https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-948-955

Оригинальная статья

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2026

Читать онлайн
Read online

Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В., Нурисламова Т.В., Старчикова М.О., Загороднов С.Ю., Балашов С.Ю.

Гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами при выбросах автономных источников теплоснабжения, использующих различные виды твёрдого топлива

ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, 614045, Пермь, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. *Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), обладающие канцерогенной и мутагенной активностью, являются приоритетными загрязнителями атмосферного воздуха в условиях применения в энергетике твёрдых топлив.*

Цель исследования *– сравнительный анализ качественного и количественного состава ПАУ в выбросах автономных источников теплоснабжения (АИТ), использующих различные виды твёрдого топлива, и гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха.*

Материалы и методы. *Экспериментальное исследование ПАУ в выбросах выполняли для типовой отопительной печи АИТ при сжигании берёзовых дров, древесных пеллет, бурого и каменного угля на стадиях розжига и стационарного горения. Нафталин, 2-метилнафталин, антрацен, 9-метилантрацен, пирен и бенз(а)пирен определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием. Модельные расчёты рассеивания проводили для условной группы из 48 АИТ по стандартизованным методикам. Гигиеническую оценку выполняли по критериям ПДК$_{с.с.}$ и критериям риска для здоровья с применением факторов относительной канцерогенной активности.*

Результаты. *Наибольшее суммарное содержание ПАУ на стадии розжига зафиксировано для углей (0,000962 мг/м^3 – для бурого, 0,00207 мг/м^3 – для каменного) с образованием высокомолекулярных ПАУ – пирена и бенз(а)пирена (до 0,00113 ± 0,000204 и 0,000897 ± 0,000188 мг/м^3 соответственно). Минимальное суммарное содержание ПАУ (0,000283 мг/м^3) с преобладанием нафталина и 2-метилнафталина отмечено при использовании древесных пеллет. Концентрации бенз(а)пирена на стадии розжига были выше, чем при стационарном горении, в 2–18 раз. В ситуационном моделировании уровней загрязнения воздуха превышения ПДК$_{с.с.}$ выявлены только у бенз(а)пирена (до 10ПДК$_{с.с.}$ при сжигании бурых углей).*

Ограничения исследования. *Исследования выполнены на одной модели печи при ограниченном числе повторностей.*

Заключение. *ПАУ в разных сочетаниях и концентрациях присутствуют в выбросах АИТ при применении всех видов твёрдых топлив. Сжигание углей формирует наибольшие риски для здоровья населения. Целесообразно проведение регулярного контроля содержания комплекса ПАУ в выбросах при использовании твёрдого топлива. Разработку и оценку эффективности региональных программ по снижению загрязнения атмосферного воздуха в населённых пунктах с развитым твердотопливным отоплением рекомендуется проводить с учётом расчётных данных о рисках для здоровья.*

Ключевые слова: *полициклические ароматические углеводороды; ПАУ; высокоэффективная жидкостная хроматография; атмосферный воздух; твёрдое топливо; гигиеническая оценка*

Соблюдение этических стандартов*. Исследование не требует заключения комитета по биомедицинской этике.*

Для цитирования: Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В., Нурисламова Т.В., Старчикова М.О., Загороднов С.Ю., Балашов С.Ю. Гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха полициклическими ароматическими углеводородами при выбросах автономных источников теплоснабжения, использующих различные виды твёрдого топлива. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 958–955. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-948-955 https://elibrary.ru/utaoen

Для корреспонденции: *Май Ирина Владиславовна*, e-mail: may@fcrisk.ru

Вклад авторов: *Зайцева Н.В.* – дизайн исследования, научная консультация; *Май И.В.* – дизайн исследования, написание текста; *Клейн С.В.* – написание текста, редактирование; *Нурисламова Т.В.* – написание текста, анализ данных литературы; *Старчикова М.О.* – сбор материала, обработка данных; *Загороднов С.Ю.* – выполнение расчётов, обработка данных; *Балашов С.Ю.* – выполнение расчётов, построение карт. *Все соавторы* – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 07.07.2026 / Поступила после доработки: 20.08.2026 / Принята к печати: 15.09.2026 / Опубликована: 20.10.2026

Original article

Nina V. Zaitseva, Irina V. May, Svetlana V. Kleyn, Tatyana V. Nurislamova, Maria O. Starchikova, Sergey Yu. Zagorodnov, Stanislav Yu. Balashov

Hygienic assessment of ambient air pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons in emissions from autonomous heat supply sources using various types of solid fuel

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies of the Federal Service for Surveillance over Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Perm, 614045, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. *Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) which have carcinogenic and mutagenic effects are priority ambient air pollutants on territories where energy sector use solid fuel.*

The aim of this study *was to comparatively analyze quantitative and qualitative composition of PAH in emissions from autonomous heating sources (AHS) upon use of various fossil fuels and perform hygienic assessment of ambient air pollution.*

Materials and methods. *An experimental study of PAH in emissions was conducted for a typical heating furnace fueled by using birch firewood, wooden pellets, brown coal and coal. Naphthalene, 2-methyl-naphthalene, anthracene, 9-metyl-anthracene, pyrene and benzo(a)pyrene were quantified by using high-performance liquid chromatography with fluorometric detection. Model calculations of dispersion were accomplished for a simulated group of forty eight AHS stoves according to standardized methods. Hygienic assessment involved using average daily MPC and health risk criteria using factors of relative carcinogenic activity.*

Results*. The highest total PAH contents at the ignition stage were detected for coals (0.962 μg/m³ for brown coal, 2.07 μg/m³ for coal) with the most intensive formation of high-molecular PAH, pyrene and benzo(a)pyrene (in coal ignition: 1.132±0.204 and 0.897±0.188 μg/m³ respectively). The lowest total PAH contents (0.283 μg/m³) with prevailing naphthalene and 2-methyl-naphthalene were detected for use of wooden pellets. Benzo(a)pyrene concentrations were 2–18 times higher during ignition against stationary burning. Situational simulation of ambient air pollution revealed that only benzo(a)pyrene concentrations exceeded average daily MPC.*

Limitations*. The study was accomplished only for one type of furnace and involved limited number of repetitions.*

Conclusion. *PAH occur in emissions from AHS in different combinations and concentrations upon use of all kinds of fossil fuels. Regular monitoring of PAH emissions from solid fuel use is advisable. The development and effectiveness of regional air pollution reduction programs in communities with extensive solid fuel heating systems should be based on health risks assessment.*

Keywords: *polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs; high-performance liquid chromatography; atmospheric air; solid fuel; hygienic assessment*

Compliance with ethical standards. *This study does not require approval of a biomedical ethics committee.*

For citation: Zaitseva N.V., May I.V., Kleyn S.V., Nurislamova T.V., Starchikova M.O., Zagorodnov S.Yu., Balashov S.Yu. Hygienic assessment of ambient air pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons in emissions from autonomous heat supply sources using various types of solid fuel. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal.* 2026; 105(9): 948–955. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-948-955 https://elibrary.ru/utaoen (In Russ.)

