

Шаяхметов С.Ф.¹, Рукавишников В.С.¹, Маринайте И.И.², Меринов А.В.¹

Содержание полиаренов в воздухе рабочей зоны производства алюминия

¹ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований, 665827, Ангарск, Россия;²ФГБУН «Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук», 664033, Иркутск, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Загрязнение воздушной среды алюминиевого производства высокотоксичными полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) обуславливает необходимость идентификации и оценки опасности содержания всех приоритетных ПАУ.

Материалы и методы. Проанализировано содержание индивидуальных ПАУ в воздухе электролизных цехов с разной технологией получения алюминия с помощью газового хроматографа с масс-селективным детектором. Рассчитаны гигиенические показатели, суммарная токсичность и степень опасности ПАУ.

Результаты. В воздухе рабочих мест электролизных цехов обнаружены 13 приоритетных ПАУ с разной канцерогенной активностью. Наиболее высокие концентрации индивидуальных и суммы всех ПАУ наблюдались в рабочей зоне анодчиков в цехе с традиционной технологией и у крановщиков в цехе с новой технологией получения алюминия. В составе ПАУ преобладали опасные высокомолекулярные пяти-, шестикольцевые структуры соединений ПАУ. Содержание бенз(а)пирена (Б(а)П) в воздухе превышало ПДК в 1,1–5,8 раза. Суммарная токсичность обнаруженных ПАУ, выраженная через эквивалентное количество Б(а)П, была выше ПДК Б(а)П и 1,7–7,3 раза. Вклад воздействия других ПАУ в суммарную токсичность, выраженную через Б(а)П-эквиваленты, составил 17,6–80,3%.

Ограничения исследования. Исследования содержания ПАУ проводили в рабочей зоне трудящихся основных профессий, где был возможен отбор проб воздуха по требованиям безопасности.

Заключение. Для эффективного мониторинга и риск-ориентированного контроля опасности загрязнения ПАУ воздуха рабочей зоны алюминиевого производства рекомендовано определение содержания полного спектра ПАУ с высокими концентрациями и коэффициентами эквивалентной токсичности.

Ключевые слова: производство алюминия; полициклические ароматические углеводороды; загрязнение; воздух рабочей зоны

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Шаяхметов С.Ф., Рукавишников В.С., Маринайте И.И., Меринов А.В. Содержание полиаренов в воздухе рабочей зоны производства алюминия. Гигиена и санитария. 2025; 104(4): 492–496. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-492-496> <https://elibrary.ru/nlqvwd>

Для корреспонденции: Шаяхметов Салим Файзыевич, e-mail: salimf53@mail.ru

Участие авторов: Шаяхметов С.Ф. — концепция и дизайн исследования, написание текста; Рукавишников В.С. — концепция исследования, редактирование; Маринайте И.И. — анализ проб, раздел методы исследования, обсуждение результатов; Меринов А.В. — сбор и обработка данных, таблица, иллюстрация, составление списка литературы. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

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

Финансирование. Работа выполнена в рамках средств, выделяемых на выполнение государственного задания ФГБНУ ВСИМЭИ и ФГБУН ЛИИ СО РАН.

Поступила: 27.12.2024 / Поступила после доработки: 21.02.2025 / Принята к печати: 26.03.2025 / Опубликовано: 30.04.2025

Salim F. Shayakhmetov¹, Victor S. Rukavishnikov¹, Irina I. Marinaite², Alexey V. Merinov¹ Content of polyarenes in the air of the working area at aluminum production

¹East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation;²Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Pollution of the air environment of aluminum production with highly toxic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) necessitates the identification and assessment of the hazard of the entire spectrum of priority PAHs.

Materials and methods. The content of specific PAHs in the air of electrolysis workshops with different aluminum production technologies was analyzed using a gas chromatograph with a mass-selective detector. Hygienic indices, total toxicity, and hazard PAHs level were calculated.

Results. The content of 13 priority PAHs with different carcinogenic activity was detected in the air of workplaces in electrolysis workshops. The highest concentrations of specific and total PAHs were observed in the working area of anode operators in the workshop with traditional technology and among crane operators in the workshop with new aluminum production technology. The PAHs composition was dominated by hazardous high-molecular 5–6 ring structures of PAH compounds. The benzo(a)pyrene (B(a)P) content in the air exceeded the MAC by 1.1–5.8 times. The total toxicity of the detected PAHs, expressed through the equivalent amount of B(a)P, was higher than the MAC of B(a)P by 1.7–7.3 times. The contribution of other PAHs to the total toxicity, expressed through B(a)P equivalents, was 17.6–80.3%.

