 2000). Среднее для города значение $BkF/BbF = 0.40$ при слабом варьировании между функциональными зонами (0.38–0.42). Максимум $BkF/BbF = 0.59$ зафиксирован в жилебной одноэтажной зоне, что объясняется близостью участка опробования к жилым домам с печным отоплением и гаражному кооперативу, откуда поступает загрязнение от автотранспорта. Другой максимум (0.56) обнаружен в промзоне центральной части города, которая примыкает к золошлакоотвалу ТЭЦ-1 и вблизи которой проходит крупная автодорога. В лесном массиве рекреационной зоны выявлен минимум (0.36) в нескольких метрах от автодороги и в 40–60 м от одноэтажной жилеббы. В этой же зоне обнаружено высокое значение $BkF/BbF = 0.50$, на территории сквера в нижней части склона, что может быть связано с выносом ПАУ из вышерасположенных участков.

Также были рассмотрены соотношения флуорантен к сумме флуорантена и пирена $FL/(FL+PY)$ и бенз(а)антрацена к сумме бенз(а)антрацена и хризена $BaA/(BaA+C)$ (Yunker et al., 2002). Значения соотношения $FL/(FL+PY)$ в пределах Улан-Удэ колеблются от 0.49 до 0.66, т. е. почти повсеместно больше 0.5, что говорит о значительном вкладе сжигания углей в накопление ПАУ. Отношение $BaA/(BaA+C)$, которое для города в целом и для функциональных зон близко к 0.4 или превышает его, также характеризует заметное влияние сжигания углей на поступление полиаренов в городские почвы.

Оценка экологической опасности загрязнения городских почв ПАУ. Среди изученных полиаренов выделяется БаП в связи с высоким уровнем его токсичности и канцерогенной активности. Среднее содержание БаП в почвах г. Улан-Удэ составляет 50 нг/г, что превышает фоновую концентрацию в 9 раз (табл. 5). Поступ-

ление БаП в почвы обусловлено преимущественно сжиганием угля на ТЭЦ и индивидуальными системами отопления, а также эмиссией выхлопных газов автотранспорта. Накопление БаП в почвах уменьшается по функциональным зонам в последовательности: одноэтажная селитебная (62.2 нг/г) > железнодорожная транспортная (59.9 нг/г) > автотранспортная (53.8 нг/г) > промышленная (47.7 нг/г) > многоэтажная селитебная (35.9 нг/г) > рекреационная (26.7 нг/г). Центры аномалий БаП в почвах Улан-Удэ совпадают с центрами аномалий суммы 16 анализируемых ПАУ: максимальное (в 162 раза) превышение фона по БаП установлено в аномалии 8 на левобережье р. Селенги, другие наиболее высокие превышения фона (в 136, 93 и 85 раз) соответствуют аномалиям 7, 6 и 5. В других аномалиях Улан-Удэ превышение фона по БаП колеблется от 42 до 58 раз. Кратность превышения ПДК по БаП в почвах варьирует в аномалиях от 11.6 до 44.6, они характерны в основном для одноэтажной селитебной (в среднем в 3.1 раза), железнодорожной транспортной (3 раза), автотранспортной (2.7 раза) и промышленной (2.4 раза) зон. Превышения ПДК по БаП выявлены на 55% территории Улан-Удэ.

Экологическая опасность всех изученных ПАУ в городских почвах определялась путем суммирования их содержаний, умноженных на коэффициенты *TEF* (табл. 1), и последующего сравнения суммы с ПДК для БаП путем расчета коэффициента экологической опасности *Ko*. Средняя величина *Ko* для всего города составляет 3.89, а по функциональным зонам она варьирует от 2.12 до 5.67 (табл. 5). Средняя сумма БаП-эквивалентов превышает ПДК для БаП почти в 4 раза, что указывает на наличие реальной опасности загрязнения ПАУ почвенного покрова Улан-Удэ. По убыванию показателя *Ko* функциональные зоны образуют ряд: железнодорожная транспортная > селитебная одноэтажная > автотранспортная > промышленная > селитебная многоэтажная > рекреационная. Разница между самой загрязненной транспортной железнодорожной зоной и рекреационной зоной с минимальным загрязнением достигает 2.7 раза. Для фоновых почв показатель *Ko* = 0.45, что более чем в 8.5 раза меньше среднего для города значения.

