

Н.Е. КОШЕЛЕВА, Е.М. НИКИФОРОВА, И.В. ТИМОФЕЕВ, Ю.А. ЗАВГОРОДНЯЯ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия,
natalk@mail.ru, nikiforova_geo@mail.ru, vano-timofeev@yandex.ru, zyu99@mail.ru

ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В ПОЧВАХ СЕВЕРОБАЙКАЛЬСКА

Впервые изучено содержание 14 полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в почвах г. Северобайкальска (Республика Бурятия) и дана эколого-геохимическая оценка их загрязнения в разных функциональных зонах города. Определены основные источники ПАУ — выбросы теплоэнергетического комплекса, работающего на канско-ачинских бурых углях, железнодорожного транспорта и автотранспорта, а также нефтебазы, формирующие обширные высококонтрастные аномалии ПАУ в почвах на северо-востоке, северо-западе и юге города. Выявлено, что в составе используемых бурых углей преобладают флуорантен, бензо(б)флуорантен и фенантрен, сумма ПАУ составляет 5,44 мг/кг, в золе ТЭЦ она в 20 раз меньше, чем в буром угле. В верхних (0–10 см) горизонтах почв г. Северобайкальска суммарное содержание ПАУ составляет в среднем 0,441 мг/кг, что в 4 раза выше фонового уровня. Установлено, что состав ПАУ в городских почвах не отличается от природных аналогов, в нем доминируют флуорантен, пирен и бензо(б)флуорантен. Сумма 2–4-кольчатых ПАУ в 1,5–2,9 раза превышает сумму 5–6-кольчатых. Степень загрязнения почв ПАУ определяется уровнем техногенной нагрузки, который зависит от функциональной принадлежности территории. Сделан вывод, что наиболее сильно загрязнены ПАУ почвы селитебной усадебной и промышленной зон, наименее — селитебной многоэтажной зоны. Содержание БаП в почвах промышленной зоны превышает ПДК в среднем в 1,5 раза, селитебной усадебной — в 1,3 раза. Максимальные превышения достигают 31 ПДК в северо-восточной аномалии. При учете вклада других ПАУ, выраженных через эквивалентное количество БаП в почвах, средняя кратность превышения ПДК по БаП возрастает до 2,3 раза, а в промышленной и селитебной усадебной зонах — до 3,4 и 3,6 раза соответственно. Установлено, что 34 % почв города имеет допустимый уровень загрязнения ПАУ, 23,4 % — опасный и очень опасный, что угрожает здоровью населения и может вызвать ухудшение состава вод в оз. Байкал.

Ключевые слова: городские почвы, источники загрязнения, функциональные зоны, бурые угли, загрязнение, экологическая опасность.

N.E. KOSHELEVA, E.M. NIKIFOROVA, I.V. TIMOFEEV, YU.A. ZAVGORODNYAYA
Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia,
natalk@mail.ru, nikiforova_geo@mail.ru, vano-timofeev@yandex.ru, zyu99@mail.ru

POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN SOILS OF SEVEROBAIKALSK

The content of 14 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soils of the city of Severobaikalsk (Republic of Buryatia) was studied for the first time and an ecological and geochemical assessment of their pollution in different land-use zones of the city was made. The main sources of PAHs were determined, namely the emissions from the heat and power complex operating on Kansk-Achinsk brown coal, railway and motor transport, and from oil depots, which form extensive high-contrast PAH anomalies in the soils in the north-east, north-west, and south of the city. Fluoranthene, benzo(b)fluoranthene, and phenanthrene predominate in the composition of brown coals used; the amount of PAHs in them is 5.44 mg/kg; in the ash of the thermal power plant it is 20 times less than in the brown coals. In the upper (0–10 cm) soil horizons of Severobaikalsk, the total content of PAHs averages 0.441 mg/kg, which is 4 times higher than the background level. The composition of PAHs in urban soils does not differ from their natural analogs with the predominance of fluoranthene, pyrene, and benzo(b)fluoranthene. The sum of 2–4-ringed PAHs is 1.5–2.9 times higher than the sum of 5–6-ringed ones. The degree of soil pollution with PAHs is caused by the level of technogenic load, which depends on the functional status of the territory. It is concluded that the soils of residential manor and industrial zones are most heavily polluted with PAHs whereas the least polluted are those of the residential multi-storey zone. The content of BaP in the soils of the industrial zone exceeds the MPC on average by a factor of 1.5, and in the residential manor zone by a factor of 1.3. The maximum exceedances reach 31 MPC in the northeastern anomaly. When taking into account the contribution of other PAHs, expressed in terms of the equivalent amount of BaP in soils, the average

frequency of exceeding the MPC for BaP increases to a factor of 2.3, and in the industrial and residential manor zones, to factors of 3.4 and 3.6, respectively. 34 % of the city's soils are characterized by an acceptable pollution level, and 23.4 % by a dangerous and very dangerous levels of PAH pollution, which threatens public health and can cause deterioration of the water composition in Lake Baikal.

Keywords: urban soils, pollution sources, land-use zones, brown coals, pollution, environmental hazard.

ВВЕДЕНИЕ

Среди современных экологических проблем городов наиболее важная и актуальная — это оценка загрязнения городских ландшафтов выбросами из различных техногенных источников. Основным депонирующим компонентом и индикатором многолетнего загрязнения городских ландшафтов являются почвы. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, или полиарены) относятся к наиболее опасным загрязнителям, это органические соединения, в химической структуре которых присутствуют от двух до семи конденсированных бензольных колец [1]. Многие полиарены обладают канцерогенной и мутагенной активностью, что создает угрозу для здоровья населения [2–5]. Наибольшую экологическую опасность представляют высококольчатые ПАУ, среди которых выделяют бенз(а)пирен (БаП) с пятью бензольными кольцами — суперзагрязнитель природной среды.

В природных почвах ПАУ образуются в результате трансформации органического вещества [6]. В городах ПАУ синтезируются при сгорании и пиролизе органического топлива, содержатся в выбросах многих промышленных производств, отопительных и транспортных систем, поступая в почвы из загрязненной атмосферы с пылью и аэрозолями [7–11]. ПАУ обычно присутствуют в выбросах автотранспорта, электрохимической, химической и нефтехимической промышленности [12, 13]. Особенно велик вклад ТЭЦ, работающих на угле и мазуте, в процессе их сжигания образуются частицы сажи, адсорбирующие ПАУ [14, 15]. Сжигание угля и поступление ПАУ с выбросами ТЭЦ и котельных сопровождается наиболее сильным загрязнением городских почв как легкими, так и тяжелыми ПАУ с их максимальными концентрациями в почвах на расстоянии 0,5 км от источника эмиссии [16].

При низкой скорости разложения в почвах многие ПАУ аккумулируются в верхней части профиля, образуя высококонтрастные техногенные аномалии [17–21]. Подвергаясь различным химическим превращениям, биодegradации, водной и воздушной миграции, ПАУ могут перераспределяться из почв в другие компоненты городской среды и образовывать опасные очаги вторичной локализации [1, 22].

Цель данной работы — оценить опасность и масштабы загрязнения ПАУ почвенного покрова г. Северобайкальска (Республика Бурятия) на основе данных геохимической съемки летом 2018 г. Город расположен на берегу оз. Байкал — уникального объекта, внесенного в Список Всемирного наследия ЮНЕСКО, что определяет актуальность рассмотрения данной проблемы. Ранее оценка загрязнения полиаренами почв Северобайкальска не проводилась.

В ходе исследования решались следующие задачи:

- определение основных физико-химических свойств городских почв;
- установление содержания отдельных структур ПАУ в верхних горизонтах почв в разных функциональных зонах Северобайкальска;
- анализ особенностей пространственного распределения ПАУ в зависимости от положения техногенных источников;
- оценка экологической опасности загрязнения ПАУ городских почв.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Город Северобайкальск расположен на северо-западном берегу оз. Байкал, в устьевой области р. Тыи. Город основан в 1974 г. как базовый лагерь строителей Бурятского участка Байкало-Амурской магистрали, представляет собой крупный транспортный узел.