Limitations. The studies of PAH content were conducted in the working area of the main occupations, in which air sampling was possible according to safety requirements.

Conclusion. For effective monitoring and risk-oriented control of the danger of PAH pollution of the air at the working area of aluminum production, it is recommended to detect the content of the full spectrum of PAHs with high concentrations and equivalent toxicity coefficients.

Keywords: aluminum production; polycyclic aromatic hydrocarbons; pollution; workplace air

Compliance with ethical standards. The study requires no the submission of a biomedical ethics committee opinion or other documents.

For citation: Shayakhmetov S.F., Rukavishnikov V.S., Marinaite I.I., Merinov A.V. Content of polyarenes in the air at the working area during aluminum production. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(4): 492–496. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-492-496> <https://elibrary.ru/nlqvwd> (In Russ.)

For correspondence: Salim F. Shayakhmetov, e-mail: salimf53@mail.ru

Contribution: Shayakhmetov S.F. — concept and design of the study, writing text; Rukavishnikov V.S. — concept of the study, editing; Marinaite I.I. — sample analysis, research methods section, discussion of the results; Merinov A.V. — data processing, information search, tables, figures, bibliography. 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 the absence of obvious and potential conflicts of interest in connection with the publication of this article.

Acknowledgment. The work was performed within the framework of funds allocated for the implementation of the state task for East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research and Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Received: December 12, 2024 / Revised: February 21, 2025 / Accepted: March 26, 2025 / Published: April 30, 2025

Введение

Экономическое развитие страны тесно связано с техническим прогрессом, внедрением новых технологий, что может приводить к изменению условий труда. Одним из наиболее опасных химических веществ, образующихся на предприятиях топливно-энергетической, нефтехимической, металлургической и, в первую очередь, алюминиевой промышленности, являются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, полиарены) [1–3]. ПАУ представляют собой большую группу органических соединений бензольного ряда, в структуре которых присутствуют от двух и более конденсированных бензольных колец [1]. Полиарены в зависимости от строения молекул условно разделяют на лёгкие (летучие) — низкомолекулярные двух-, трёхкольцевые и среднемолекулярные четырёхкольцевые структуры, а также тяжёлые (устойчивые) — высокомолекулярные соединения с пятью-шестью бензольными кольцами [4, 5].

Многие ПАУ обладают высокой канцерогенной, мутагенной и тератогенной активностью, способны накапливаться в организме и наносить большой вред здоровью человека [2, 6, 7]. Из-за высокой опасности ПАУ включены Стокгольмской конференцией (2001) в ряд стойких органических загрязнителей, подлежащих обязательному контролю и мониторингу в различных средах. Из перечня приоритетных ПАУ (16 наименований) в разных зарубежных странах контролируют от 7 до 16 соединений [3, 8, 9]. В России мониторинг ПАУ на опасных производствах обычно ограничивается определением наиболее токсичного бенз(а)пирена, что не позволяет адекватно оценивать уровень и опасность загрязнения воздуха всеми приоритетными соединениями. ПАУ образуются при выплавке алюминия в электролизёрах в результате пиролиза используемой каменноугольной анодной массы. На работников алюминиевой промышленности обычно воздействует смесь соединений ПАУ, что может приводить к повышению химической нагрузки на организм. При этом данные о содержании разных компонентов ПАУ в воздухе рабочей зоны производства алюминия являются неполными [10]. Многие исследования посвящены определению ПАУ в выбросах алюминиевых заводов и природных средах [11–14], поэтому возникает необходимость изучения состава и содержания соединений ПАУ в воздухе рабочих мест при разных технологиях получения алюминия.

Цель исследования — идентификация и количественно-качественная оценка содержания полного спектра приоритетных ПАУ в воздухе рабочей зоны алюминиевого производства для минимизации рисков их воздействия на работников.

Материалы и методы

Гигиенические исследования проводили в электролизных цехах крупного алюминиевого завода Восточной Сибири, оборудованных электролизёрами, работающими по традиционной технологии с самообжигающимися анодами (ТСА), и современной — с обожжёнными анодами (ТОА) с повышенной герметизацией укрытий и автоматизацией процесса.