Таблица 5. Показатель экологической опасности *Ko* для BaP и суммы BaП-эквивалентов ПАУ в верхнем горизонте почв г. Улан-Удэ
Table 5. Index of environmental hazard *Ko* for BaP and the sum of BaP equivalents of PAHs in the upper horizon of soils in Ulan-Ude

Статисти- ческий показатель	Функциональные зоны							
	Фоновая (12)	Промыш- ленная (41)	Авто- транс- портная (22)	Транс- портная ж/д (7)	Селитеб- ная мно- гоэтаж- ная (56)	Селитеб- ная одно- этажная (76)	Рекреа- ционная (18)	Среднее в городе (220)
Средний <i>Ko</i> Минимум Максимум <i>Cv</i> , %	BaП, нг/г							
	0.28	2.39	2.69	3.00	1.79	3.11	1.34	2.50
	0.04	0.05	0.02	0.67	0.06	0.02	0.03	0.02
	0.80	15.8	23.3	12.63	9.34	44.6	4.39	44.5
	83.7	153	179	145	94.6	223	97.7	199
Средняя сумма Средний <i>Ko</i> Минимум Максимум <i>Cv</i> , %	Сумма токсических BaП-эквивалентов ПАУ, нг/г							
	8.99	75.9	86.4	114	55.7	93.5	42.4	77.8
	0.45	3.80	4.32	5.67	2.78	4.67	2.12	3.89
	0.07	0.10	0.07	1.06	0.14	0.05	0.05	0.05
	1.31	24.6	33.7	24.9	13.88	63.9	6.85	63.9
	83.2	144	160	154	90.3	214	96.8	188

Примечание. *В скобках – количество проб.
Note. *The number of samples is in parentheses.

В целом для Улан-Удэ экологическая опасность загрязнения ПАУ верхнего слоя почвенного покрова на 64% определяется БаП, на 9.6% – бензо(б)флуорантеном, на 7.2% – индено(1,2,3-сd)пиреном, на 6.5% – дибензо(аh)антраценом, на 6.1% – бенз(а)-антраценом. В транспортной железнодорожной зоне вклад в сумму токсических эквивалентов наибольший у БаП (52.9%) и бензо(б)флуорантена (16%), а вклады бенз(а)антрацена, дибензо(аh)антрацена и бензо(к)флуорантена составляют 9.68, 7.24 и 5.57% соответственно. В селитебной одноэтажной зоне вклад в сумму токсических эквивалентов на 66.5% обусловлен БаП, на 8.71% – бензо(б)флуорантеном, на 6.7% – индено(1,2,3-сd)пиреном, на 6.1% – бенз(а)антраценом и на 6% – дибензо(аh)антраценом. В автотранспортной зоне БаП и бензо(б)флуорантен обуславливают экологическую опасность ПАУ на 62.3% и 9.65%, а индено(1,2,3-сd)пирен, дибензо(аh)антрацен и бенз(а)антрацен – на 8.8, 7.76 и 5.23% соответственно. В промышленной зоне на 62.9% экологическая опасность ПАУ определяется БаП, на 9.6% бензо(б)флуорантеном, а дибензо(аh)антраценом, индено(1,2,3-сd)пиреном и бенз(а)антраценом на 7.76, 7 и 6.34% соответственно.

Загрязнение ПАУ почвенного покрова города наиболее велико в следующих функциональных зонах: авто- и железнодорожной транспортной, промышленной и селитебной одноэтажной. БаП выступает как наиболее экологически опасный полиарен, он вносит в сумму токсических эквивалентов ПАУ наибольший вклад, меньший вклад у бензо(б)флуорантена, бенз(а)антрацена, дибензо(аh)антрацена и индено(1,2,3-сd)пирена, однако они также являются приоритетными поллютантами почвенного покрова города.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В почвенном покрове г. Улан-Удэ содержание 16 исследуемых ПАУ варьирует в диапазоне 17–9 540 нг/г. Средняя сумма 16 ПАУ в городских почвах составляет 735 нг/г, что выше фоновых значений в 8.5 раз. Наиболее интенсивно ПАУ аккумулируются в транспортной железнодорожной зоне (средняя сумма ПАУ 2102 нг/г), что превышает ее величину в других функциональных зонах

в 2.6–5.2 раза. По уровню содержания ПАУ в почвах выделяются также автотранспортная (806 нг/г) и промышленная (797 нг/г) зоны.

Загрязнение городских почв определяется средне- и высокомолекулярными соединениями ПАУ, доля которых составляет 41 и 46% от суммы ПАУ соответственно. Из низкомолекулярных полиаренов максимальный вклад у фенантрена, на долю которого в сумме ПАУ приходится 9%. Флуорантен и пирен (4-ядерные) лидируют не только среди средномолекулярных ПАУ, они составляют значительную долю в общем содержании ПАУ в почвенном покрове города: флуорантен – 18%, пирен – 13%. Среди высокомолекулярных ПАУ наибольшие концентрации у бензо(ghi)перилена, бензо(b)флуорантена, индено(1,2,3-cd)пирена и БаП с вкладками в сумму ПАУ 12, 10, 8 и 6% соответственно.