For correspondence: *Irina V. May,* e-mail: may@fcrisk.ru

Contribution: *Zaitseva N.V.* – study concept and design; *May I.V.* – study design, writing the text; *Kleyn S.V.* – writing the text, editing; *Nurislamova T.V.* – writing the text, literature data collection and analysis; *Starchikova M.O.* – data collection, data analysis; *Zagorodnov S.Y.* – performing calculations, data analysis; *Balashov S.Yu.* – performing calculations, plotting maps. *All authors* are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

Received: July 7, 2026 / Revised: August 20, 2026 / Accepted: , 2026 / Published: October 20, 2026

Введение

На территориях страны с низким уровнем газификации в системах тепло- и электрогенерации широко применяется твёрдое топливо, в том числе его используют домохозяйства с автономными источниками теплоснабжения (АИТ) [1, 2]. АИТ, как правило, имеют невысокие трубы для отходящих газов (не выше 5–8 м над поверхностью земли), не обеспечены специальными пылегазоочистными устройствами и формируют загрязнение непосредственно в зонах постоянного проживания населения [3]. Поэтому актуальна задача гигиенической оценки соблюдения ПДК полициклических ароматических соединений (ПАУ) как наиболее опасных компонентов выбросов в зонах влияния АИТ [4–6].

С гигиенических позиций интерес к ПАУ обусловлен их высокой биологической активностью. Многие соединения этой группы, в первую очередь бенз(а)пирен, бенз(а)антрацен, нафталин, аценафтилен, обладают токсическим, канцерогенным, мутагенным и иммунотоксическим действием и представляют серьёзную опасность для окружающей среды и здоровья человека [7]. Одним из наиболее распространённых, стабильных и высокоактивных соединений данной группы, присутствующих в атмосферном воздухе, является бенз(а)пирен [8]. Образование бенз(а)пирена и других ПАУ связано с высокотемпературными процессами термического разложения и неполного сгорания органического топлива, в том числе угля, нефти, древесины [9]. Международное агентство по изучению рака (МАИР) классифицирует бенз(а)пирен как канцероген 1-й группы, вещество с доказанной канцерогенностью для человека [10]. В Российской Федерации установлены предельно допустимые среднесуточная и среднегодовая концентрации бенз(а)пирена на уровне 0,000001 мг/м³, он относится к 1-му классу опасности (чрезвычайно опасные вещества)[1]. Долгопериодные гигиенические нормативы для таких ПАУ, как нафталин, антрацен, метилантрацен, метилнафталин, в настоящее время не установлены.

В научной литературе накоплен обширный материал по эмиссии ПАУ при сжигании различных видов топлива. В работах отечественных [11, 12] и зарубежных [5, 6, 13–15] авторов показана зависимость количественного и качественного состава ПАУ от температуры горения, содержания кислорода в зоне реакции, влажности и химического состава топлива. При этом остаются малоизученными закономер-

[1] СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2. [Электронный ресурс]. КОДЕКС. URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115 (дата обращения: 19.06.2026 г.).

https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-948-955

ности изменения профилей ПАУ при переходе от розжига к стационарному горению, а также вклад метилированных производных ПАУ, для которых гигиенические нормативы в атмосферном воздухе в настоящее время отсутствуют. Недостаточная изученность данных соединений может приводить к неполной оценке потенциального риска воздействия продуктов сгорания на здоровье населения и окружающую среду.

Цель исследования – сравнительный анализ качественного и количественного состава ПАУ в выбросах автономных источников теплоснабжения при использовании различных видов твёрдого топлива (древесина, пеллеты, каменный и бурый уголь) на этапах розжига и стационарного горения и гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха данными соединениями в зонах влияния источников.

Материалы и методы

Объект исследования – пробы пылегазовых выбросов, отобранные при сжигании твёрдого топлива: пеллеты древесные (гранулы из хвойных пород древесины, 8 мм), дрова берёзовые (размер колки дров средний, сухие, с берестой), уголь бурый (марка 3БОМ, класс крупности 10–50 мм), уголь каменный сортовой (длиннопламенный плита-кулак, класс крупности 50–300 мм) с дровами берёзовыми колотыми для прогрева угля. Для сжигания всех исследуемых видов твёрдого топлива использовали печь отопительную (670 × 350 × 600 мм) длительного горения «Ермак-Термо 100» (мощность 6 кВт, КПД 80%, диаметр дымохода 115 мм, высота трубы 3000 мм).

Процесс сжигания бурого и каменного угля включал несколько последовательных этапов: предварительный прогрев печи с использованием 2 кг мелких дров, последующую закладку 2,5 кг дров, этап розжига с добавлением 5 кг угля, стационарный режим горения топлива. Сжигание древесных пеллет и берёзовых дров осуществляли по аналогичной схеме за исключением этапа закладки дров.

Отбор разовых проб воздуха проводили на расстоянии 1 м от устья источника путём аспирации через кварцевые фильтры со скоростью 100 дм^3/мин в процессе разжигания (25 мин), затем стационарного горения (25 мин) трёх партий каждого вида твёрдого топлива. Все партии топлива сжигали отдельно с повторным розжигом и полным сгоранием. После каждого эксперимента установка подвергалась полной очистке. При отборе проб фиксировали температуру воздуха и атмосферное давление.

Измерения исследуемых ПАУ проводили в соответствии с МУК 4.1.3985–24 «Методика измерений массовых концентраций полициклических ароматических углеводородов (нафталин, 2-метилнафталин, антрацен, 9-метилантрацен, пирен, бенз(а)пирен) в атмосферном воздухе методом высокоэффективной жидкостной хроматографии». Фильтры экстрагировали 10 см^3 ацетонитрила, 1 см^3 полученного экстракта переносили в хроматографическую виалу и анализировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием (ВЭЖХ-ФЛД). Анализ шести ПАУ проводили на жидкостном хроматографе Prominence Shimadzu с флуориметрическим детектором на колонке с обращённой фазой C18 Zorbax Eclipse PAH с параметрами 4,6 × 50 мм, зернением 3,5 мкм в условиях градиентного элюирования смесью ацетонитрила и воды со скоростью 0,8 см^3/мин и температурой колонки плюс 30 °С. Детектирование аналитов выполняли в режиме программирования оптимальных длин волн (λ) возбуждения (Ex) и эмиссии (Em) флуориметрического детектора: 4,9 мин: λ Ex/Em = 270/335 нм; 6 мин: 249/402 нм; 7,4–8,5 мин: 245/390 нм; 9,5 мин: 265/412 нм.