Исследования состава и содержания 16 приоритетных соединений ПАУ в воздухе рабочей зоны выполняли в местах пребывания основных работников с учётом технологических операций, при которых был возможен по требованиям безопасности отбор проб воздуха. В электролизных цехах основные рабочие профессии — электролизники, анодчики и машинисты мостовых кранов. Электролизники выполняли операции по обслуживанию электролизёров (подача сырья, пробивка корки электролита), анодчики осуществляли загрузку анодной массы, перетяжку анодных рам и замену анодов, крановщики производили грузоподъёмные операции. Пробы воздуха для химического анализа отбирали однократно в разных электролизных цехах в процессе выполнения основных технологических операций. Отбор выполняли портативным пробоотборником на фильтры из кварцевого

микрофильтра с последующей экстракцией ПАУ*. Техническую поддержку при отборе проб и расчёте концентраций ПАУ выполняла научный сотрудник института канд. биол. наук Л.Г. Лисецкая.

Идентификация и количественное определение содержания ПАУ в экстрактах проб выполнены с помощью газового хроматографа с масс-селективным детектором в центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ» Лимнологического института СО РАН (Иркутск). Концентрации индивидуальных ПАУ измеряли методом внутренних стандартов [15]. Диапазоны определения ПАУ на фильтрах по используемой методике составили от 0,002 до 3000 нг/м³.

Полученные данные обрабатывали с использованием санитарно-гигиенических показателей и сравнивали с имеющимися ПДК. При отсутствии ПДК для многих ПАУ их негативное воздействие определяли коэффициентами эквивалентной токсичности ТЕФ, показывающими токсичность полиаренов по сравнению с бенз(а)пиреном. Оценку токсического риска (опасности), создаваемого соединениями полиаренов, проводили путём суммирования концентраций, умноженных на коэффициенты ТЕФ, всех изученных ПАУ в сравнении с ПДК бенз(а)пирена [16, 17]. Коэффициенты ТЕФ выявленных 13 приоритетных ПАУ составляли: нафталин (Наф) — 0,001, фенантрен (Фен) — 0,001, антрацен (Ант) — 0,01, флуорен (Флу) — 0,001, пирен (Пир) — 0,001, бенз(а)антрацен (БаА) — 0,1, хризен (Хр) — 0,01, бенз(б)флуорантен (Б(б)Ф) — 0,1, бенз(к)флуорантен (Б(к)Ф) — 0,1, бенз(а)пирен (Б(а)П) — 1, дибенз(а, h)антрацен (ДБА) — 1, индено(1,2,3-с, d)пирен (ИндП) — 0,1, бензо(г, h, i)пирилен (Б(г, h, i)П) — 0,01 [18].

Статистическую обработку результатов исследований осуществляли в программе Microsoft Excel.

Результаты

В воздухе рабочей зоны исследуемых электролизных цехов алюминиевого производства было обнаружено 13 ПАУ с разной канцерогенной активностью. Состав и содержание индивидуальных ПАУ на рабочих местах основных профессий в цехах с ТСА и ТОА представлены в таблице.

В цехе, использующем ТСА, суммарные концентрации всех обнаруженных ПАУ на рабочих местах находились в пределах 1240,1–3199,1 нг/м³, что в 2,7–26,9 раза выше, чем в цехе с ТОА (366,8–1161,3 нг/м³). Суммарное содержание лёгких двух-, трёх-, четырёхкольцевых структур в рабочей зоне цеха ТСА составляло 45,1–2351,2 нг/м³ с преобладанием Флу, БаА, Пир и Хр, а в цехе с ТОА 49,2237,3 нг/м³, среди которых лидировали Флу, Пир и БаА преимущественно у крановщика. Суммарное содержание тяжёлых пяти-, шестикольцевых ПАУ в воздухе рабочих мест было в 3,1–70 раз выше, чем лёгких двух-, трёх-, четырёхкольцевых ПАУ, особенно в цехе с ТСА.