Природные условия. Климат изучаемой территории — резко континентальный, смягченный воздействием воздушных масс оз. Байкал [23]. По данным МС Нижнеангарска, средняя температура января -21 °С, июля $+15$ °С. Экстремальные значения температур достигают -47 и $+34$ °С соответственно. Климат характеризуется недостаточным увлажнением, среднее количество осадков составляет 350 мм/год. Преобладает безветренная погода, среднегодовая скорость ветра 2 м/с, в основном южного направления (рис. 1). Зимой на побережье доминируют ветры с суши на озеро, летом — с озера на сушу. На состояние приземного воздуха большое влияние оказывает азиатский антициклон, при

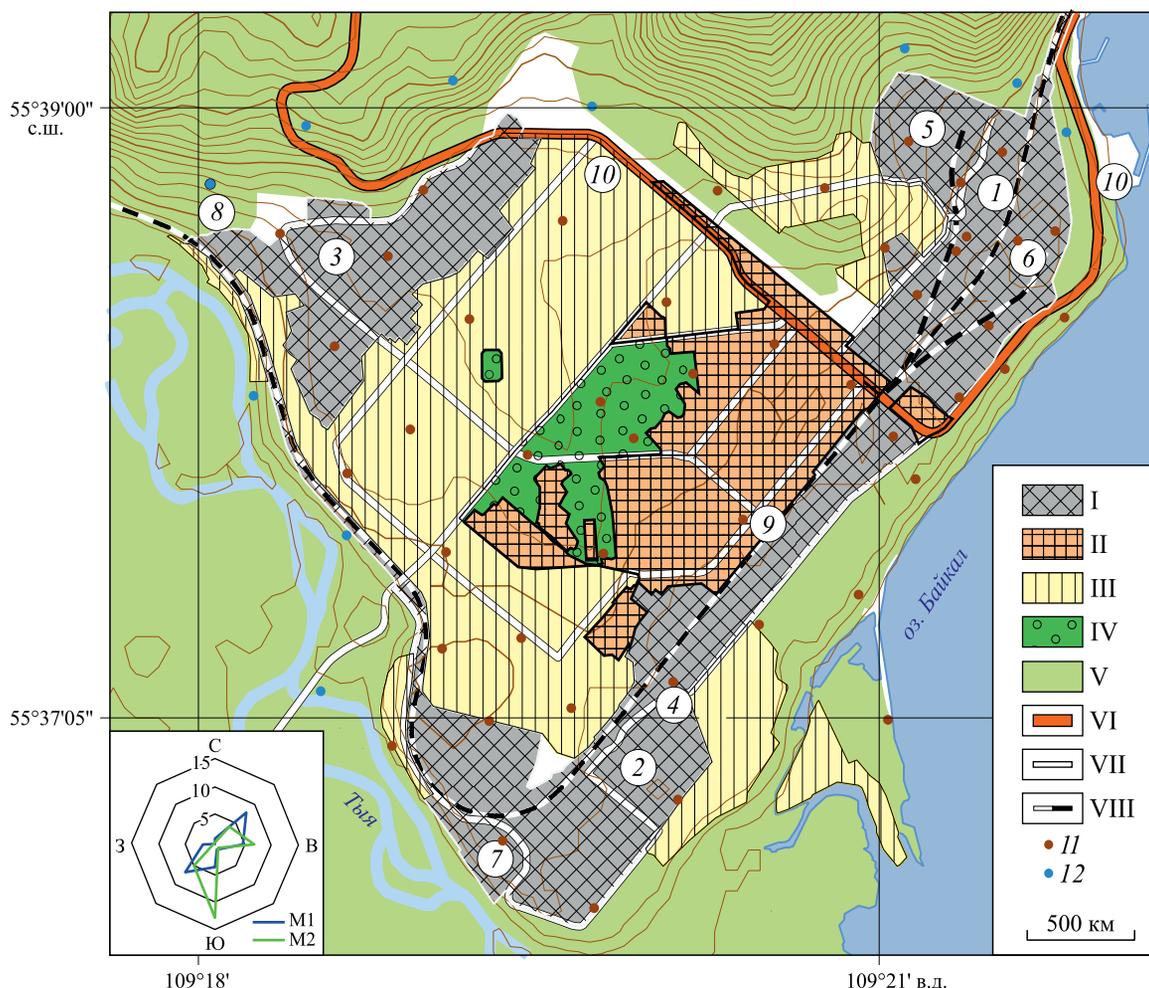


Рис. 1. Карта функционального зонирования территории с основными источниками техногенного воздействия, точками опробования почв в г. Северобайкальске и розой ветров.

Функциональные зоны: I — промышленная; селитебная: II — с городской застройкой; III — с одноэтажной застройкой; IV — рекреационная; V — незастроенные и малоиспользуемые территории. Транспортная сеть: автодороги: VI — крупные, VII — мелкие; VIII — железные дороги.

Котельные: 1 — Центральная, 2 — № 11, 3 — № 12; 4 — хлебозавод; 5 — нефтебаза; 6 — локомотивное депо; 7 — очистные сооружения; 8 — городская свалка; 9 — железнодорожная станция; 10 — воинская часть. Точки отбора проб верхних горизонтов почвы: 11 — городских, 12 — фоновых.

котором зимой в понижениях рельефа происходит застой холодных масс, что приводит к температурным инверсиям, препятствующим выносу вредных примесей из атмосферы.

Город находится на Северо-Байкальском нагорье с уклонами от 0 до 5°, местами они достигают 10–20° и более. От его северной границы поднимаются высокие отроги Байкальского хребта, с южной стороны расположена глубокая рифтовая впадина долины р. Тыи. В геологическом строении территории принимают участие коренные породы протерозоя и рыхлые четвертичные отложения. Аллювиальные отложения, заполняющие долину р. Тыи, представлены пылеватými песками и супесями.

В системе почвенно-экологического районирования бассейна оз. Байкал [23] природные (зональные) почвы относятся к Прибайкальской предгорной, высоко-, средне- и низкогорной провинциям высоко- и среднегорного Байкальского округа торфяно-подбуров, подбуров и буроземов грубогумусовых. Почвенный покров горно-таежной зоны неоднороден, что обусловлено вертикальной поясностью, экспозицией склонов, многолетней мерзлотой. Основной фон почвенного покрова составляют дерново-подбуры, им сопутствуют серогумусовые почвы на обрывистых склонах, обращенных к оз. Байкал, фрагментарно распространены литоземы серогумусовые и петроземы гумусовые [24, 25].

Для территории характерны сочетания почв с элювиально-иллювиальным и недифференцированным профилем. Почвы имеют малую мощность профиля, легкий гранулометрический состав и высокую степень щебнистости. Их водный режим относится к промывному типу, таежно-длительно-сезонно-мерзлотному подтипу, температурный — к длительно-сезоннопромерзающему типу [26].

Городские почвы представлены антропогенно-трансформированными урбо-подбурами, урбо-подзолами и урбо-дерново-подзолами. Антропогенно-сильнопреобразованные почвы образуют группу собственно городских почв — урбаноземов, в которых профиль состоит из одного или нескольких урбиковых горизонтов, сформированных из своеобразного пылевато-гумусового субстрата разной мощности и качества с примесью городского мусора [27]. В городе произрастают листовничные, сосновые рододендроновые толокнянково-брусничные леса с примесью березы и осины.