Степень извлечения ПАУ с фильтров составляет 90–100%; относительная погрешность измерений – 19–25%. Нижний предел измерений концентрации нафталина, 2-метилнафталина в атмосферном воздухе, согласно методике, составляет 0,0000001 мг/м^3, антрацена, 9-метилантрацена, пирена – 0,00000007 мг/м^3, бенз(а)пирена – 0,00000004 мг/м^3.

Установленные концентрации ПАУ в выбросах применяли в модельном расчёте рассеивания примесей от ≈ 50 сгруппированных источников, имитирующих частные домохозяйства. Все источники были приняты идентичными с параметрами: высота источников 6 м; диаметр устья 0,16 м; объём газовоздушной смеси 0,04 м^3/с; скорость выхода газовоздушной смеси 1,29–1,874 м/с; температура – плюс 124 °С. Расчёт выполняли с применением унифицированной программы «Эколог-город» v.4.70, реализующей утверждённые «Методы расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (приказ Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273). Регулярная сетка 1000 × 1000 м имела шаг 50 м.

Сравнение результатов проводили по отношению к гигиеническим нормативам: ПДК$_{с.с.}$ (для бенз(а)пирена – 0,000001 мг/м^3), ПДК$_{м.р.}$ (для нафталина – 0,007 мг/м^3), ОБУВ (для 2-метилнафталина – 0,02 мг/м^3, антрацена – 0,01 мг/м^3, пирена – 0,001 мг/м^3)[1]. Для статистической обработки применяли программу Microsoft Office Excel 2010. Рассчитывали средние значения концентраций (*M*) и их стандартные ошибки (± *m*).

Оценку канцерогенного риска в зонах влияния выбросов, содержащих ПАУ, выполняли по стандартизованным методикам. Величину канцерогенного потенциала (слоуп-фактор, SF) при ингаляционном поступлении бенз(а)пирена принимали равным 3,9 мг/кг/сут; для нафталина – 0,12. Для антрацена рассчитывали слоуп-фактор через значение фактора относительной активности ($SF = SF_e \cdot PEF$), где PEF антрацена принимали равным 0,32; в качестве эталонного вещества рассматривали бенз(а)пирен ($SF_e = 3,9$). Соответственно $SF_{антрацена}$ составил 1,25 мг/кг/сут (приложение П 1.4, Приложение 5, Р 2.1.10.3968–23[2]). Для прочих идентифицированных ПАУ слоуп-фактор принимали на уровне 0,7 мг/кг/сут, как для полициклических органических веществ (CAS 65996-93-2)[2].

Результаты

В результате анализа отобранных проб атмосферного воздуха установлено присутствие нафталина, антрацена, пирена, бенз(а)пирена и их метилпроизводных (2-метилнафталина, 9-метилнафталина) в атмосфере в период розжига и сжигания всех исследуемых типов топлива. Полученные средние значения разовых концентраций ПАУ представлены в **табл. 1, 2**. Анализ результатов, представленных в табл. 1, показал, что при разжигании печей различными видами твёрдого топлива в выбросах обнаруживаются все исследуемые ПАУ, уровень содержания каждого ПАУ зависит от вида исследуемого топлива. Наибольшее суммарное содержание ПАУ на стадии розжига фиксируется при использовании углей (0,000962 мг/м^3 для бурого и 0,00207 мг/м^3 для каменного угля) с наиболее интенсивным образованием высокомолекулярных ПАУ – пирена и бенз(а)пирена.

Минимальное суммарное содержание ПАУ (0,000283 мг/м^3) отмечено при использовании древесных пеллет. В структуре выброса преобладали более летучие низкомолекулярные соединения – нафталин и его метилпроизводное.

На этапе стационарного горения (см. табл. 2) масса выбрасываемых ПАУ снижалась практически у всех видов топлива и всех видов веществ. Особенно значительно выброс сокращался при использовании углей: на 34% при сжигании бурого и на 80% – при сжигании каменного угля. При применении пеллет концентрации ПАУ на стадии стационарного горения близки к уровню стадии розжига, что свидетельствует о быстром старте процесса горения и его выходе

[2] Р 2.1.10.3968–23 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду», утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации, первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации 05.03.2004 г. [Электронный ресурс]. КОДЕКС. URL: https://docs.cntd.ru/document/1304711431 (дата обращения: 19.06.2026 г.).

Таблица 1 / Table 1

Концентрации ПАУ в выбросах при режиме разжигания печи, $M \pm m$

PAH concentrations in emissions in the solid fuel ignition mode, $M \pm m$

ПАУ PAH	Концентраций ПАУ, мг/м³, долевой вклад в сумму ПАУ (%) PAH concentrations, mg/m³, share contribution to the amount of PAHs (%)			
	Берёзовые дрова Birch firewood	Древесные пеллеты Wood pellets	Бурый уголь Brown coal	Каменный уголь Coal
Нафталин Naphthalene	0.00030 ± 0.00006 (57.9)	0.00012 ± 0.00002 (42.39)	0.00001 ± 0.000001 (1.04)	0.00001 ± 0.000001 (0.48)
2-Метилнафталин 2-Methylnaphthalene	0.00007 ± 0.00001 (13.51)	0.00005 ± 0.00001 (17.66)	0.00001 ± 0.0000013 (1.04)	0.00001 ± 0.000001 (0.48)
Антрацен Anthracene	0.0000004 ± 0.0000001 (0.08)	0.0000003 ± 0.0000001 (0.11)	0.000002 ± 0.0000003 (0.21)	0.000005 ± 0.0000009 (0.26)
9-Метилантрацен 9-Methylanthracene	0.0000006 ± 0.0000002 (0.12)	0.0000008 ± 0.0000002 (0.28)	0.000007 ± 0.000001 (0.73)	0.0000165 ± 0.0000035 (0.80)
Пирен Pyrene	0.000019 ± 0.000003 (3.67)	0.000021 ± 0.0000052 (7.42)	0.000295 ± 0.000053 (30.67)	0.001132 ± 0.000204 (54.66)
Бенз(а)пирен Benz(a)pyrene	0.000128 ± 0.000027 (24.71)	0.000091 ± 0.000019 (32.14)	0.000638 ± 0.000134 (66.32)	0.000897 ± 0.000188 (43.32)
Суммарное содержание ПАУ Amount of PAHs	0.000518 ± 0.000100 (100.0)	0.0002831 ± 0.000055 (100.0)	0.000962 ± 0.0001906 (100.0)	0.0020708 ± 0.000398 (100.0)

Таблица 2 / Table 2

Концентрации ПАУ в выбросах печи при режиме стационарного горения твёрдого топлива

PAH concentrations in emissions in the steady-state combustion mode of solid fuel