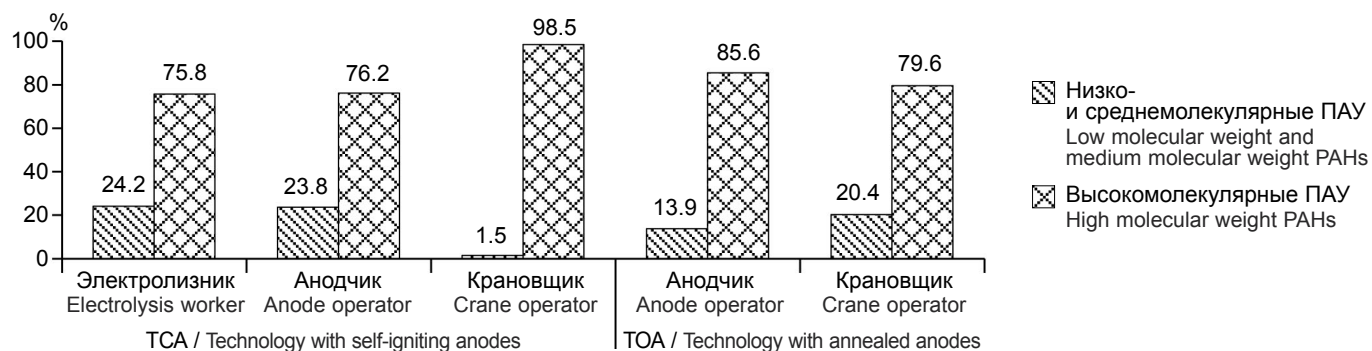
Наиболее высокие концентрации индивидуальных ПАУ отмечены в цехе с ТСА на рабочем месте анодчиков, а в цехе с ТОА — в рабочей зоне крановщиков. Уровни содержания контролируемого Б(а)П в воздушной среде цеха с ТСА превышали ПДК (150 нг/м³) в 1,4–5,8 раза, а в цехе с ТОА соответствовали 0,7–1,1 ПДК.

Процентные соотношения между лёгкими (низко- и среднемолекулярными) и устойчивыми тяжёлыми (высокомолекулярными) группами соединений ПАУ в составе воздуха рабочей зоны исследуемых электролизных цехов значительно различались (см. рисунок). Среди определённых в воздухе компонентов смеси ПАУ отмечено доминирование высокомолекулярных пяти-, шестикольцевых полиаренов. Их содержание в цехе с ТСА составляло 75,8–98,5%, а в цехе с ТОА — 79,6–86,6% от суммы всех ПАУ.

* Методика выполнения измерений массовой концентрации полиароматических углеводородов в воздухе рабочей зоны и промышленных выбросов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии МВИ–52–99. ФР. 1.31.2004.1264. СПб.: Мониторинг; 1998.

Содержание полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в воздухе рабочей зоны электролизных цехов с ТСА и ТОА, нг/м³
Content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the air of the working area of electrolysis workshops with technology with self-igniting anodes and technology with annealed anodes, ng/m³

ПАУ (число бензольных колец) PAH (number of benzene rings)	ТСА Technology with self-igniting anodes			ТОА Technology with annealed anodes	
	Электролизник Electrolyzer	Анодчик Anode operator	Крановщик Crane operator	Анодчик Anode operator	Крановщик Crane operator
Нафталин / Naphthalene (2)	5.3	4.2	1.6	3.2	3.2
Фенантрен / Phenanthrene (3)	38.0	22.0	13.0	15.0	13.0
Антрацен / Anthracene (3)	4.8	15.0	1.0	5.2	5.1
Флуорен / Fluorene (3)	67.0	180.0	8.7	7.5	58.0
Пирен / Pyrene (4)	49.0	160.0	6.9	5.0	47.0
Бенз(а)антрацен / Benzo(a)anthracene (4)	64.0	790.0	5.7	5.4	100.0
Хризен / Chrysene (4)	72.0	1180.0	8.2	7.9	11.0
Σ₂₋₄ ПАУ / PAH	300.1	2351.2	45.1	49.2	237.3
Бенз(б)флуорантен / Benzo(b)fluorentene (5)	200.0	2800.0	450.0	30.0	290.0
Бенз(к)флуорантен / Benzo(k)fluoranthene (5)	180.0	1460.0	410.0	130.0	130.0
Бенз(а)пирен / Benzo(a)pyrene (5)	150.0	210.0	870.0	110.0	170.0
Дибенз(а, h)антрацен / Dibenzo(a, h)anthracene (5)	160.0	180.0	54.0	4.6	23.0
Индено(1, 2, 3-с, d)пирен / Indeno(1, 2, 3-с, d)pirene (6)	110.0	1460.0	870.0	20.0	171.0
Бензо(г, h, i)пирилен / Benzo(g, h, i)perilene (6)	140.0	1400.0	500.0	23.0	140.0
Σ₅₋₆ ПАУ / PAH	940.0	7510.0	3154.0	317.6	924.0
Σ₂₋₆ ПАУ / PAH	1240.1	9861.2	3199.1	366.8	1161.3