Функциональная структура территории. Функциональная структура города играет ведущую роль в формировании техногенных аномалий загрязняющих веществ в почвах [28], поэтому выполнено функциональное зонирование городской территории. Карта функциональных зон составлена на основе данных, представленных на Публичной кадастровой карте Росреестра [29], и дешифрирования космических снимков Google Earth. Выделены четыре зоны: промышленная, транспортная, рекреационная и селитебная с усадебной и многоэтажной подзонами (см. рис. 1). Основную часть территории города (36 %) занимает селитебная зона (26 % — усадебная, 10 % — многоэтажная), рекреационная зона составляет 25 %, транспортная и промышленная зоны — 17 и 22 % соответственно.

Селитебная зона объединяет жилые кварталы с разной плотностью застройки, здания общественно-делового, культурного, образовательного и медицинского назначения, торговые центры, которые сосредоточены в центральной части города. Рекреационная зона представлена городскими парками в центре города. В эту зону входит также прибрежная часть оз. Байкал, яхтклуб, пляжи и набережная.

Промышленная зона включает ряд предприятий, расположенных в разных частях г. Северобайкальска. В настоящее время действуют следующие предприятия: нефтебаза, Центральная ТЭЦ, локомотивное депо и сервисные центры для автомобилистов на северо-востоке города, очистные сооружения, котельная № 11 и хлебозавод на юге, производство строительных материалов (ОАО Трест «Запбамстроймеханизация») и котельная № 12 на северо-западе (также здесь находится свалка бытовых и промышленных отходов).

К транспортной зоне относятся крупные автомагистрали (Усть-Кут—Уоян (автодублер БАМа), проспекты Ленинградский, 60 лет СССР), средние автомагистрали (улицы Рабочая, Космонавтов, Полиграфистов, Студенческая) и более мелкие дороги. Общая протяженность улично-дорожной сети составляет 50 км. Железнодорожный транспорт представлен участком Байкало-Амурской магистрали, вокзалом, депо и другими сооружениями. Трасса проходит с северо-запада по долине р. Тыи и вдоль берега Байкала на северо-восток (см. рис. 1).

Источники загрязнения почв. К основным источникам ПАУ в почвах и ландшафтах г. Северобайкальска относятся Центральная ТЭЦ и две районные котельные, работающие на бурых углях Канско-Ачинского месторождения. Дополнительное загрязнение создают печное отопление домов в кварталах усадебной застройки, выбросы автотранспорта и железных дорог, о чем свидетельствуют многочисленные публикации [30–35]. Степень загрязнения почв ПАУ выхлопными газами автотранспорта зависит от температуры воздуха, снижаясь на два порядка при ее росте [36]. Этот фактор особенно важен в условиях сурового климата и низких температур в Северном Прибайкалье.

Источниками загрязнения почв ПАУ служат также свалки бытовых и промышленных отходов, которые подвержены горению. Так, за 2016 г. в Северобайкальске образовалось 12,45 тыс. т отходов в результате эксплуатации железнодорожного и автомобильного транспорта, предприятий тепловой энергетики, очистных сооружений и прочих производств, а в 2017 г. их количество оценивалось в 9,6 тыс. т [37].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На территории города и в его окрестностях проведено опробование верхних (0–10 см) горизонтов почв по регулярной сетке с шагом 500–600 м, согласно европейской методике [38]. В качестве природного фона проанализированы почвы в ненарушенных ландшафтах за пределами города. В ходе почвенно-геохимической съемки отобрано 47 проб почв в разных функциональных зонах города, 2 пробы золы и каменного угля с территории Центральной ТЭЦ и 10 фоновых проб (см. рис. 1).

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. Степень извлечения отдельных ПАУ при экстракции варьировала от 80 до 110 %, относительное стандартное отклонение для повторностей не превышало 10 %. Пределы обнаружения для изученных ПАУ варьировали от 0,02 нг/г для бензо(к)флуорантена и БаП до 0,20 нг/г для флуорантена. Результаты определений содержания ПАУ корректировали путем вычитания значений холостого опыта.

Физико-химические характеристики почв анализировались традиционными методами в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ (аналитик Е.В. Шестова). Содержание $C_{\text{орг}}$ определялось методом Тюрина с титриметрическим окончанием, минерализация почвенного раствора (ЕС) измерялась кондуктометром «SevenEasy S30» фирмы MettlerToledo (погрешность $\pm 0,5$ %), актуальная кислотность — рН-метром «ЭКСПЕРТ-рН» (погрешность $\pm 0,07$ ед. рН), гранулометрический состав почв — на лазерном гранулометре «Analysette 22 comfort» (Fritsch, Германия).

Полученные данные обрабатывались с использованием геохимических и санитарно-гигиенических показателей, сравнительно-географического, статистических и картографических методов. Опасность загрязнения городских почв БаП оценивалась путем сравнения его содержания C_i с ПДК, равной 0,02 мг/кг [39]. Рассчитывался коэффициент экологической опасности, показывающий кратность превышения концентрацией БаП гигиенического норматива: $K_o = C_i/\text{ПДК}$. При отсутствии ПДК для других ПАУ их негативное воздействие на городские почвы определялось через коэффициенты ТЕФ, показывающие токсичность полиаренов по сравнению с БаП (табл. 1); вместо концентрации БаП в формуле для K_o использовалась сумма концентраций, умноженных на коэффициенты ТЕФ, всех изученных полиаренов.

Функциональное зонирование территории города выполнено с использованием программных пакетов Global Mapper8 и Google Earth Pro. Геохимические карты суммарного содержания низко- (2–4-кольчатых) и высокомолекулярных (5–6-кольчатых с молекулярной массой выше 220) ПАУ составлены путем интерполяции с применением метода сплайнов в пакете ArcGIS 10.6.1. Такое деление ПАУ определяется летучестью ПАУ, которая зависит от молекулярной массы. Какие ПАУ — легкие или тяжелые — доминируют в составе полиаренов, зависит от ряда факторов: источников и режима поступления (регулярного или залпового), почвенно-геохимических условий, периода аккумуляции ПАУ. Легкие ПАУ в почвах менее устойчивы и более подвижны, в отличие от более тяжелых, которые с течением времени накапливаются.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физико-химические свойства верхних (0–10 см) горизонтов почв. Природные почвы (дерново-подбуры и серогумусовые) имеют нейтральную реакцию среды, низкое содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$), невысокую минерализацию почвенного раствора и супесчаный гранулометрический состав (табл. 2). Физико-химические свойства городских почв изменены в результате техногенного воздействия.

По сравнению с природным фоном в верхних горизонтах городских почв рН увеличился до слабощелочных значений в транспортной, промышленной и жилтальной многоэтажной зонах (7,6–7,7). Выявлен рост содержания $C_{\text{орг}}$, особенно в промышленной зоне, где его максимальная концентрация (4,1 %) обусловлена выбросами частиц золы из ТЭЦ и котельных. Гранулометрический состав почв в пределах города изменился незначительно, в среднем они характеризуются как супесчаные. Повышенная минерализация почвенного раствора, определяемая удельной электропроводностью (ЕС), указывает на антропогенное засоление верхних горизонтов противогололедными реагентами в зимний период. Эти изменения свойств городских почв, особенно подщелачивание и накопление органических веществ, способствуют росту загрязнения ПАУ в верхних горизонтах профиля за счет их закрепления на органоминеральном и щелочном геохимических барьерах [20].