ПАУ PAH	Концентраций ПАУ, мг/м³, долевой вклад в сумму ПАУ (%) PAH concentrations, mg/m³, share contribution to the amount of PAHs (%)			
	Берёзовые дрова Birch firewood	Древесные пеллеты Wood pellets	Бурый уголь Brown coal	Каменный уголь Coal
Нафталин Naphthalene	0.00021 ± 0.00004 (77.23)	0.00026 ± 0.00005 (69.95)	< НПО (0) < LLOQ (0)	< НПО (0) < LLOQ (0)
2-Метилнафталин 2-Methylnaphthalene	0.00005 ± 0.00001 (18.39)	0.00007 ± 0.00001 (18.83)	< НПО (0) < LLOQ (0)	< НПО (0) < LLOQ (0)
Антрацен Anthracene	< НПО (0) < LLOQ (0)	< НПО (0) < LLOQ (0)	0.0000054 ± 0.0000009 (0.84)	0.000012 ± 0.000002 (3.19)
9-Метилантрацен 9-Methylanthracene	0.0000019 ± 0.0000004 (0.70)	0.0000087 ± 0.0000018 (2.34)	0.0000007 ± 0.0000002 (0.11)	0.0000194 ± 0.0000041 (5.15)
Пирен Pyrene	0.000003 ± 0.000001 (1.10)	0.000018 ± 0.000005 (4.84)	0.000302 ± 0.000054 (47.18)	0.000137 ± 0.000025 (36.40)
Бенз(а)пирен Benz(a)pyrene	0.000007 ± 0.000001 (2.57)	0.000015 ± 0.000003 (4.04)	0.000332 ± 0.000069 (51.87)	0.000208 ± 0.000044 (55.26)
Суммарное содержание ПАУ Amount of PAHs	0.000272 ± 0.000043 (100.0)	0.000372 ± 0.000069 (100.0)	0.0006401 ± 0.000124 (100.0)	0.000376 ± 0.000075 (100.0)

Примечание. НПО – ниже порога определения.

Note: LLOQ – below the limit of detection.

на постоянный режим. Выбросы ПАУ при применении древесного топлива (дрова и пеллеты) остаются более низкими, чем при применении углей.

Выявленная в составе выбросов структура ПАУ позволяет рассматривать нафталины (нафталин и 2-метилнафталин) как маркёры применения древесного топлива, пирен и бенз(а)пирен – угольного топлива, что в определённых ситуациях может использоваться для идентификации возможных источников загрязнения.

В целом полученные экспериментальные данные позволили выполнить сценарное моделирование и оценку санитарно-эпидемиологической ситуации в зонах влияния 48 однотипных АИТ, имитирующих частную жилую застройку. Отсутствие среднесуточных гигиенических нормативов для пяти из выявленных ПАУ не позволяет оценить ситуацию по группе показателей. В качестве примера на **рис. 1**, **2** (см. на вклейке) показаны поля приземных концентраций бенз(а)пирена как наиболее опасного и нормируемого компонента на модельной территории размещения АИТ с разными видами топлива.

Установлено, что применение угольного топлива формирует наибольшие зоны влияния и наиболее высокие приземные концентрации и на стадии розжига, и при стационарном горении. Так, при использовании каменного угля в период розжига приземные концентрации бенз(а)пирена выше 1 $ПДК_{с.с.}$ фиксируются на расстоянии до 550–700 м.

https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-948-955

Оригинальная статья

Таблица 3 / Table 3

Среднегодовая приземная расчётная концентрация ПАУ и канцерогенный риск в точке максимума при сценарном моделировании работы группы АИТ (розжиг и 9 мес работы котлов по 7 ч в день)

Annual average ground-level PAH concentration and carcinogenic risk at the point of maximum a scenario-based simulation of the autonomous heat supply source (ignition and 9 months of boiler operation, 7 h/day)

ПАУ в составе выбросов PAHs in emissions	Используемое топливо | Fuel used			
	Берёзовые дрова Birch firewood	Древесные пеллеты Wood pellets	Бурый уголь Brown coal	Каменный уголь Coal
Среднегодовая экспозиция, мг/м³ | Annual average exposure, mg/m³				
Нафталин | Naphthalene	2.63,00E–05	3.71E–05	< 1.0E–10	< 1.0E–10
2-Метилнафталин | 2-Methylnaphthalene	1.25E–05	1.00E–05	< 1.0E–10	< 1.0E–10
Антрацен | Anthracene	< 1.0E–10	< 1.0E–10	2.778E–07	5.21E–07
9-Метилантрацен | 9-Methylanthracene	2.71E–07	1.24E–06	1.17E–07	2.77E–06
Пирен | Pyrene	4.29E–07	2.57E–06	1.00E–07	1.96E–05
Бенз(а)пирен | Benz(a)pyrene	1.00E–06	2.00E–06	5.53E–05	4.16E–05
Канцерогенный риск | Cancer risk				
Нафталин | Naphthalene SF = 0.12	3.15E–06	4.46E–06	< 1.0E–10	< 1.0E–10
2-Метилнафталин | 2-Methylnaphthalene SF = 0.7	8.75E–06	7.00E–06	< 1.0E–10	< 1.0E–10
Антрацен | Anthracene SF = 1.25	< 1.0E–10	<1.0E–10	3.46E–07	6.51E–07
9-Метилантрацен | 9-Methylanthracene SF = 0.7	1.90E–07	8.70E–07	8.17E–08	1.94E–06
Пирен | Pyrene SF = 0.7	3.00E–07	1.80E–06	7.00E–08	1.37E–05
Бенз(а)пирен | Benz(a)pyrene SF = 3.9	3.90E–06	7.80E–06	2.16E–04	1.62E–04
Суммарный риск | Total risk	1.673E–05 Приемлемый Acceptable	2.14E–05 Приемлемый Acceptable	2.59E–04 Неприемлемый Unacceptable	1.63E–04 Неприемлемый Unacceptable

Розжиг котлов на древесных пеллетах формирует зону загрязнения на расстоянии порядка 300–450 м от крайних источников. Дровяные печи на стадии розжига формируют загрязнение бенз(а)пиреном, близкое к пеллетам, печи на буром угле – к работающим на каменном угле.

Суточные концентрации бенз(а)пирена выше $ПДК_{с.с.}$ на стадиях стационарного горения в модельной ситуации регистрировали при применении пеллет и (или) берёзовых дров на расстоянии от 120 до 250 м от крайних источников, при применении угля (бурого и каменного) – на расстоянии 400–450 м. Соответственно зона загрязнения при прочих равных в условиях применения углей в качестве топлива может быть в 4–5 раз больше, чем при применении древесного топлива.

Вместе с тем полученные данные подтвердили, что низкие АИТ, не оборудованные специальными средствами очистки газов, являются источниками загрязнения атмосферного воздуха в местах постоянного проживания населения, особенно в зимний отопительный период.

Учёт суммарной экспозиции, формируемой нафталином, антраценом и бенз(а)пиреном – веществами, для которых количественно определены коэффициенты канцерогенного потенциала, – позволяет оценить и сопоставить уровни канцерогенных рисков для модельных условий зон влияния источников (**табл. 3**).