Процентное соотношение содержания разных групп соединений ПАУ в воздухе рабочих мест при ТСА и ТОА.

Percentage ratio of the content of different groups of PAH compounds in the air at workplaces under technology with self-igniting anodes and technology with annealed anodes.

Обсуждение

До настоящего времени не решены задачи идентификации и оценки опасности всего спектра смесей соединений ПАУ, присутствующих в воздухе рабочей зоны алюминиевого производства. Ранее в промышленных выбросах алюминиевых заводов исследователями было выделено 12 структур ПАУ, состав которых менялся в зависимости от технологических особенностей электролиза алюминия и применения систем пылегазоулавливания [11, 19].

Проведённые нами исследования показали, что в воздушной среде рабочих мест электролизных цехов алюминиевого производства были идентифицированы 13 ПАУ: три низкомолекулярных, четыре среднемолекулярных и шесть высокомолекулярных соединений из списка приоритетных загрязнителей. Самые высокие концентрации индивидуальных соединений и суммы всех ПАУ наблюдались в цехе, использующем ТСА, особенно в рабочей зоне анодчиков. Более низкие значения ПАУ (в 2–93 раза) зарегистрированы в

цехе с ТОА. При этом повышенное содержание 9 из 13 ПАУ отмечено на рабочем месте крановщиков электромостовых кранов, расположенном в верхней зоне цехов, куда поступают восходящие потоки пылегазовых смесей преимущественно лёгких низкомолекулярных соединений ПАУ.

Известно, что опасность ПАУ для здоровья человека в значительной степени зависит от структуры их молекул. Низкомолекулярные ПАУ обладают высокой токсичностью, в то время как средне- и высокомолекулярные ПАУ характеризуются выраженными канцерогенными, мутагенными и тератогенными свойствами [3, 8, 20]. Анализ расчётов соотношений разных структур ПАУ в рабочей зоне исследуемых цехов выявил преобладание пяти-, шестиядерных соединений, доля которых варьировала от 75,8 до 98,5%. В цехах с ТСА на группу высокомолекулярных ПАУ в воздухе рабочих мест анодчиков и крановщиков приходилось 76,2 и 98,5%, а в цехах с ТОА — 86,6 и 79,6% соответственно. Подобное преобладание высокомолекулярных ПАУ отмечено также в работах [11, 19] при исследовании содержания этих веществ

в удаляемых из электролизёров газах. Авторы указывали, что качественный состав и уровни содержания образующихся ПАУ преимущественно зависят от типа используемых анодов, температуры технологического процесса и источника выделения.

Максимальные концентрации на рабочих местах имели такие индивидуальные ПАУ, как Б(б)Ф, Б(к)Ф, Б(к)П, Б(г, h, i)П и ИндП. Содержание Б(а)П в рабочей зоне электролизников (проходы между электролизёрами) в цехах с ТСА находилось в пределах ПДК (150 нг/м³), на рабочих местах анодчика и крановщика превышало ПДК в 1,4 и 5,8 раза соответственно, а в цехах с ТОА составляло 0,7 и 1,1 ПДК соответственно. Высокое содержание пяти-, шестикольцевых соединений ПАУ в воздухе рабочей зоны цехов было обусловлено термохимическими процессами спекания каменноугольных анодов и активной эмиссией данных структур полиаренов при электролизе алюминия.

Для эффективного мониторинга и риск-ориентированного контроля содержания в воздухе ПАУ важна оценка опасности воздействия всех соединений, несмотря на отсутствие ПДК для многих ПАУ. Считается, что даже при следовых концентрациях и особенно при совместном воздействии ПАУ могут представлять опасность для здоровья человека [3, 21–23]. Степень опасности всех изученных ПАУ на основных рабочих местах определяли путём суммирования концентраций, умноженных на коэффициенты ТЕФ, и последующего сравнения суммы с ПДК для Б(а)П.