Таблица 1

Факторы токсической эквивалентности (ТЕФ) для исследуемых ПАУ [3]

ПАУ	Число колец	ТЕФ
Бенз(а)пирен	5	1
Дибенз(аh)антрацен	5	1
Бенз(а)антрацен	4	0,1
Бензо(б)флуорантен	5	0,1
Бензо(к)флуорантен	5	0,1
Антрацен	3	0,01
Хризен	4	0,01
Бензо(ghi)перилен	6	0,01
Нафталин	2	0,001
Аценафтен	2	0,001
Флуорен	3	0,001
Фенантрен	3	0,001
Флуорантен	4	0,001
Пирен	4	0,001

Физико-химические свойства верхних (0–10 см) горизонтов природных и городских почв по функциональным зонам г. Северобайкальска

Функциональная зона (число проб)	pH _{вод}	Удельная электро- проводность ЕС, мкСм/см	C _{орг} , %	Содержание физической глины, %
Фон (10)	6,90* (5,86–7,52)	102 (37,9–159)	2,8 (1,41–6,42)	19,1 (14,2–26,0)
Селитебная усадебная(9)	7,28 (6,94–8,14)	146 (54,3–328)	2,7 (1,18–6,45)	19,2 (15,1–24,2)
Селитебная многоэтажная (5)	7,69 (7,24–8,18)	131 (99,9–180)	1,7 (0,97–2,58)	19,4 (16,2–24,7)
Рекреационная (12)	6,78 (4,97–7,75)	121 (47,8–202)	3,0 (1,65–4,70)	18,8 (5,8–25,2)
Транспортная (9)	7,59 (6,77–8,22)	124 (72,5–158)	2,4 (0,71–4,40)	21,6 (9,6–29,1)
Промышленная (12)	7,66 (6,75–8,05)	128 (70,7–190)	4,1 (1,20–15,6)	23,4 (16,2–32,2)
Среднее по городу (47)	7,28 (4,97–8,22)	129 (47,8–328)	3,0 (0,71–15,6)	20,6 (5,8–32,2)

*Приводятся средние значения показателя, в скобках – минимальные и максимальные.

Содержание ПАУ в буром угле и золе. В буром угле Канско-Ачинского месторождения, сжигаемом на Центральной ТЭЦ, в котельных и в частных домах г. Северобайкальска обнаружено значительное количество ПАУ. Суммарное содержание легких (2–4-кольчатых) структур составляет 3,98 мг/кг с преобладанием флуорантена (1,21 мг/кг) и фенантрена (1,16 мг/кг), а тяжелых структур — 1,46 мг/кг, среди которых лидирует бензо(б)флуорантен (0,57 мг/кг). В значительно меньшей степени по сравнению с углем обогащена ПАУ зола и городские почвы (табл. 3). Суммарное содержание ПАУ в золе составляет 0,27 мг/кг, что в 20,3 раз меньше, чем в буром угле. В золе доминируют пирен (0,058 мг/кг) и флуорантен (0,052 мг/кг), на третьем месте бензо(ghi)перилен (0,027 мг/кг). Преобладание легких 2–3-кольчатых полиаренов (нафталина, флуорена и фенантрена) и невысокое содержание 4–5-кольчатых пирена, хризена, бензо(б)флуорантена, БаП и бензо(ghi)перилена в составе выбросов ТЭЦ отмечено и другими авторами [16].

Содержание ПАУ в фоновых и городских почвах. В природных (фоновых) почвах все исследуемые ПАУ содержатся в очень небольших количествах, их сумма составляет 0,11 мг/кг, в составе преобладают легкие структуры с доминированием флуорантена и пирена (41 % от суммы ПАУ), среди высококольчатых ПАУ максимальное содержание (15 %) имеет бензо(б)флуорантен (см. табл. 3). Такой состав ПАУ характерен и для участков тайги, пройденных пожарами [40]. Коэффициент вариации содержания отдельных ПАУ в фоновых почвах C_v составляет в среднем 72 %, изменяясь от 51 % у пирена до 96 % у бензо(ghi)перилена.

Суммарное содержание ПАУ в почвах г. Северобайкальска составляет в среднем 0,441 мг/кг, что в 4 раза выше фонового уровня (см. табл. 3). Доминируют те же ПАУ, что и в фоновых почвах: флуорантен (19,8 % от суммы ПАУ), пирен (16,2 %) и бензо(б)флуорантен (14,9 %). Суммарное содержание легких ПАУ также в 1,5–2,9 раза выше, чем тяжелых. Наиболее легкий состав ПАУ имеют почвы транспортной зоны, что свидетельствует о значительных выбросах автомобилей с дизельными двигателями, у которых выбросы ПАУ в 4–5 раз выше, чем у машин с бензиновыми двигателями, и состоят в основном (на 85 %) из 4-кольчатых ПАУ [33]. В промышленной и многоэтажной жилой зонах состав ПАУ характеризуется повышенным содержанием 5–6-кольчатых ПАУ. В отходах тепловых станций, работающих на угле или мазуте, при высоких температурах сжигания образуются преимущественно высокомолекулярные ПАУ [18]. В многоэтажной жилой зоне основным источником ПАУ являются выбросы легковых автомобилей. Коэффициенты выбросов высокомолекулярных ПАУ у них значительно выше, чем низкомолекулярных [8, 11].

В верхних горизонтах почв разных функциональных зон ПАУ аккумулируются неодинаково (см. табл. 3). Накопление ПАУ уменьшается в следующей последовательности: селитебная усадебная > промышленная > транспортная > рекреационная > селитебная многоэтажная зона. Суммарное со-

Среднее содержание (а) и стандартное отклонение (б) ПАУ в буром угле Канско-Ачинского бассейна, золе ТЭЦ и в верхних (0–10 см) горизонтах фоновых и городских почв г. Северобайкальска (среднее по функциональным зонам), мг/кг