Модельная ситуация свидетельствует о возможности формирования неприемлемого канцерогенного риска для здоровья в условиях одновременного присутствие ряда ПАУ в составе выбросов АИТ. Неприемлемые риски (более 1,0E–04) в рассматриваемой ситуации отмечены только при сжигании угольного топлива. Бенз(а)пирен вносит основной вклад в риски для здоровья: до 90% при применении каменного угля и до 99% – при использовании бурых углей.

При сжигании древесного топлива нафталин и его производные могут формировать до 70% вклада в ингаляционный канцерогенный риск. В модельной ситуации работы АИТ на дровах и пеллетах неприемлемый риск не установлен. Вместе с тем в реальных условиях плотной городской застройки, когда домохозяйства используют АИТ, расчёт аэрогенной экспозиции и оценка рисков для здоровья целесообразны при применении любых видов твёрдого топлива.

Обсуждение

Углублённые исследования количественного и качественного состава ПАУ в пылегазовых выбросах автономных источников теплоснабжения позволили доказательно установить, что состав данных компонентов выбросов зависит от типа используемого топлива и от стадии процесса горения. Наибольшие концентрации высокомолекулярных ПАУ обнаружены при сжигании угольного топлива на стадии розжига печей. При использовании древесного топлива в атмосферный воздух выбрасывались преимущественно низкомолекулярные ПАУ – нафталин и 2-метилнафталин. Для всех видов топлива концентрации бенз(а)пирена на этапе розжига были в 2–18 раз выше, чем в режиме стационарного горения. Особенно ярко это проявляется для каменного угля: 0,000897 против 0,000208 мг/м³ (различие в 4,3 раза). Когда температура в топке недостаточно высока и процессы окисления протекают не полностью, образуется максимальное количество продуктов неполного сгорания, в том числе высокотоксичных ПАУ. В то же время доля нафталина в стационарном режиме возрастает (с 57,6 до 77,3% для дров, с 41,7 до 70,6% – для пеллет), что обусловлено термофрагментацией высокомолекулярных ПАУ, адсорбированных на сажистых частицах, при высокой температуре.

Полученные данные согласуются с результатами ранее проведённых исследований, показывающих, что при горении древесины в условиях недостатка кислорода образуются преимущественно низкомолекулярные ароматические соединения, в том числе нафталин и его алкилированные производные [16, 17]. Уголь, имеющий более сложную полициклическую структуру с высокой степенью конденсации ароматических колец, при неполном сгорании высвобождает значительные количества высокомолекулярных ПАУ – пирена, бенз(а)пирена, бенз(а)антрацена [18, 19]. Преобладание в выбросах высокомолекулярных ПАУ, в том числе с канцерогенной активностью, делает угольное топливо более опасным для здоровья населения по сравнению с древесным [9].

Особого внимания заслуживает факт постоянного обнаружения метилированных производных ПАУ (2-метилнафталин и 9-метилантрацен) во всех пробах. Их суммарная доля в общем содержании ПАУ достигала 13,5–19,1% для дров и 18,2–20,5% для пеллет. Для углей она была ниже, но всё же составляла 0,1–5,1%. В настоящее время в Российской Федерации для этих соединений не установлены ни ПДК, ни ОБУВ для атмосферного воздуха. Это создаёт методическую проблему при проведении гигиенической оценки загрязнения. Метилированные производные ПАУ по сравнению с их родительскими соединениями традиционно рассматриваются реже, однако накопленные данные свидетельствуют об их значимой биологической активности. Как показано в исследованиях [20, 21], 2-метилнафталин характеризуется выраженной токсичностью в отношении дыхательной системы (способен вызывать повреждение респираторного эпителия), а 9-метилантрацен проявляет фотохимическую активность. Полученные результаты подтверждают актуальность токсикологических исследований метилированных ПАУ, разработки долгопериодных гигиенических нормативов ($ПДК_{с.с.}$) этих соединений в атмосферном воздухе, а также включения метилированных ПАУ в программы мониторинга в регионах с интенсивным использованием твёрдого топлива.

В целом в условиях широкого применения АИТ на негазифицированных или частично газифицированных территориях страны загрязнение атмосферного воздуха ПАУ, в том числе бенз(а)пиреном, можно считать серьёзной проблемой [22, 23]. Так, АИТ ряда городов страны, в том числе участников федерального проекта «Чистый воздух», на отдельных участках вносят до 80% вклада в загрязнение бенз(а)пиреном, а территории, на которых фиксируются превышения, составляют до 10% от площади города [3, 24, 25]. Частичная или полная замена угольных котлов частного сектора на газовые и (или) ориентированные на применение пеллет позволит улучшить санитарно-гигиеническую ситуацию, сократить зоны загрязнения и снизить риски для здоровья населения. Полученные результаты могут рассматриваться как дополнительный аргумент для разработки и реализации мероприятий по повышению экологической и гигиенической безопасности АИТ в городах их широкого применения. Следует отметить, что в Архангельской области, Республике Коми и некоторых других регионах действуют программы по переводу угольных котельных на древесное топливо, налажен выпуск соответствующего котельного оборудования[3]. Расширение практики совершенствования АИТ с учётом рисков для здоровья представляется важным направлением действий для многих городов с угольной энергетикой и большой долей домохозяйств, использующих локальные генерирующие источники.

[3] Производство пеллет в России начало опять расти. URL: https://www.infobio.ru/news/5539.html

Ограничения исследования. Исследования выполнены на одной модели печи при ограниченном числе повторностей. Неопределённости при оценке риска связаны с использованием для расчёта экспозиции ограниченных экспериментальных данных, применением при расчёте канцерогенного риска величин слоуп-факторов, установленных не для конкретных веществ, а для группы ПАУ.

Заключение

Проведённое исследование показало, что сжигание всех изученных видов твёрдого топлива (дрова, пеллеты, бурый и каменный уголь) сопровождается поступлением в атмосферный воздух спектра ПАУ, в том числе нафталина, 2-метилнафталина, антрацена, 9-метилантрацена, пирена, бенз(а)пирена. Подтверждена и количественно определена выраженная зависимость качественного и количественного состава ПАУ от вида топлива и стадии горения. Самые высокие концентрации высокомолекулярных ПАУ выявлены при сжигании угольного топлива. Наибольшие концентрации в выбросах имели пирен (0,001132 ± 0,000204 мг/м^3) и бенз(а)пирен (0,000897 ± 0,000188 мг/м^3) в процессе разжигания каменного угля. В атмосферном воздухе при сжигании древесного топлива преимущественно обнаруживались низкомолекулярные ПАУ – нафталин и 2-метилнафталин. Установлено, что этап розжига всех видов топлива характеризуется в 2–18 раз более высокими концентрациями бенз(а)пирена по сравнению со стационарным горением, что указывает на актуальность плотного мониторинга санитарно-гигиенической ситуации в период старта отопительного сезона работы АИТ.