Уровни загрязнения почв города сильно варьируют: на 35% территории Улан-Удэ суммарное содержание ПАУ не превышает 250 нг/г, на более чем 22% площади города находится в диапазоне 250–500 нг/г. На 26% площади города сумма ПАУ в почвах колеблется в диапазоне от 500 до 1 000 нг/г, на 10% – от 1 000 до 2 000 нг/г, а на 3% – от 2 000 до 3 000 нг/г. Наиболее высокие уровни концентрации ПАУ в городских почвах (3 226–9 540 нг/г) обнаружены в девяти наиболее контрастных локальных аномалиях, которые занимают 4% территории Улан-Удэ.

Анализ индикаторных соотношений индивидуальных ПАУ позволил определить преобладающие типы источников поллютантов. Соотношения $A/(A+P)$ и P/A позволили определить соотношение пирогенных и петрогенных источников ПАУ в разных функциональных зонах города и приоритетное влияние петрогенных источников в транспортной железнодорожной зоне. Отношения $FL/(FL+PY)$ и $BaA/(BaA+C)$ выявили значительную роль сжигания тугнуйских каменных углей в накоплении ПАУ в городских почвах, что связано с их использованием в отопительных системах селитебной одноэтажной зоны и на ТЭЦ города.

Экологическая опасность загрязнения ПАУ верхнего слоя почвенного покрова Улан-Удэ максимальна в железнодорожной транспортной зоне, где сумма токсических эквивалентов БаП превышает фон в 12.6 раза. В селитебной одноэтажной, автотранс-

портной и промышленной зонах эти превышения составляют 10.4, 9.6 и 8.4 раза. Это указывает на наличие реальной опасности загрязнения ПАУ почвенного покрова Улан-Удэ. На 64% опасность загрязнения ПАУ верхнего слоя почв Улан-Удэ обусловлена БаП, на 9.6%, 7.2%, 6.5%, 6.1% – бензо(б)флуорантеном, индено(1,2,3-сd)пиреном, дибензо(аh)антраценом и бенз(а)антраценом соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базаров А.Б., Баранов А.О., Павлов В.Н., Слепенкова Ю.М., Тагаева Т.О. Анализ и прогноз состояния окружающей среды Республики Бурятия в новых условиях // Мир экономики и управления. 2022. Т. 22. № 2. С. 36–54. DOI: [10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54](https://doi.org/10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54).
2. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Сороковой А.А., Лопатина Д.Н. Загрязнение почв урбанизированных территорий Байкальского региона // Почвоведение. 2022. № 1. С. 119–132. DOI: [10.31857/S0032180X22010038](https://doi.org/10.31857/S0032180X22010038).
3. География Сибири в начале XXI века: В 6 т. / Под ред. В.М. Плюснина; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т географии им. В.Б. Сочавы. Новосибирск: Академическое издательство “Гео”, 2016. Т. 6. Восточная Сибирь / Отв. ред. Л.М. Корытный, А.К. Тулохонов. 2016. 396 с.
4. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах / Под ред. Геннадиева А.Н., Пиковского Ю.И. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 192 с.
5. Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2022 году”. Улан-Удэ: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия, 2023. 411 с.
6. Григорьева М.А., Коновалов П.В. Состояние атмосферного воздуха урбанизированных территорий (на примере г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия) // Ecological education and ecological culture of the population: Proc. of the VI International Scientific Conference on February 25-26, 2018. Prague: Vedecko vydavatel'ske centrum Sociosfera-CZ, 2018. С. 46–49.
7. Дамбиев Ц.Ц., Тыскинеева И.Е., Мадеева Е.В. Анализ загрязнения атмосферного воздуха г. Улан-Удэ объектами теплоэнергетики // Энергетик. 2016. № 3. С. 36–38.
8. Журавлева Е.В., Михайлова Е.С., Журавлева Н.В., Исмагилов З.Р. Полициклические ароматические углеводороды из углей в объектах