ПАУ (кольчатость)		Угли Канско-Ачинского бассейна	Зола ТЭЦ	Фоновые почвы (10)	Селитебная		Рекреационная (12)	Транспортная (9)	Промышленная (12)	Городские почвы (47)
					усадебная (9)	многоэтажная (5)				
Нафталин (2)	а	0,286	0,0030	0,00160	0,00750	0,00198	0,00420	0,00339	0,00645	0,00440
	б	н/в	н/в	0,00112	0,00738	0,00155	0,00368	0,00213	0,00699	0,00505
Флуорен (3)	а	0,0330	—	0,000100	0,00100	0,000240	0,000330	0,000320	0,000810	0,000490
	б	н/в	н/в	0,0000560	0,00122	0,000154	0,000302	0,000162	0,00115	0,000776
Аценафтен (2)	а	0,0440	—	0,00013	0,0013	0,00032	0,00043	0,00042	0,00108	0,00065
	б	н/в	н/в	0,0000740	0,00162	0,000204	0,000400	0,000215	0,00152	0,00103
Фенантрен (3)	а	1,161	0,0090	0,00750	0,0157	0,00867	0,0193	0,00954	0,0267	0,0159
	б	н/в	н/в	0,00701	0,0121	0,00826	0,0229	0,00726	0,0425	0,0234
Антрацен (3)	а	0,218	0,0010	0,00062	0,00220	0,00066	0,00105	0,00117	0,00219	0,00140
	б	н/в	н/в	0,000585	0,00248	0,000570	0,000767	0,00101	0,00320	0,00191
Флуорантен (4)	а	1,213	0,0520	0,0230	0,1507	0,0347	0,0741	0,1169	0,1038	0,0871
	б	н/в	н/в	0,0136	0,164	0,0242	0,0703	0,138	0,120	0,111
Пирен (4)	а	0,426	0,0580	0,0225	0,1165	0,0329	0,0587	0,0826	0,0981	0,0716
	б	н/в	н/в	0,0108	0,124	0,0185	0,0515	0,0831	0,108	0,0842
Бенз(а)антрацен (4)	а	0,264	0,018	0,0107	0,0921	0,0201	0,0305	0,0372	0,0717	0,0457
	б	н/в	н/в	0,00666	0,111	0,0101	0,0253	0,0319	0,103	0,0704
Хризен (4)	а	0,334	0,020	0,00820	0,0471	0,0138	0,0191	0,0195	0,0440	0,0265
	б	н/в	н/в	0,00438	0,0477	0,00633	0,0154	0,00999	0,0510	0,0336
Сумма легких ПАУ	а	3,98	0,161	0,0744	0,434	0,113	0,208	0,271	0,355	0,291
	б	н/в	н/в	0,0424	0,185	0,334	0,385	0,141	0,393	0,300
	в	н/в	н/в	0,0172	0,0369	0,0580	0,0386	0,0607	0,0588	0,0369
	г	н/в	н/в	0,158	0,611	0,889	1,210	0,396	1,485	1,485
Бензо(б)флуорантен (5)	а	0,574	0,0240	0,0170	0,111	0,0333	0,0470	0,0504	0,116	0,0658
	б	н/в	н/в	0,0108	0,138	0,0142	0,0385	0,0328	0,194	0,110
Бензо(к)флуорантен (5)	а	0,236	0,010	0,00490	0,0315	0,00946	0,0138	0,0128	0,0317	0,0183
	б	н/в	н/в	0,00370	0,0444	0,00408	0,0119	0,00999	0,0618	0,0345
Бенз(а)пирен (5)	а	0,260	0,0230	0,00540	0,0258	0,0104	0,0133	0,0106	0,0302	0,0168
	б	н/в	н/в	0,00509	0,0340	0,00464	0,0120	0,00879	0,0514	0,0285
Дибенз(аh)антрацен (6)	а	0,132	0,0230	0,00290	0,0162	0,00550	0,00660	0,00480	0,0158	0,00906
	б	н/в	н/в	0,00204	0,0209	0,00373	0,00639	0,00435	0,0310	0,0171
Бензо(ghi)перилен (5)	а	0,263	0,0270	0,00690	0,0253	0,0148	0,0236	0,0157	0,0336	0,0211
	б	н/в	н/в	0,00666	0,0315	0,00837	0,0264	0,0210	0,0571	0,0328
Сумма тяжелых ПАУ	а	1,465	0,107	0,0371	0,210	0,0735	0,104	0,0944	0,227	0,151
	б	н/в	н/в	0,0861	0,0960	0,0418	0,236	0,0633	0,394	0,238
	в	н/в	н/в	0,0257	0,0175	0,0580	0,0386	0,0356	0,0374	0,0175
	г	н/в	н/в	0,320	0,330	0,889	1,21	0,208	1,44	1,44
Отношение легких к тяжелым ПАУ		2,72	1,50	2,02	2,07	1,54	1,99	2,87	1,56	1,94
Сумма всех ПАУ	а	5,44	0,268	0,111	0,644	0,187	0,312	0,365	0,582	0,441
	б	н/в	н/в	0,0693	0,662	0,1005	0,267	0,301	0,774	0,495
	в	н/в	н/в	0,0224	0,0588	0,109	0,0544	0,0811	0,0962	0,0544
	г	н/в	н/в	0,260	1,96	0,344	0,941	1,03	2,92	2,92

Примечание. н/в — для единичных проб углей и золы стандартное отклонение (б), минимум (в) и максимум (г) содержания не вычислялись. Прочерк — ниже порога обнаружения. Для суммы легких, тяжелых и всех ПАУ приведены минимальные (в) и максимальные (г) значения. В скобках в 4–10 столбцах — число проб почв по функциональным зонам.

держание ПАУ в почвах варьирует от 0,187 мг/кг в селитебной многоэтажной зоне и до 0,644 мг/кг в селитебной усадебной. Многоэтажная жилая застройка с минимальным уровнем загрязнения ПАУ расположена на значительном удалении от основных источников загрязнения, в то время как промышленная зона испытывает многолетнее воздействие выбросов ТЭЦ, котельных и промпредприятий. Из-за близости кварталов усадебной застройки к промзонам и значительного (около 40 лет) возраста застройки в ней отмечены максимальные уровни ПАУ в почвах, обусловленные наложением полей промышленного загрязнения, горения бытовых отходов и выбросов индивидуальных печей. Приоритетными загрязнителями почв селитебной усадебной и промышленной зон являются флуорантен, пирен, бензо(б)флуорантен, и бенз(а)антрацен. Для почв трех других функциональных зон характерен тот же набор доминирующих полиаренов.

Максимальная вариабельность ПАУ выявлена в почвах промышленной зоны, для легких ПАУ коэффициент вариации C_v колеблется в диапазоне 108–159 %, для тяжелых — от 168 до 197 %. На втором месте по вариабельности концентраций ПАУ — селитебная усадебная зона с C_v 77–132 %. В транспортной зоне C_v составляют 51–134 %, в рекреационной — 73–112 %, в селитебной многоэтажной — 43–132 %.

Техногенные аномалии ПАУ в городских почвах. Картографирование суммарного содержания низко- и высококольчатых ПАУ в верхних горизонтах почв города позволило выявить пространственную структуру их загрязнения (рис. 2, а, б). Три техногенные аномалии как легких, так и тяжелых ПАУ в почвах обнаружены на северо-востоке, юге и северо-западе города, они приурочены к зонам влияния различных источников загрязнения. При этом размеры аномалий легких структур ПАУ значительно больше, чем тяжелых.

Наиболее обширна и контрастна аномалия ПАУ на северо-востоке города (см. рис. 2), образованная выбросами и стоками нефтебазы, Центральной ТЭЦ и локомотивного депо. В ней содержание всех изучаемых легких ПАУ в почвах в радиусе 0,5 км от Центральной ТЭЦ (9 точек опробования) в 4,3–18,6 раза выше фона. Аномалия тяжелых ПАУ значительно меньше по площади, но более контрастна, с превышением фона в 7,3–36,1 раза. Состав доминирующих ПАУ неоднороден: если в ПТО локомотивного депо преобладает флуорантен (0,44 мкг/г), то на нефтебазе — фенантрен (0,16 мг/кг), а вблизи ТЭЦ — бензо(б)флуорантен (0,71 мг/кг).

Южная аномалия, также довольно протяженная и контрастная, с суммой легких ПАУ до 1,075 мг/кг и тяжелых до 0,88 мг/кг, с превышением фона в 13,5 и 22,1 раза соответственно обусловлена, главным образом, выбросами котельной № 11 и транспорта. В ней доминируют бенз(а)антрацен (0,35 мг/кг) и бензо(б)флуорантен (0,45 мг/кг).

Третья аномалия ПАУ на северо-западе занимает меньшую площадь и менее контрастна — с превышением фона для легких ПАУ в 6,1 раза и тяжелых — в 10 раз. В ней так же, как и в южной аномалии, доминируют бенз(а)антрацен (0,21 мг/кг) и бензо(б)флуорантен (0,20 мг/кг), что объясняется аналогичными источниками — котельной № 12 и транспортными магистралями. В восточной части города, в аномалии легких ПАУ, приуроченной к кварталу выселенных частных домов с приусадебными участками, эти два полиарена отходят на второй план, уступая место флуорантену и пирену.

Оценка экологической опасности загрязнения городских почв ПАУ. Среди изученных ПАУ БаП является наиболее опасным, поскольку обладает высокой токсичностью и канцерогенной активностью. Среднее содержание БаП в почвах г. Северобайкальска составляет 0,0168 мг/кг, что превышает его фоновое значение в 2,85 раза (см. табл. 3). Аккумуляция БаП вызвана в основном сжиганием угля в ТЭЦ и котельных и эмиссией выхлопных газов автотранспорта. Накопление БаП в почвах уменьшается по функциональным зонам в последовательности: промышленная (0,0302 мг/кг) > селитебная усадебная (0,0258) > рекреационная (0,0133) > транспортная (0,0106) > селитебная многоэтажная зона (0,0104). Центры аномалий БаП в городских почвах совпадают с центрами аномалий легких и тяжелых ПАУ; максимальное (в 30,9 раза) превышение фона по БаП отмечено на северо-востоке города, в южной аномалии оно составляет 19,1, в северо-западной — 12,3 раза. Кратность превышения ПДК в почвах достигает в этих аномалиях 9,1, 5,6 и 3,6 соответственно. Превышения ПДК по БаП характерны для промышленной (в среднем в 1,5 раза) и усадебной (1,3 раза) зон, они выявлены на 23,4 % территории Северобайкальска.