Сравнительное моделирование рассеивания выбросов показало, что в условиях плотной частной малоэтажной застройки АИТ могут быть источниками загрязнения воздуха при работе и на древесном, и на угольном топливе. Зоны загрязнения в результате работы печей на угле при прочих равных условиях в несколько раз превышают таковые при работе АИТ на дровах или пеллетах.

Идентифицированное присутствие в выбросах метилированных производных ПАУ (2-метилнафталин и 9-метилантрацен) показывает, что данные примеси необходимо учитывать при гигиенической оценке загрязнения атмосферного воздуха. Отсутствие установленных нормативов для этих соединений обусловливает важность их токсикологической оценки и разработки ПДК.

Полученные результаты подтверждают необходимость регулярного контроля содержания ПАУ в выбросах при использовании твёрдого топлива, особенно угольного, а также разработки мероприятий, направленных на снижение выбросов токсичных ПАУ, с учётом стадии розжига, минимизации риска негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

Разработку и оценку эффективности региональных программ по снижению загрязнения атмосферного воздуха в населённых пунктах с развитым твердотопливным отоплением целесообразно вести с учётом расчётных данных о рисках для здоровья.

Перспективное направление дальнейших исследований – верификация расчётных данных инструментальными исследованиями качества воздуха в зонах влияния АИТ с определением структуры и количественных параметров отдельных ПАУ. Важным вектором является повышение качества исходной информации о токсикологических свойствах ПАУ для корректной оценки риска.

Литература (п.п. 4–10, 13–20 см. References)

1. Иваницкий М.С. Массовые выбросы полициклических ароматических углеводородов при сжигании топлива в котлах ТЭС. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2023; 25(2): 3–11. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11 https://elibrary.ru/ufapui

2. Зайцева Н.В., Клейн С.В., Горяев Д.В., Андришунас А.М., Балашов С.Ю., Загороднов С.Ю. Эффективность комплексных планов воздухоохранных мероприятий на объектах теплоэнергетики по критериям митигации рисков и вреда здоровью населения. *Анализ риска здоровью.* 2023; 2: 42–57. https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.2.04 https://elibrary.ru/ultzyr

3. Волкодаева М.В., Карелин А.О., Ломтев А.Ю., Канчан Я.С., Левкин А.В., Тимин С.Д. Учёт выбросов загрязняющих веществ от автономных источников теплоснабжения индивидуальных жилых домов при проведении сводных расчётов загрязнения атмосферного воздуха для населённых пунктов. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(2): 141–7. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-141-147 https://elibrary.ru/nybmxl
11. Белых Л.И., Халтурина Д.А., Мухамедьянова Р.Р. Мониторинг выбросов бенз(а)пирена в атмосферу при открытом и печном горении различных материалов. *XXI век. Техносферная безопасность*. 2017; 2(1): 23–37. https://elibrary.ru/yhfjbd
12. Хошимханова М.А., Камолов Т.О., Хамдамов Д.Х., Нурханов Ф.А., Эралиев А.А., Муносибов Ш. Современное состояние экологических проблем, образующихся при сжигании угольного топлива. *Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences*. 2022; 2(11): 664–70.
21. Сафронов И.В., Драчкова И.А., Петрусева И.О., Ходырева С.Н., Добриков М.И., Иванова Т.М. и др. Реагенты для модификации белково-нуклеиновых комплексов. III. Сайт-специфическая фотомодификация элонгирующего комплекса ДНК-полимеразы β арилазидными производными праймеров, сенсибилизированная флуоресцентными γ-амидами атр. *Биоорганическая химия*. 2001; 27(5): 372–82. https://elibrary.ru/oxrsvv
22. Онищенко Г.Г., Зайцева Н.В., Попова А.Ю. Май И. В., Устинова О. Ю., Трусов П. и др. *Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: монография. В 2 томах*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва – Пермь: Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения; 2024. 580 с. https://elibrary.ru/vofelz
23. Заворуева Е.Н. Динамика концентрации взвешенных частиц и бенз(а)пирена в атмосфере города Красноярска. В кн.: *Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции*. 2023: 492–6. https://elibrary.ru/kmnfpx
24. Глебова Л.А., Коськина Е.В., Бачина А.В. Оценка риска для здоровья населения промышленных центров Кузбасса в связи с загрязнением атмосферного воздуха. *Анализ риска здоровью*. 2025; (4): 38–46. https://doi.org/10.21668/health.risk/2025.4.04 https://elibrary.ru/nhfwup
25. Растокина Т.Н., Пешкова А.А., Унгуряну Т.Н. Качество атмосферного воздуха и риск развития болезней системы кровообращения у населения крупного города Европейского Севера. *Анализ риска здоровью*. 2024; (3): 4–12. https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.3.01 https://elibrary.ru/fhijaa