- окружающей среды // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28. № 3. С. 328–337. DOI: [10.15372/KhUR2020237](https://doi.org/10.15372/KhUR2020237).
9. Журавлева Н.В., Хабибулина Е.Р., Исмагилов З.Р., Потоккина Р.Р., Созинов С.А. Изучение взаимосвязи строения ископаемых углей и содержания в них полициклических ароматических углеводородов // Химия уст. разв. 2016. Т. 24. №. 3. С. 355–361. DOI: [10.15372/KhUR20160310](https://doi.org/10.15372/KhUR20160310).
10. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.
11. Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Алексеенко А.В. Загрязнение почв соединениями ПАУ при открытой добыче бурого угля (месторождение Шарынгол, Северная Монголия) // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: Труды IV Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2016. С. 135–142.
12. Корунев А.О., Халиков И.С., Сурнин В.А. Сезонное изменение и территориальное распределение содержания бенз(а)пирена в атмосферном воздухе Российской Федерации // Экологическая химия. 2020. № 29(5). С. 270–282.
13. Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М., Жаксылыков Н.Б. Эколого-геохимическая оценка состояния почв г. Байкальска по содержанию полициклических ароматических углеводородов // Почвоведение. 2024. № 4. С. 633–652. DOI: [10.31857/S0032180X24040086](https://doi.org/10.31857/S0032180X24040086).
14. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования. М.: Географический факультет МГУ, 2009. 148 с.
15. Кузьмин В.А. Почвенное районирование // Атлас Байкала. М.: Омская картографическая фабрика, 1993. 130 с.
16. Майстренко В.Н., Ключев Н.А. Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей. М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2004. 337 с.
17. Макаров А.О. Оценка экологического состояния почв некоторых железнодорожных объектов ЦАО г. Москвы: Автореф... дис. канд. биол. наук: 03.02.13. М., 2014. 25 с.
18. Максимова Е.Ю., Цибарт А.С., Абакумов Е.В. Полициклические ароматические углеводороды в почвах, пройденных верховым и низовым пожаром // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 3. С. 63–68.
19. Медведева А.В. Микробная деградация полициклических ароматических углеводородов // Известия НАН РК. Серия биологическая и медицинская. 2013. № 5. С. 98–101.
20. Общегородской сводный том “Охрана атмосферы и предельно допустимые выбросы (ПДВ) г. Улан-Удэ”. СПб.: Ин-т прикл. экологии и

гигиены, 2013. 473 с.

21. *Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 224 с.

22. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”. 2021. С. 751–754.

23. *Убугунов Л.Л.* Почвенные ресурсы Республики Бурятия, их агроэкологическое состояние и рациональное использование // Вестник БГСХА им. В.Р. Филиппова. 2020. № 2. С. 35–46. DOI: [10.34655/bgsha.2020.59.2.005](https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.59.2.005).

24. *Убугунов Л.Л., Убугунова В.И., Бадмаев Н.Б., Гынинова А.Б., Убугунов В.Л., Балсанова Л.Д.* Почвы Бурятии: разнообразие, систематика и классификация // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2012. № 2. С. 45–52.

25. *Хаустов А.П., Редина М.М.* Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций ПАУ в нефти и нефтезагрязненных объектах // Геохимия. 2017. № 1. С. 57–67. DOI: [10.7868/S0016752516120049](https://doi.org/10.7868/S0016752516120049).

26. *Хаустов А.П., Редина М.М.* Индикаторные соотношения концентраций полициклических ароматических углеводородов в объектах сжигания угольного топлива и биомассы // Антропогенная трансформация природной среды. 2019. № 5. С. 64–71.

27. *Цибарт А.С., Геннадиев А.Н.* Ассоциации полициклических ароматических углеводородов в пройденных пожарами почвах // Вестник Моск. ун-та. Сер. География. 2011. № 3. С. 13–19.

28. *Цибарт А.С., Геннадиев А.Н.* Полициклические ароматические углеводороды в почвах: источники, поведение, индикационное значение (обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 788–802. DOI: [10.7868/S0032180X13070125](https://doi.org/10.7868/S0032180X13070125).

29. *Шашков М.В., Сидельников В.Н.* Определение источников эмиссии полициклических ароматических углеводородов в атмосферном воздухе // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. №. 10. С. 29–35. DOI: [10.18412/1816-0395-2022-10-29-35](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-29-35).

30. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. 145 с.

31. *Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A.* Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Critical Review of Environmental Occurrence and Bioremediation // Environmental Management. 2017. Vol. 60. No. 4. P. 758–783. DOI: [10.1007/s00267-017-0896-2](https://doi.org/10.1007/s00267-017-0896-2).