Другие ПАУ также могут оказывать сильное воздействие на городские почвы (см. рис. 3, а), но их ПДК в РФ не установлены. Для учета их влияния использовались коэффициенты ТЕФ, показывающие токсичность полиаренов по сравнению с БаП (см. табл. 1). Экологическая опасность всех изученных полиаренов в городских почвах определялась путем суммирования содержаний, умноженных

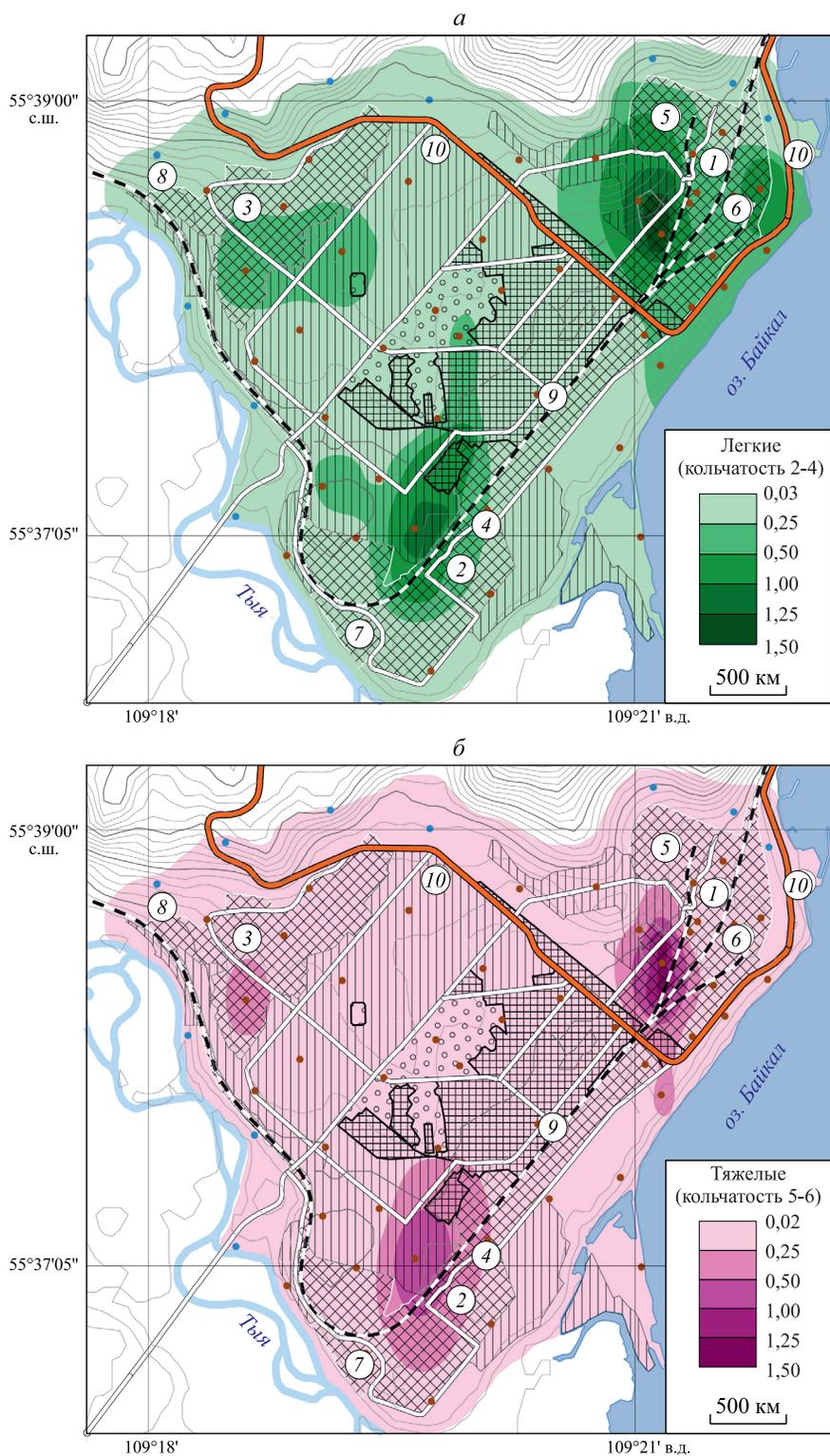


Рис. 2. Суммарное содержание легких (2–4-кольчатых) (а) и тяжелых (5–6-кольчатых) (б) ПАУ в верхних (0–10 см) горизонтах почв г. Северобайкальска.

Условные обозначения — см. рис. 1.

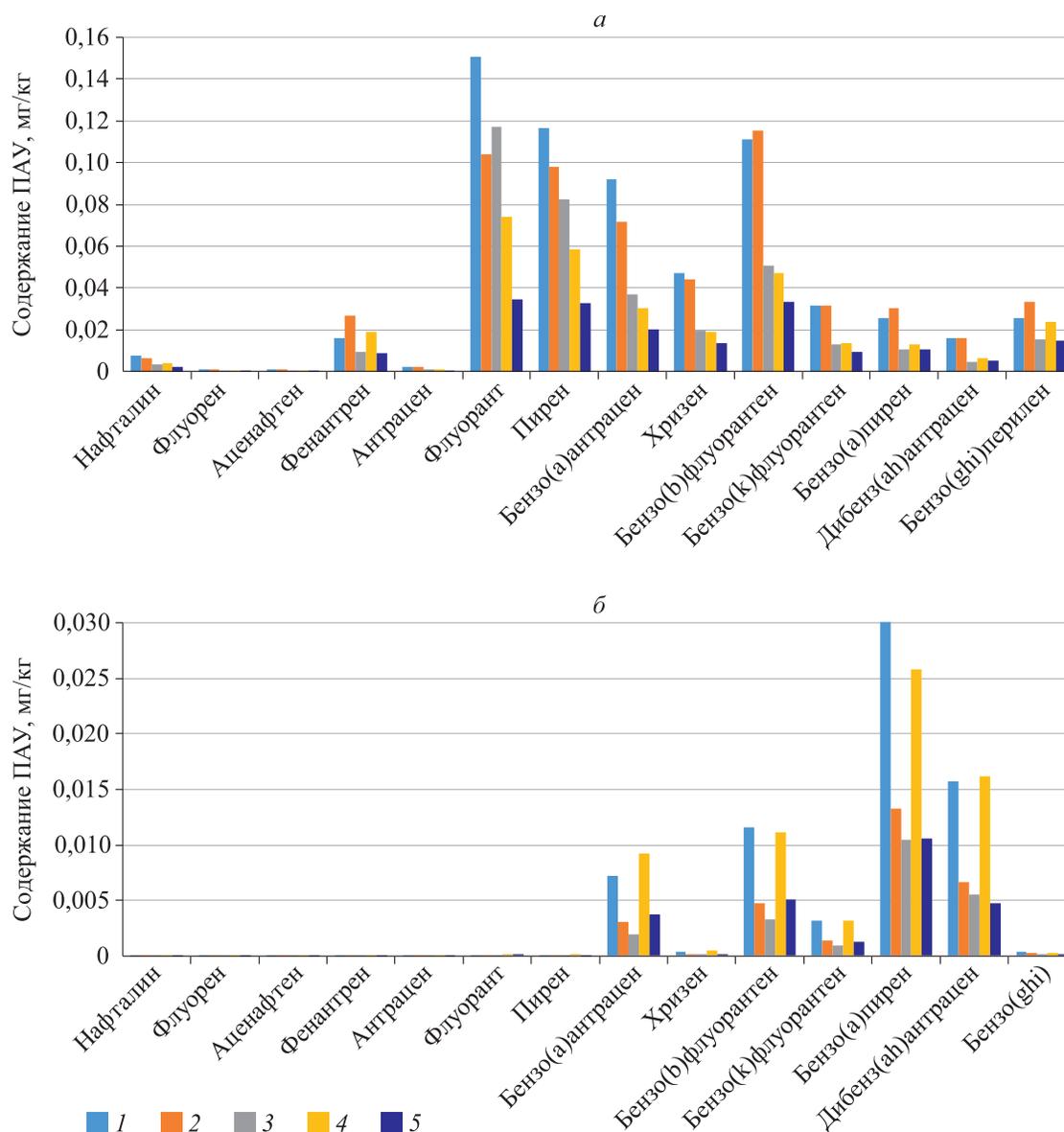


Рис. 3. Среднее по функциональным зонам содержание ПАУ (мг/кг) в верхних (0–10 см) горизонтах почв г. Северобайкальска.