Проведённые расчёты показали, что в цехе с ТСА суммарная токсичность обнаруженных ПАУ, выраженная через эквивалентное количество Б(а)П, составила в рабочей зоне электролизника 367,7 нг/м³, анодчика – 1067,3 нг/м³, крановщика – 1102,7 нг/м³ и превысила ПДК для Б(а)П в 2,5; 7,1 и 7,3 раза соответственно. В цехе с ТОА суммарная токсичность соединений ПАУ на рабочем месте анодчика составила 0,89 ПДК Б(а)П (133,5 нг/м³), а у крановщика превысила ПДК в 1,8 раза (264 нг/м³). При этом вклад в суммарную опасность, обусловленную воздействием Б(а)П, в цехе с ТСА составлял у электролизника 40,8%, у анодчика – 19,7%, у крановщика – 78,9%. В цехе с ТОА вклад был 82,4% у анодчика и 64,3% у крановщика. Оставшийся вклад в суммарную токсичность приходился на другие соединения ПАУ (17,6–80,3%). Следовательно, при гигиеническом мониторинге ПАУ важно контролировать содержание не только Б(а)П, но и других низко-, средне- и высокомолекулярных ПАУ с высокими концентрациями и коэффициентами ТЕФ.

Поскольку работа была ограничена разовыми исследованиями, представляется важным её продолжение для изучения динамических показателей содержания приоритетных ПАУ в воздухе рабочей зоны и метаболитов в биосредах экспонированных работников.

Радикальное снижение образования и эмиссии ПАУ в воздушную среду электролизных цехов производства алюминия может быть обеспечено путём внедрения новых технологий электролиза алюминия – применением предварительно обожжённых, «сухих» и инертных анодов, современных герметичных электролизёров и систем пылегазоулавливания.

Ограничения исследования. Исследования содержания ПАУ проводили в рабочей зоне основных профессий, где был возможен отбор проб воздуха по требованиям безопасности.

Заключение

По результатам проведённого пилотного исследования были определены 13 приоритетных ПАУ в воздухе рабочих мест электролизных цехов с различной технологией производства алюминия. Наиболее высокие концентрации индивидуальных и суммы всех ПАУ установлены в цехе с ТСА в рабочей зоне анодчиков, в цехе с ТОА – у крановщиков. В групповом составе ПАУ отмечено преобладание опасных высокомолекулярных пяти-, шестиядерных структур (75,8–98,55%) вследствие высокотемпературных процессов спекания каменноугольных анодов и активной эмиссии полиаренов при электролизе алюминия.

Наиболее важной проблемой остаётся отсутствие гигиенических нормативов для 75% соединений из перечня 16 приоритетных ПАУ. Содержание контролируемого Б(а)П на рабочих местах превысило ПДК в 1,1–5,8 раза. При учёте вклада других ПАУ суммарная токсичность соединений, выраженных через Б(а)П-эквиваленты, была выше ПДК Б(а)П в 1,8–7,3 раза. Доля вклада других индивидуальных соединений в суммарную степень опасности ПАУ составила от 17,6 до 80,3%. В связи с этим для эффективного мониторинга и риск-ориентированного контроля опасности загрязнения рабочей среды производства алюминия целесообразно определение содержания не только Б(а)П, но и других соединений ПАУ с высокими концентрациями и коэффициентами эквивалентной токсичности. Необходимо дальнейшее комплексное изучение содержания всех приоритетных ПАУ в воздухе рабочей зоны и выявление их гидроксильных метаболитов в моче у работников алюминиевого производства.

Литература

(п.п. 2, 4, 6–8, 10, 15, 16, 18, 20–23 см. References)