32. *Aubin S., Farant J.P.* Benzo(b)fluoranthene, a Potential Alternative to

- Benzo(a)pyrene as an Indicator of Exposure to Airborne PAHs in the Vicinity of Söderberg Aluminum Smelters // J. Air Waste Management Association. 2000. Vol. 50. P. 2093–2101. DOI: [10.1080/10473289.2000.10464236](https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464236).
33. *Bojakowska I., Sokolowska I.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in brown coals from Poland // Geological Quarterly. 2001. Vol. 45. P. 93–98.
34. *Cui Z., Wang Y., Du L., Yu Y.* Contamination level, sources, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in suburban vegetable field soils of Changchun, Northeast China // Scientific reports. 2022. Vol. 12. No. 1. Art. No: 11301. DOI: [10.1038/s41598-022-15285-5](https://doi.org/10.1038/s41598-022-15285-5).
35. *Demetriades A., Birke M.* Urban geochemical mapping manual: sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting. Brussels: EuroGeoSurveys, 2015. 162 p. DOI: [10.1016/j.gexplo.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.024).
36. *Devos O., Combet E., Tassel P., Paturel L.* Exhaust emissions of PAHs of passenger cars // Polycyclic Aromatic Compounds. 2006. Vol. 26. P. 69–78. DOI: [10.1080/10406630500519346](https://doi.org/10.1080/10406630500519346).
37. *Emoyan O.O., Onocha E.O., Tesi G.O.* Concentration Assessment and Source Evaluation of 16 Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Selected Vehicle-Parks in Southern Nigeria // Sci. Afr. 2020. No. 7. e00296. DOI: [10.1016/j.sciaf.2020.e00296](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00296).
38. *Laumann S., Micic V., Krüge M. A., Achten C., Hofmann T.* Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin // Environmental Pollution. 2011. Vol. 159. P. 2690–2697. DOI: [10.1016/j.envpol.2011.05.032](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.032).
39. *Marr L.C., Kirchstetter T.W., Harley R.A., Miguel A.H., Hering S.V., Hammond S.K.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in motor vehicle fuels and exhaust emissions // Environmental Science and Technology. 1999. Vol. 33. P. 3091–3099. DOI: [10.1021/ES981227L](https://doi.org/10.1021/ES981227L).
40. *Metrak M., Chmielewska M., Sudnik-Wójcikowska B., Wilkomirski B., Staszewski T., Suska-Malawska M.* Does the railway function of railway infrastructure determine qualitative and quantitative composition of contaminants (PAHs, heavy metals) in soil and plant biomass? // Water, Air and Soil Pollution. 2015. Vol. 226. No. 8. P. 253–265. DOI: [10.1007/s11270-015-2516-1](https://doi.org/10.1007/s11270-015-2516-1).
41. *Miguel A.H., Kirchstetter T.W., Harley R.A., Hering S.V.* On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon from gasoline and diesel vehicles // Environmental Science and Technology. 1998. Vol. 32. No. 4. P. 450–455. DOI: [10.1021/es970566w](https://doi.org/10.1021/es970566w).
42. *Morville S., Scheyer A., Mirabel P., Millet M.* Sampling and analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in urban and rural atmospheres: Spatial and geographical variations of concentrations // Polycyclic Aromatic

Compounds. 2004. Vol. 24. No. 4–5. P. 617–634. DOI: [10.1080/10406630490472059](https://doi.org/10.1080/10406630490472059).

43. Nisbet C., LaGoy P. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 1992. Vol. 16. P. 290–300. DOI: [10.1016/0273-2300\(92\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X).

44. Sakari M. Depositional History of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Reconstruction of Petroleum Pollution Record in Peninsular Malaysia / Organic Pollutants Ten Years After the Stockholm Convention – Environmental and Analytical Update. Edited by Tomasz Puzyn and Aleksandra Mostrag-Szlichtyng, 2012. InTech. 472 p.

45. Tobiszewski M., Namieśnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // *Environmental Pollution*. 2012. Vol. 162. P. 110–119. DOI: [10.1016/j.envpol.2011.10.025](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.025).

46. Wilkomirski B., Jabbarov Z. A., Abdrakhmanov T. A., Vokhidova M. B., Jabborov B. T., Fakhrutdinova M. F., Okolelova A.A., Kholdorov S.M., Abdullayeva Y. D. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Natural and Anthropogenically Modified Soils (A Review) // *Biogeosystem Technique*. 2018. No. 5. P. 229–243. DOI: [10.13187/bgt.2018.2.229](https://doi.org/10.13187/bgt.2018.2.229).

47. Wilkomirski B., Sudnik-Wójcikowska B., Galera H., Wierzbicka M, Malawska M. Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution // *Water, Air and Soil Pollution*. 2011. Vol. 218. P. 333–345. DOI: [10.1007/s11270-010-0645-0](https://doi.org/10.1007/s11270-010-0645-0).

48. Yunker M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S. PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition // *Org. Geochem*. 2002. Vol. 33. P. 489–515. DOI: [10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5).

REFERENCES

1. Bazarov A.B., Baranov A.O., Pavlov V.N., Slepenskova Yu.M., Tagaeva T.O., *Analiz i prognoz sostoyaniya okruzhayushchei sredy Respubliki Buryatiya v novykh usloviyakh* (Analysis and forecast of the environment of the Republic of Buryatia in new conditions), *Mir ekonomiki i upravleniya*, 2022, Vol. 22, No. 2, pp. 36–54, DOI: [10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54](https://doi.org/10.25205/2542-0429-2022-22-2-36-54).

2. Belozertseva I.A., Vorob'eva I.B., Sorokovoi A.A., Lopatina D.N., *Zagryaznenie pochv urbanizirovannykh territorii Baikal'skogo regiona* (Soil pollution of urbanised territories of the Baikal region), *Pochvovedenie*, 2022, No. 1, pp. 119–132, DOI: [10.31857/S0032180X22010038](https://doi.org/10.31857/S0032180X22010038).

3. Plyusnina V.M., L.M. Korytnyi, A.K. Tulokhonov (Eds), *Geografiya Sibiri v nachale XXI veka: V 6 t.*, (Geography of Siberia at the beginning of

the XXI century: In 6 vol.), Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo", Vol. 6, Vostochnaya Sibir', 2016, 396 p.