Содержание ПАУ: *a* — фактическое; *б* — выраженное через БаП-эквиваленты. Функциональные зоны: 1 — селитебная усадебная, 2 — промышленная, 3 — транспортная, 4 — рекреационная, 5 — селитебная многоэтажная.

на коэффициенты TEF (см. рис. 3, *б*), и последующего сравнения суммы с ПДК для БаП. Расчет показал, что сумма ПАУ, выраженная через эквивалентное количество БаП, превысила ПДК для БаП в среднем в 2,3 раза, в селитебной усадебной застройке и промышленной зоне среднее превышение составило 3,6 и 3,4 раза, а максимальное — 13,9 и 21,4 раза соответственно. Степень экологической опасности ПАУ, выраженной через БаП-эквиваленты, убывает в ряду: селитебная усадебная (0,0724 мг/кг) > промышленная (0,0688) > рекреационная (0,0296) > транспортная (0,0260) > селитебная многоэтажная зона (0,0226). На 42,9 % эта опасность обусловлена БаП, на 22,5 % — дибенз(аh)антраценом, 16,7 % — бензо(б)флуорантеном, 11,6 % — бенз(а)антраценом. Суммарная токсичность трех последних высокомолекулярных полиаренов больше, чем у БаП. Следовательно, при экологическом мониторинге ПАУ необходимо контролировать содержание не только БаП, но и других высокомолекулярных ПАУ с высокими концентрациями и коэффициентами TEF.

По экологической опасности загрязнения почв ПАУ выделено четыре категории городских территорий: первая занимает 42,6 % площади, где суммарное содержание ПАУ, выраженное через БаП-эквиваленты, меньше ПДК, 34 % — с допустимым загрязнением (до 2 ПДК), 17 % — с опасным загрязнением (2–5 ПДК) и 6,4 % — очень опасным (более 5 ПДК). В последнем случае верхние слои почв подлежат вывозу и утилизации на специализированных полигонах. Наиболее опасно загрязнены жилая с усадебной застройкой и промышленная зоны, на две трети их территорий превышен санитарно-гигиенический норматив по БаП. Часть предприятий промышленности, тепловой энергетики, автомобильного и железнодорожного транспорта, выбросы которых формируют техногенные аномалии ПАУ с опасным уровнем загрязнения почв, расположены в непосредственной близости от оз. Байкал, поэтому способны нанести экологический ущерб его уникальной и чувствительной экосистеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что в г. Северобайкальске существует реальная опасность загрязнения ПАУ почвенного покрова, которая почти на четверти городской территории достигает опасного и очень опасного уровня. Это свидетельствует о необходимости контроля техногенных выбросов ПАУ и их накопления в депонирующих средах. Такие исследования ведутся во многих городах мира, особенно интенсивно в Юго-Восточной Азии [41–44]. Они связаны с определением состава выбросов из различных источников, включая ТЭЦ, работающие на каменном и буром углях, автотранспорт, сжигание биомассы (древесины, травы, бытовых отходов и т. п.), лесные пожары [7, 8, 11–13, 15, 16, 33, 35, 40, 45]. Значительно реже исследуется воздействие железнодорожного транспорта и мусоросжигательных заводов [30–32, 46]. При этом аккумуляция ПАУ в городских почвах в большинстве случаев исследуется в условиях теплого климата, где процессы деструкции и миграции полиаренов протекают значительно быстрее [41, 45], что облегчает разработку способов ремедиации загрязненных почв [47].

В городах Сибири такого рода исследования проведены в Тюмени [48], Воркуте [16, 49] и Тайшете [50]. Нередко оценка загрязнения городских почв ПАУ ограничивается определением БаП [51], который обладает высокой токсичностью и канцерогенностью. Однако полученные нами результаты показали, что во многих случаях такой подход не дает реальной картины загрязнения и экологической опасности этой группы поллютантов.

Все это свидетельствует об актуальности и необходимости продолжения исследований ПАУ в городских ландшафтах. Задачами дальнейших исследований являются:

- выявление состава ПАУ, характерного для выбросов из различных техногенных источников;
- анализ закономерностей аккумуляции и деградации отдельных полиаренов в зависимости от свойств и режимов городских почв;
- идентификация и количественная оценка вклада источников ПАУ на основе технологии Source apportionment;
- оценка экологической опасности ПАУ в почвах для здоровья городского населения;
- обоснование способов ремедиации загрязненных почв с определением их эффективности.

Для их решения чрезвычайно важно использовать опыт, накопленный в других регионах [7, 8, 12, 13, 15, 16, 21, 30–33, 35, 36, 41–45, 47].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Русского географического общества (проект 17-29-05055), обработка геохимических данных — в рамках договора № 8/Д-2021 «Разработка интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал», оценка экологической опасности — по Программе развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Геохимия** полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах / Под ред. А.Н. Геннадиева, Ю.И. Пиковского. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. — 192 с.
2. **Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.** Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 223 с.