- Суздорф А.Р., Морозов С.В., Кузубова Л.И., Аншиц Н.Н., Аншиц А.Г. Полициклические ароматические углеводороды в окружающей среде: источники, профили и маршруты превращения. *Химия в интересах устойчивого развития*. 1994; 2(2–3): 511–40. <https://elibrary.ru/rlnmnn>
- Плотникова О.А., Мельников Г.В., Тихомирова Е.И. Полициклические ароматические углеводороды: характеристики, источники, нормирование, спектроскопические методы определения (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*. 2021; (4): 12–9. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-012-019> <https://elibrary.ru/gyuujm>
- Смола В.И. *ПАУ в окружающей среде: проблемы и решения. Часть 1*. М.: Полиграф сервис; 2013.
- Зыкова Г.В., Семёнов С.Ю., Смирнов В.Н. Определение метаболитов ПАУ в моче человека методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. *Вестник РУДН. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2014; (2): 128–31. <https://elibrary.ru/sdfgjn>
- Таранина О.А., Буркат В.С., Волкодаева М.В. Анализ содержания полиароматических углеводородов в газовой и твердой фазах в промышленных выбросах производства алюминия. *Металлург*. 2019; (11): 77–83. <https://elibrary.ru/tlfyig>
- Белых Л.И., Горшков А.Г., Рябчикова И.А., Серышев В.А., Маринайте И.И. Распределение и биологическая активность полициклических ароматических углеводородов в системе источник – снежный покров – почва – растение. *Сибирский экологический журнал*. 2004; 11(6): 793–802. <https://elibrary.ru/owhdip>
- Маринайте И.И., Горшков А.Г., Тараненко Е.Н., Чипанина Е.В., Ходжер Т.В. Распределение полициклических ароматических углеводородов в природных объектах на территории рассеивания выбросов Иркутского алюминиевого завода (г. Шелехов, Иркутская обл.). *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013; 21(2): 143–54. <https://elibrary.ru/szuobl>
- Журба О.М., Алексеенко А.Н., Шахметов С.Ф., Меринов А.В. Исследование полициклических ароматических и нефтяных углеводородов в снеговом покрове на урбанизированной территории. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(10): 1037–42. <https://elibrary.ru/opldzx>
- Маринайте И.И., Ходжер Т.В., Оболенкин В.А., Потемкин В.Л. Полициклические ароматические углеводороды и частицы РМ₁₀, РМ_{2.5}, РМ_{1.0} в атмосфере южного Прибайкалья. *Метеорология и гидрология*. 2023; (4): 22–32. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-4-22-32> <https://elibrary.ru/qkszzl>
- Минцис М.Я., Галевский Г.В. Эмиссия ПАУ из самообжигающихся анодов при производстве алюминия. В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XX Международной научно-практической конференции: в 2 частях*. Новокузнецк; 2017: 375–7. <https://elibrary.ru/zuwcob>