References

1. Ivanitsky M.S. Mass emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons during fuel combustion in thermal power plant boilers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2023; 25(2): 3–11. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11 https://elibrary.ru/ufapui (in Russian)
2. Zaitseva N.V., Klein S.V., Goryaev D.V., Andrisunas A.M., Balashov S.Yu., Zagorodnov S.Yu. Effectiveness of comprehensive air protection plans at heat power facilities based on criteria for mitigating risks and harm to public health. *Health Risk Analysis*. 2023; 2: 42–57. https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.2.04 https://elibrary.ru/josllm (in Russian)
3. Volkodaeva M.V., Karelin A.O., Lomtev A.Yu., Kanchan Ya.S., Levkin A.V., Timin S.D. Accounting for pollutant emissions from autonomous heat sources of individual residential buildings when conducting consolidated calculations of air pollution for populated areas. *Gigiena I Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(2): 141–7. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-141-147 https://elibrary.ru/nybmxl (in Russian)
4. Han Y., Chen Y., Feng Y., Song W., Cao F., Zhang Y., et al. Different formation mechanisms of PAH during wood and coal combustion under different temperatures. *Atmos. Environ*. 2020; 222: 117084. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117084 https://elibrary.ru/gtrabt
5. Zhang Y., Shen Z., Sun J., Zhang L., Zhang B., Zou H., et al. Parent, alkylated, oxygenated and nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons in PM2.5 emitted from residential biomass burning and coal combustion: a novel database of 14 heating scenarios. *Environ. Pollut*. 2021; 268: 115881. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115881 https://elibrary.ru/yfbmpa
6. Sekar M., Praveenkumar T.R. Critical review on the formations and exposure of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the conventional hydrocarbon-based fuels: prevention and control strategies. *Chemosphere*. 2024; 350: 141005. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141005 https://elibrary.ru/bqrgrs
7. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). Atlanta (GA): U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 1995. 487 p.
8. Bukowska B., Mokra K., Michałowicz J. Benzo[a]pyrene—environmental occurrence, human exposure, and mechanisms of toxicity. *Int. J. Mol. Sci*. 2022; 23(11): 6348. https://doi.org/10.3390/ijms23116348 https://elibrary.ru/xzpyat
9. Feng Y., Li Z., Li W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): environmental persistence and human health risks. *Nat. Prod. Commun*. 2025; 20(1): 1934578X241311451. https://doi.org/10.1177/1934578X241311451
10. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. IARC; 1988. 99 p.
11. Belykh L.I., Khalturina D.A., Mukhamedyanova R.R. Monitoring of benzo(a) pyrene emissions into the atmosphere during open and furnace combustion of various materials. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'*. 2017; 2(1): 23–37. https://elibrary.ru/yhfjbd (in Russian)
12. Khoshimkhanova M.A., Kamolov T.O., Khamdamov D.Kh., Nurkhanov F.A., Eraliev A.A., Munosibov Sh. Current state of environmental problems arising from the combustion of coal fuel. *Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences*. 2022; 2(11): 664–70. (in Russian)
13. Feng Y., Wang J., Sun J., Cui Z., Chen Q., Mao K., et al. Emissions of nitrated and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons bound to coarse particles from solid fuel combustion. *Chemosphere*. 2024; 348: 140744. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140744 https://elibrary.ru/blmepo
14. Hayakawa K., Tang N., Toriba A., Nagato E.G. Calculating sources of combustion-derived particulates using 1-nitropyrene and pyrene as markers. *Environ. Pollut*. 2020; 265: 114730. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114730 https://elibrary.ru/hhfeti
15. Li S., Liu X., Wang J., Li J., Wang Z., Ma S., et al. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from domestic heating and cooking combustion of different fuel types for elders in rural China. *Environ. Pollut*. 2024; 357: 124416. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124416 https://elibrary.ru/rxqkbd
16. Skrbic B., Marinkovic V., Spaic S., Milanko V., Branovacki S. Profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons in smoke from combustion and thermal decomposition of poplar wood pellets and sawdust. *Microchem. J*. 2018; 139: 9–17. https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.02.007
17. Odekanle E.L., Taiwo R.O., Sonibare J.A., Akinyemi A.O., Adekanye T.A., Fakinle B.S. Estimation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emission and its toxicity potentials from the combustion of selected fuelwoods. *Case Stud. Chem. Environ. Eng*. 2024; 10: 100840. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100840 https://elibrary.ru/afoenf
18. Yang X., Liu S., Xu Y., Liu Y., Chen L., Tang N., et al. Emission factors of polycyclic and nitro-polycyclic aromatic hydrocarbons from residential combustion of coal and crop residue pellets. *Environ. Pollut*. 2017; 231: 1265–73. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.087 https://elibrary.ru/yjsezr
19. Li X., Wang Z., Guo T. Emission of PM2.5-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass and coal combustion in China. *Atmosphere*. 2021; 12(9): 1129. https://doi.org/10.3390/atmos12091129 https://elibrary.ru/muavbq
20. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US). *Toxicological Profile for Naphthalene, 1-Methylnaphthalene, and 2-Methylnaphthalene. Chapter 2. Health Effects*. Atlanta (GA); 2025.
21. Safronov I.V., Drachkova I.A., Petruseva I.O., Khodyreva S.N., Dobrikov M.I., Ivanova T.M., et al. Reagents for modifying protein-nucleic acid complexes. III. Site-specific photomodification of the elongation complex of DNA polymerase β by aryl azide derivatives of primers, sensitized by fluorescent γ-amides of atr. *Bioorganicheskaya khimiya*. 2001; 27(5): 372–82. https://elibrary.ru/oxrsvv (in Russian)
22. Onishchenko G.G., Zaitseva N.V., Popova A.Yu., Mai I.V., Ustinova O.Yu., Trusov P.V., et al. *Health Risk Analysis in the Strategy of State Socio-Economic Development: Monograph. In 2 Volumes [Analiz riska zdorov'yu v strategii gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya: monografiya. V 2 tomakh]*. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow – Perm: Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Population Health Risk Management; 2024. 580 p. https://elibrary.ru/vofelz (in Russian)
23. Zavorueva E.N. Dynamics of the concentration of suspended particles and benzo(a)pyrene in the atmosphere of the city of Krasnoyarsk. In: *Current Issues in Construction: A Look into the Future [Aktual'nye voprosy stroitel'stva: vzglyad v budushchee]*. 2023: 492–6. https://elibrary.ru/kmnfpx (in Russian)
24. Glebova L.A., Koskina E.V., Bachina A.V. Assessment of the health risk for the population of Kuzbass industrial centers due to ambient air pollution. *Health Risk Analysis*. 2025; (4): 38–46. https://doi.org/10.21668/health.risk/2025.4.04.eng https://elibrary.ru/fisdxs
25. Rastokina T.N., Peshkova A.A., Unguryanu T.N. Ambient air quality and risk of circulatory diseases for population of a large city in the European North of Russia. *Health Risk Analysis*. 2024; (3): 4–12. https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.3.01.eng https://elibrary.ru/eqrmhe

Сведения об авторах

Зайцева Нина Владимировна, доктор мед. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: znv@fcrisk.ru

Май Ирина Владиславовна, доктор биол. наук, профессор, гл. науч. сотр.– советник директора ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: may@fcrisk.ru

Клейн Светлана Владиславовна, доктор мед. наук, доцент, профессор РАН, зам. директора по научной работе ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: kleyn@fcrisk.ru

Нурисламова Татьяна Валентиновна, доктор биол. наук, доцент, зав. отд. химико-аналитических методов исследования ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: nurtat@fcrisk.ru

Original article

Старчикова Мария Олеговна, науч. сотр. лаб. методов жидкостной хроматографии ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: starchikova@fcrisk.ru

Загороднов Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. – руководитель экспертной группы отд. системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: zagorodnov@fcrisk.ru

Балашов Станислав Юрьевич, ст. науч. сотр. – руководитель ГИС-группы ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: stas@fcrisk.ru

About the authors

Nina V. Zaitseva, DSc (Medicine), professor, academician of the RAS, scientific director, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0003-2356-1145 E-mail: znv@fcrisk.ru

Irina V. May, DSc (Biology), professor, principal researcher-advisor to the Director, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0003-0976-7016 E-mail: may@fcrisk.ru

Svetlana V. Kleyn, DSc (Medicine), associate professor, professor of the RAS, deputy director for Research, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-2534-5713 E-mail: kleyn@fcrisk.ru

Tatyana V. Nurislamova, DSc (Biology), head, Department for Chemical and Analytical Research Techniques, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-2344-3037 E-mail: nurtat@fcrisk.ru

Maria O. Starchikova, Department for Chemical and Analytical Research Techniques, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-3259-1509 E-mail: starchikova@fcrisk.ru

Sergey Yu. Zagorodnov, PhD (Engineering), senior researcher, head, Expert Group of the Department of Systemic Methods of Sanitary and Hygienic Analysis and Monitoring, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-6357-1949 E-mail: zagorodnov@fcrisk.ru

Stanislav Yu. Balashov, senior researcher, head, GIS Group of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, https://orcid.org/0000-0002-6923-0539 E-mail: stas@fcrisk.ru

https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-948-955

К статье Н.В. Зайцевой и соавт.