4. Gennadiev A.N., Pikovskiy Yu.I. (Eds), *Geokhimiya politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov v gornykh porodakh i pochvakh* (Geochemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons in rocks and soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1996, 192 p.

5. *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ohrane okruzhayushchei sredy Respubliki Buryatiya v 2022 godu"* (State Report 'On the State and Protection of the Environment of the Republic of Buryatia in 2022'), Ulan-Ude: Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii Respubliki Buryatiya, 2023, 411 p.

6. Grigor'eva M.A., Konovalov P.V., *Sostoyanie atmosfernogo vozdukha urbanizirovannykh territorii (na primere g. Ulan-Ude, Respublika Buryatiya, Rossiya)* (State of atmospheric air of urbanised territories (by the example of Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia)), *Ecological education and ecological culture of the population: Proc. VI Intern. Sci. Conf.*, Prague: Vedecko vydavatelske centrum Sociosfera-CZ, 2018, pp. 46–49.

7. Dambiev Ts.Ts., Tyskineeva I.E., Madeeva E.V., *Analiz zagryazneniya atmosfernogo vozdukha g. Ulan-Ude ob'ektami teploenergetiki* (Analysis of atmospheric air pollution in Ulan-Ude city by heat power engineering facilities), *Energetik*, 2016, No. 3, pp. 36–38.

8. Zhuravleva E.V., Mikhailova E.S., Zhuravleva N.V., Ismagilov Z.R., *Politsiklicheskie aromaticheskie uglevodorody iz uglei v ob'ektakh okruzhayushchei sredy* (Polycyclic aromatic hydrocarbons from coal in environmental objects), *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2020, Vol. 28, No. 3, pp. 328–337, DOI: [10.15372/KhUR2020237](https://doi.org/10.15372/KhUR2020237).

9. Zhuravleva N.V., Khabibulina E.R., Ismagilov Z.R., Potokina R.R., Sozinov S.A., *Izuchenie vzaimosvyazi stroeniya iskopaemykh uglei i sodержaniya v nikh politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov* (Study of the relationship between the structure of fossil coals and the content of polycyclic aromatic hydrocarbons in them), *Khimiya ust. razv.*, 2016, Vol. 24, No. 3, pp. 355–361, DOI: [10.15372/KhUR20160310](https://doi.org/10.15372/KhUR20160310).

10. Kasimov N.S., *Ekogeokhimiya landshaftov* (Ecogeochemistry of landscapes), Moscow: IP Filimonov M.V., 2013, 208 p.

11. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Alekseenko A.V., *Zagryaznenie pochv soedineniyami PAU pri otkrytoi dobyche burogo uglya (mestorozhdenie Sharyngol, Severnaya Mongoliya)* (Soil contamination by PAH compounds during open-pit mining of brown coal (Sharyngol deposit, Northern Mongolia)), *Ekologicheskaya i tekhnosfernaya bezopasnost' gornopromyshlennykh regionov: Proc. IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Ekaterinburg, 2016, pp. 135–142.

12. Korunov A.O., Khalikov I.S., Surnin V.A., Sezonnoe izmenenie i territorial'noe raspredelenie sodержaniya benz(a)pirena v atmosfernom vozdukhе Rossiiskoi Federatsii (Seasonal change and territorial distribution of benz(a)pyrene content in the atmospheric air of the Russian Federation), *Ekologicheskaya khimiya*, 2020, No. 29(5), pp. 270–282.
13. Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Zhaxylykov N.B., Ekologo-geokhimicheskaya otsenka sostoyaniya pochv g. Baikal'ska po sodержaniyu politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov (Ecological and geochemical assessment of Baikalsk soils on the content of polycyclic aromatic hydrocarbons), *Pochvovedenie*, 2024, No. 4, pp. 633–652, DOI: [10.31857/S0032180X24040086](https://doi.org/10.31857/S0032180X24040086).
14. Krechetov P.P., Dianova T.M., *Khimiya pochv. Analiticheskie metody issledovaniya* (Chemistry of soils. Analytical methods of research), Moscow: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2009, 148 p.
15. Kuz'min V.A., *Pochvennoe raionirovanie* (Soil zoning), Atlas Baikala, Moscow: Omskaya kartograficheskaya fabrika, 1993, 130 p.
16. Maistrenko V.N., Klyuev N.A., *Ekologo-analiticheskii monitoring stoikikh organicheskikh zagryaznitelei* (Ecological and analytical monitoring of persistent organic pollutants), Moscow: BINOM. Lab. znaniy, 2004, 337 p.
17. Makarov A.O., *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya pochv nekotorykh zheleznodorozhnykh ob'ektov TsAO g. Moskvy: avtoref... dis. kand. bio. nauk* (Estimation of the ecological state of soils of some railway objects of the Central Administrative District of Moscow: Cand. Biol. Sci. thesis), 03.02.13, Moscow, 2014, 25 p.
18. Maksimova E.Yu., Tsibart A.S., Abakumov E.V., Politsiklicheskie aromaticheskie uglevodorody v pochvakh, proidennykh verkhovym i nizovym pozharom (Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils passed by the upper and lower fire), *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, Vol. 15, No. 3, pp. 63–68.
19. Medvedeva A.V., Mikrobnaya degradatsiya politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov (Medvedeva A.V. Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons), *Izvestiya NAN RK, Seriya biologicheskaya i meditsinskaya*, 2013, No. 5, pp. 98–101.
20. *Obshchegorodskoi svodnyi tom "Okhrana atmosfery i predel'no dopustimye vybrosy (PDV) g. Ulan-Ude"* (City-wide consolidated volume 'Atmospheric protection and maximum permissible emissions (MPE) of Ulan-Ude'), Saint Petersburg: In-t prikl. ekologii i gigieny, 2013, 473 p.
21. Rovinskii F.Ya., Teplitskaya T.A., Alekseeva T.A., *Fonovi monitoring politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov* (Background monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 224 p.
22. SanPiN 1.2.3685-21 "Gigienicheskie normativy i trebovaniya k

obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya” (“Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness to humans of factors of the living environment”), 2021, pp. 751–754.

23. Ubugunov L.L., Pochvennye resursy Respubliki Buryatiya, ikh agroekologicheskoe sostoyanie i ratsional'noe ispol'zovanie (Soil resources of the Republic of Buryatia, their agro-ecological state and rational use), *Vestnik BGSKhA im. V.R. Filippova*, 2020, No. 2, pp. 35–46, DOI: [10.34655/bgsha.2020.59.2.005](https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.59.2.005).

24. Ubugunov L.L., Ubugunova V.I., Badmaev N.B., Gyninova A.B., Ubugunov V.L., Balsanova L.D., Pochvy Buryatii: raznoobrazie, sistematika i klassifikatsiya (Soils of Buryatia: diversity, systematics and classification), *Vestnik Buryatskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii im. V.R. Filippova*, 2012, No. 2, pp. 45–52.

25. Khaustov A.P., Redina M.M., Geokhimicheskie markery na osnove sootnoshenii kontsentratsii PAU v nefi i neftezagryaznennykh ob'ektakh (Geochemical markers based on the ratios of PAH concentrations in oil and oil-contaminated objects), *Geokhimiya*, 2017, No. 1, pp. 57–67, DOI: [10.7868/S0016752516120049](https://doi.org/10.7868/S0016752516120049).

26. Khaustov A.P., Redina M.M., Indikatornye sootnosheniya kontsentratsii politsiklicheskikh aromatischeskikh uglevodorodov v ob'ektakh szhiganiya ugol'nogo topliva i biomassy (Indicator ratios of concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in coal fuel and biomass combustion objects), *Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy*, 2019, No. 5, pp. 64–71.

27. Tsibart A.S., Gennadiyev A.N., Assotsiatsii politsiklicheskikh aromatischeskikh uglevodorodov v proidennykh pozhamami pochvakh (Associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils passed by fires), *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. Geografiya*, 2011, No. 3, pp. 13–19.

28. Tsibart A.S., Gennadiyev A.N., Politsiklicheskie aromatischeskie uglevodorody v pochvakh: istochniki, povedenie, indikatsionnoe znachenie (obzor) (Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils: sources, behaviour, indicative value (review)), *Pochvovedenie*, 2013, No. 7, pp. 788–802, DOI: [10.7868/S0032180X13070125](https://doi.org/10.7868/S0032180X13070125).

29. Shashkov M.V., Sidel'nikov V.N., Opredelenie istochnikov emissii politsiklicheskikh aromatischeskikh uglevodorodov v atmosfernom vozdukh (Determination of the emission sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric air), *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2022, Vol. 26, No. 10, pp. 29–35, DOI: [10.18412/1816-0395-2022-10-29-35](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-29-35).

30. *Ekologicheskii atlas basseina ozera Baikal* (Ecological atlas of the Lake Baikal basin), Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, 2015, 145 p.

31. Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A., Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Critical Review of Environmental Occurrence and Bioremediation, *Environmental Management*, 2017, Vol. 60, No. 4, pp. 758–783, DOI: [10.1007/s00267-017-0896-2](https://doi.org/10.1007/s00267-017-0896-2).
32. Aubin S., Farant J.P., Benzo(b)fluoranthene, a Potential Alternative to Benzo(a)pyrene as an Indicator of Exposure to Airborne PAHs in the Vicinity of Söderberg Aluminum Smelters, *J. Air Waste Management Association*, 2000, Vol. 50, pp. 2093–2101, DOI: [10.1080/10473289.2000.10464236](https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464236).
33. Bojakowska I., Sokołowska I., Polycyclic aromatic hydrocarbons in brown coals from Poland, *Geological Quarterly*, 2001, Vol. 45, pp. 93–98.
34. Cui Z., Wang Y., Du L., Yu Y., Contamination level, sources, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in suburban vegetable field soils of Changchun, Northeast China, *Scientific reports*, 2022, Vol. 12, No. 1, Art. No. 11301, DOI: [10.1038/s41598-022-15285-5](https://doi.org/10.1038/s41598-022-15285-5).
35. Demetriades A., Birke M., *Urban geochemical mapping manual: sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting*, Brussels: EuroGeoSurveys, 2015, 162 p., DOI: [10.1016/j.gexplo.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.024).
36. Devos O., Combet E., Tassel P., Paturel L., Exhaust emissions of PAHs of passenger cars, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2006, Vol. 26, pp. 69–78, DOI: [10.1080/10406630500519346](https://doi.org/10.1080/10406630500519346).
37. Emoyan O.O., Onocha E.O., Tesi G.O., Concentration Assessment and Source Evaluation of 16 Priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Selected Vehicle-Parks in Southern Nigeria, *Sci. Afr.*, 2020, No. 7, e00296, DOI: [10.1016/j.sciaf.2020.e00296](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00296).
38. Laumann S., Micic V., Krüge M. A., Achten C., Hofmann T., Variations in concentrations and compositions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coals related to the coal rank and origin, *Environmental Pollution*, 2011, Vol. 159, pp. 2690–2697, DOI: [10.1016/j.envpol.2011.05.032](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.032).
39. Marr L.C., Kirchstetter T.W., Harley R.A., Miguel A.H., Hering S.V., Hammond S.K., Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in motor vehicle fuels and exhaust emissions, *Environmental Science and Technology*, 1999, Vol. 33, pp. 3091–3099, DOI: [10.1021/ES981227L](https://doi.org/10.1021/ES981227L).
40. Mętrak M., Chmielewska M., Sudnik-Wójcikowska B., Wiłkomirski B., Staszewski T., Suska-Malawska M., Does the railway function of railway infrastructure determine qualitative and quantitative composition of contaminants (PAHs, heavy metals) in soil and plant biomass? *Water, Air and Soil Pollution*, 2015, Vol. 226, No. 8, pp. 253–265, DOI: [10.1007/s11270-015-2516-1](https://doi.org/10.1007/s11270-015-2516-1).
41. Miguel A.H., Kirchstetter T.W., Harley R.A., Hering S.V., On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon

- from gasoline and diesel vehicles, *Environmental Science and Technology*, 1998, Vol. 32, No. 4, pp. 450–455, DOI: [10.1021/es970566w](https://doi.org/10.1021/es970566w).
42. Morville S., Scheyer A., Mirabel P., Millet M., Sampling and analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in urban and rural atmospheres: Spatial and geographical variations of concentrations, *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2004, Vol. 24, No. 4–5, pp. 617–634, DOI: [10.1080/10406630490472059](https://doi.org/10.1080/10406630490472059).
43. Nisbet C., LaGoy P., Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, Vol. 16, pp. 290–300, DOI: [10.1016/0273-2300\(92\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X).
44. Sakari M., *Depositional History of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Reconstruction of Petroleum Pollution Record in Peninsular Malaysia / Organic Pollutants Ten Years After the Stockholm Convention – Environmental and Analytical Update*, Edited by Tomasz Puzyn and Aleksandra Mostrag-Szlichtyng, 2012, InTech, 472 p.
45. Tobiszewski M., Namieśnik J., PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources, *Environmental Pollution*, 2012, Vol. 162, pp. 110–119, DOI: [10.1016/j.envpol.2011.10.025](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.025).
46. Wiłkomirski B., Jabbarov Z. A., Abdrakhmanov T. A., Vokhidova M. B., Jabborov B. T., Fakhrutdinova M. F., Okolelova A.A., Kholdorov S.M., Abdullayeva Y. D., Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Natural and Anthropogenically Modified Soils (A Review), *Biogeosystem Technique*, 2018, No. 5, pp. 229–243, DOI: [10.13187/bgt.2018.2.229](https://doi.org/10.13187/bgt.2018.2.229).
47. Wiłkomirski B., Sudnik-Wójcikowska B., Galera H., Wierzbička M., Malawska M., Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution, *Water, Air and Soil Pollution*, 2011, Vol. 218, pp. 333–345, DOI: [10.1007/s11270-010-0645-0](https://doi.org/10.1007/s11270-010-0645-0).
48. Yunker M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S., PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition, *Org. Geochem.*, 2002, Vol. 33, pp. 489–515, DOI: [10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5).