3. Nisbet C., LaGoy P. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. — 1992. — Vol. 16. — P. 290–300.
4. Jacob J. The significance of polycyclic aromatic hydrocarbons as environmental carcinogens. 35 years research on PAH — a retrospective // *Polycycl. Aromat. Compd.* — 2008. — Vol. 28 (4–5). — P. 242–272.
5. 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 (4). — P. 758–783.
6. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // *Почвоведение*. — 2015. — № 1. — С. 1195–1209.
7. Khalili N.R., Scheff P.A., Holsen T.M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions // *Atmospheric Environment*. — 1995. — Vol. 29. — P. 533–542.
8. Ravindra K., Sokhi R., Van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation // *Atmospheric Environment*. — 2008. — Vol. 42. — P. 2895–2921.
9. Shen H., Huang Ye., Wang R., Zhu D., Li W., Shen G., Wang B., Zhang Y., Chen Y., Lu Y., Chen H., Li T., Sun K., Li B., Liu W., Liu J., Tao S. Global atmospheric emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from 1960 to 2008 and future predictions // *Environ. Sci. Technol.* — 2013. — Vol. 47 (12). — P. 6415–6424.
10. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Ред. Н.С. Касимов. — М.: ИП Филимонов М.В., 2014. — 560 с.
11. Zheng X., Zhang S., Wu Y., Xu G., Hao J. Measurement of particulate polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from gasoline light-duty passenger vehicles // *Journ. of Cleaner Production*. — 2018. — Vol. 185. — P. 797–804.
12. Liu K., Xie W.E.L., Zhao Z.-B., Pan W.-P., Riley J.T. Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons in fly ash from fluidized bed combustion systems // *Environ. Sci. Technol.* — 2000. — Vol. 34, N 11. — P. 2273–2279.
13. Verma S., Masto R., Gautam S., Choudhury D., Ram L., Maiti S., Maity S. Investigations on PAHs and trace elements in coal and its combustion residues from a power plant // *Fuel*. — 2015. — Vol. 162. — P. 138–147.
14. Wang D.-G., Yang M., Jia H.-L., Zhou L., Li Y.-F. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust and surface soil: Comparisons of concentration, profile, and source // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. — 2009. — Vol. 56. — P. 173–180.
15. Cecinato A., Guerriero E., Balducci C., Muto V. Use of the PAH fingerprints for identifying pollution sources // *Urban Climate*. — 2014. — Vol. 10. — P. 630–643.
16. Яковлева Е.В., Габов Д.Н. Механизмы накопления полициклических ароматических углеводородов в почвах и растенных тундровой зоны Республики Коми под влиянием добычи и сжигания угля // *Антропогенная трансформация природной среды*. — 2018. — № 4. — С. 207–211.
17. Lily T., Xiang-Yu T., Zhu Y.-G., Zheng M.-H., Miao Q.-L. Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils in Beijing, China // *Environment International*. — 2005. — Vol. 31. — P. 822–828.
18. Morillo E., Romero A.S., Maqueda C., Madrid L., Ajmone-Marsan F., Grcman H., Davidson C.M., Hursthouse A.S., Villaverde J. Soil pollution by PAHs in urban soils: a comparison of three European cities // *Journ. of Environmental Monitoring*. — 2007. — Vol. 9, N 9. — P. 1001–1008.
19. Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Многолетняя динамика и факторы накопления бенз(а)пирена в почвах (на примере ВАО Москвы) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. Почвоведение*. — 2011. — № 2. — С. 24–35.
20. Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е. Полициклические ароматические углеводороды в городских почвах (Москва, Восточный округ) // *Почвоведение*. — 2011. — № 9. — С. 1114–1127.
21. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Vlasov D.V. Benzo[a]pyrene in urban environments of eastern Moscow: pollution levels and critical loads // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2017. — Vol. 17. — P. 2217–2227.
22. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. — М.: АПР, 2016. — 276 с.
23. *Экологический атлас бассейна озера Байкал*. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. — 145 с.
24. Белозерцева И.А., Владимиров И.Н., Убугунова В.И., Убугунов В.Л., Екимовская О.А., Бардаш А.В. Почвы водоохранной зоны озера Байкал и их использование // *География и природ. ресурсы*. — 2016. — № 5. — С. 70–82.
25. Убугунов Л.Л., Убугунова В.И., Белозерцева И.А., Гынинова А.Б., Сороковой А.А., Убугунов В.Л. Почвы и почвенный покров бассейна оз. Байкал // *География и природ. ресурсы*. — 2018. — № 4. — С. 76–87.
26. Цыбикдоржиев Ц.Ц., Цыбжитов Ц.Х., Убугунов Л.Л., Гончиков Б.Н., Цыбжитов А.Ц., Бадмаев Н.Б. Почвы // *Байкал. Природа и люди. Энциклопед. справочник*. — Улан-Удэ: ЭКОС, 2008. — С. 270–275.
27. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы (генезис, география, рекультивация). — М.: Ойкумена, 2003. — 266 с.
28. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. — М.: Астрей-2000, 1999. — 768 с.
29. Публичная кадастровая карта Росреестра (Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии РФ) [Электронный ресурс]. — <https://pkk.rosreestr.ru/> (дата обращения 26.02.2022).
30. Kohler M., Künniger T. Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) from creosoted railroad ties and their relevance for life cycle assessment (LCA) // *Holz als Roh- und Werkstoff*. — 2003. — Vol. 61, Iss. 2. — P. 117–124.
31. Witkomirski B., Sudnik-Wyjcikowska B., Galera H., Wierzbička M., Malawska M. Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution // *Water Air Soil Pollut.* — 2011. — Vol. 218. — P. 333–345.
32. Макаров А.О. Оценка экологического состояния почв некоторых железнодорожных объектов ЦАО г. Москвы: Дис. ... канд. биол. наук. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2014. — 303 с.

33. Perrone M.G., Carbone C., Faedo D., Ferrero L., Maggioni A., Sangiorgi G., Bolzacchini E. Exhaust emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons, *n*-alkanes and phenols from vehicles coming within different European classes // Atmospheric Environment. — 2014. — Vol. 82. — P. 391–400.
34. *Railway ecology* / Eds. L. Borda-da-Agua, R. Barrientos, P. Beja, H.M. Pereira. — Cham (Switzerland): Springer-Open, 2017. — 320 p.
35. Fang X., Wu L., Zhang Q., Zhang J., Mao H. Characteristics, emissions and source identifications of particle polycyclic aromatic hydrocarbons from traffic emissions using tunnel measurement // Transportation Research. — 2019. — Part D, Vol. 67. — P. 674–684.
36. Ahmed T.M., Bergvall C., Westerholm R. Emissions of particulate associated oxygenated and native polycyclic aromatic hydrocarbons from vehicles powered by ethanol/gasoline fuel blends // Fuel. — 2018. — Vol. 214. — P. 381–385.
37. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году». — Иркутск: АНО «КЦ Эксперт», 2018. — 340 с.
38. 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.
39. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания». — 2021. — С. 751–754.
40. Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Ассоциации полициклических ароматических углеводородов в пройденных пожарами почвах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. — 2011. — № 3. — С. 13–19.
41. Zhang Y., Peng C., Guo Zh., Xiao X., Xiao R. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of China: Distribution, influencing factors, health risk and regression prediction // Environmental Pollution. — 2019. — Vol. 254, Part A. — Article number 112930. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.098>
42. Peng C., He Y., Zhang K., Zhang Y., Wan X., Wang M., Chen W. Estimating accumulation rates and health risks of PAHs in residential soils of metropolitan cities // Journ. of Environmental Management. — 2022. — Vol. 319. — Article number 115699. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115699>
43. Xia X., Liu Y., Zhang Zh., Xi N., Bao J., Yang Zh. Soil PAH Concentrations Decrease in China in Response to the Adjustment of the Energy Structure during the Past Two Decades // Engineering [Электронный ресурс]. — <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809922000868?via%3Dihub> (дата обращения 26.02.2022).
44. Shukla S., Khan R., Bhattacharya P., Devanesan S. Concentration, source apportionment and potential carcinogenic risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in roadside soils // Chemosphere. — 2022. — Vol. 292. — Article number 133413. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133413>
45. Sushkova S., Minkina T., Deryabkina I., Rajput V., Antonenko E., Nazarenko O., Yadav B.K., Hakki E., Mohan D. Environmental pollution of soil with PAHs in energy producing plants zone // Science of the Total Environment. — 2019. — Vol. 655. — P. 232–241. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.080
46. Hsu Y.-C., Chang S.-H., Chang M.B. Emissions of PAHs, PCDD/Fs, dl-PCBs, chlorophenols and chlorobenzenes from municipal waste incinerator cofiring industrial waste // Chemosphere. — 2021. — Vol. 280. — Article number 130645. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130645>
47. Davin M., Colinet G., Fauconnier M.-L. Targeting the right parameters in PAH remediation studies // Environmental Pollution. — 2021. — Vol. 278. — Article number 116857. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116857>
48. Константинова Е.Ю., Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Антоненко Е.М., Константинов А.О., Хорошавин В.Ю. Полициклические ароматические углеводороды в почвах промышленных и селитебных зон Тюмени // Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329, № 8. — С. 66–79.
49. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Накопление полициклических ароматических углеводородов в почвах и растениях тундровой зоны под воздействием угледобывающей промышленности // Почвоведение. — 2016. — № 11. — С. 1402–1412.
50. Маковская Т.И., Дьячкова С.Г. Органические загрязнители в почвенно-растительном покрове зоны влияния шпалопродукционного производства // Вестн. Красноярск. гос. аграр. ун-та. — 2009. — № 6. — С. 67–72.
51. Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. — 336 с.

Поступила в редакцию 10.04.2020

После доработки 10.08.2022

Принята к публикации 29.06.2023