To the article by Nina V. Zaitseva et al.

Древесные пеллеты | *Wood pellets*

Каменный уголь | *Coal*

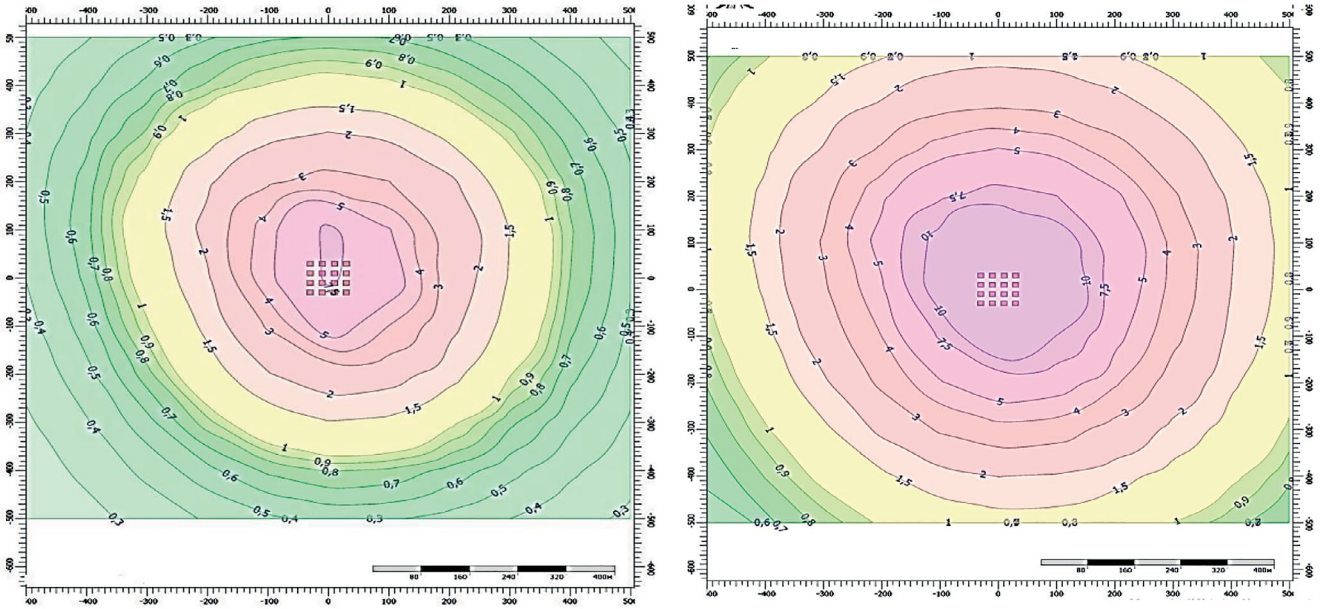

Рис. 1. Поля среднесуточных концентраций бенз(а)пирена, формируемых автономными источниками теплоснабжения на стадии розжига.

Fig. 1. Daily average ground-level benzo[a]pyrene concentration fields generated by AHSs during the ignition stage.

Древесные пеллеты | *Wood pellets*

Каменный уголь | *Coal*

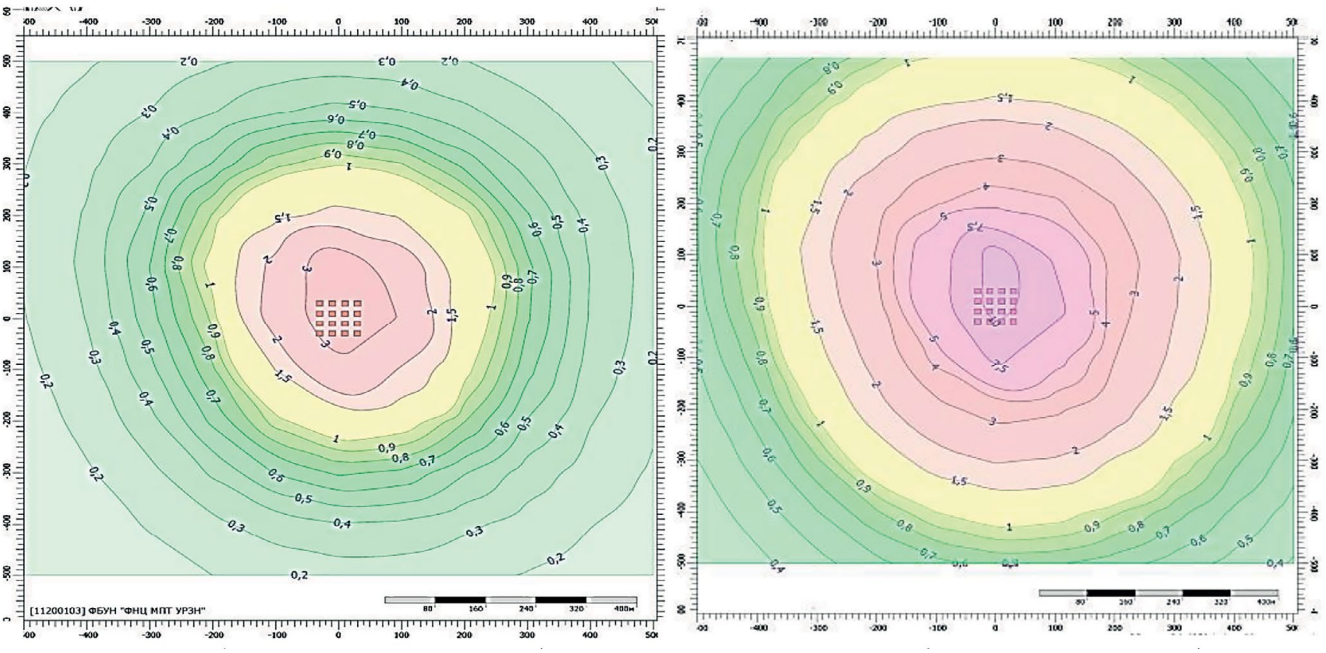

Рис. 2. Поля среднесуточных концентраций бенз(а)пирена, формируемых автономными источниками теплоснабжения на стадии стационарного горения.

Fig. 2. Daily average ground-level benzo[a]pyrene concentration fields generated by AHSs during the steady-state combustion stage.