References

1. Suzdorf A.R., Morozov S.V., Kuzubova L.I., Anshits N.N., Anshits A.G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment: sources, profiles and transformation routes. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 1994; 2(2–3): 511–40. <https://elibrary.ru/rlnmn> (in Russian)
2. Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt. J. Pet.* 2016; 25(1): 107–23. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>
3. Plotnikova O.A., Melnikov G.V., Tikhomirova E.I. Polycyclic aromatic hydrocarbons: characteristics, sources, standardization, spectroscopic determination methods (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2021; (4): 12–9. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-012-019> <https://elibrary.ru/gyuujm> (in Russian)
4. Dat N.D., Chang M.B. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies. *Sci. Total. Environ.* 2017; 609: 682–93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.204>
5. Smola V.I. *PAHs in the Environment: Problems and solutions. Part 1 [PAU v okruzhayushchei srede: problemy i resheniya. Chast' I]*. Moscow: Poligraf servis; 2013. (in Russian)
6. Ifegwu O.C., Anyakora C. Polycyclic aromatic hydrocarbons: part I. Exposure. *Adv. Clin. Chem.* 2015; 72: 277–304. <https://doi.org/10.1016/bs.acc.2015.08.001>
7. Yang L., Zhang H., Zhang X., Xing W., Wang Y., Bai P., et al. Exposure to atmospheric particulate matter-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and their health effects: a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021; 18(4): 2177. <https://doi.org/10.3390/ijerph18042177>
8. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2010.
9. Zykova G.V., Semenov S.Y., Smirnov V.N. Determination of the PAH metabolites in human urine by high-performance liquid chromatography. *Vestnik RUDN. Seriya Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2014; (2): 128–31. <https://elibrary.ru/sdfgin> (in Russian)
10. Brzeznicki S., Przybylski H. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the working environment during aluminum production. *Med. Pr.* 1996; 47(1): 1–8.
11. Taranina O.A., Burkat V.S., Volkodava M.V. Analysis of content of polyaromatic hydrocarbons in gas and solid phases in industrial emissions of aluminum production. *Metallurg.* 2019; (11): 77–83. <https://elibrary.ru/tlfiyg> (in Russian)
12. Belykh L.I., Gorshkov A.G., Ryabchikova I.A., Seryshev V.A., Marinaite I.I. Distribution and biological activity of polycyclic aromatic hydrocarbons in the system: source – snow cover – soil – plant. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. 2004; 11(6): 793–802. <https://elibrary.ru/owhdp> (in Russian)
13. Marinaite I.I., Gorshkov A.G., Taranenko E.N., Chipanina E.V., Khodzher T.V. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in natural objects at the plume dispersal territory of the Irkutsk Aluminium plant (Shelekhov city, Irkutsk region). *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2013; 21(2): 143–54. <https://elibrary.ru/szuobl> (in Russian)
14. Zhurba O.M., Alekseyenko A.N., Shayakhmetov S.F., Merinov A.V. Study of polycyclic aromatic and petroleum hydrocarbons in a snow cover in a urbanized territory. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(10): 1037–42. <https://elibrary.ru/opldzx> (in Russian)
15. Marinaite I., Penner I., Molozhnikova E., Shikhovtsev M., Khodzher T. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of the southern Baikal region (Russia): sources and relationship with meteorological conditions. *Atmosphere*. 2022; 13(3): 420. <https://doi.org/10.3390/atmos13030420>
16. Hayakawa K., Tang N., Xing W., Oanh P.K., Hara A., Nakamura H. Concentrations and sources of atmospheric pm, polycyclic aromatic hydrocarbons and nitropolycyclic aromatic hydrocarbons in Kanazawa, Japan. *Atmosphere*. 2021; 12(2): 256. <https://doi.org/10.3390/atmos12020256>
17. Marinaite I.I., Khodzher T.V., Obolkin V.A., Potyomkin V.L. Polycyclic aromatic hydrocarbons and PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} particles in the atmosphere over the southern Baikal region. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2023; (4): 22–32. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-4-22-32> <https://elibrary.ru/qkszzl> (in Russian)
18. Malcolm H.M., Dobson S. *The calculation of an environmental assessment level (EAL) for atmospheric PAHs using relative potencies*. London, UK: Department of the Environment; 1994.
19. Mintsis M.Ya., Galevsky G.V. Issue of PAU from self-burning anodes by aluminium production. In: *Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference: In 2 Parts [Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Trudy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 chastyakh]*. Novokuznetsk; 2017: 375–7. <https://elibrary.ru/zuwcob> (in Russian)
20. Baird W.M., Hooven L.A., Mahadevan B. Carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbon-DNA adducts and mechanism of action. *Environ. Mol. Mutagen.* 2005; 45(2–3): 106–14. <https://doi.org/10.1002/em.20095>
21. Zhao C., Guan X., Zhang Q., Meng L., Lin W., Yang R., et al. Parent and halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons exposure in aluminum smelter workers: Serum levels, accumulation trends, and association with health indicators. *Sci. Total. Environ.* 2024; 913: 169655. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169655>
22. Pleil J.D., Stiegel M.A., Sobus J.R., Tabucchi S., Ghio A.J., Madden M.C. Cumulative exposure assessment for trace-level polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using human blood and plasma analysis. *J. Chrom. B*. 2010; 878(21): 1753–60. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2010.04.035>
23. Låg M., Øvreivik J., Refsnes M., Holme J.A. Potential role of polycyclic aromatic hydrocarbons in air pollution-induced non-malignant respiratory diseases. *Respir. Res.* 2020; 21(1): 299. <https://doi.org/10.1186/s12931-020-01563-1>

Сведения об авторах

Шайхметов Салим Файзыевич, доктор мед. наук, профессор, вед. науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: salimf53@mail.ru

Рукавишников Виктор Степанович, член-корр. РАН, доктор мед. наук, профессор, научный руководитель ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: rvs_2010@mail.ru

Маринайте Ирина Ионовна, канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаб. гидрохимии и химии атмосферы ЛИН СО РАН, 664033, Иркутск, Россия. E-mail: marin@lin.irk.ru

Меринов Алексей Владимирович, канд. биол. наук, науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: alek-merinov@mail.ru

Information about the authors

Salim F. Shayakhmetov, DSc (Medicine), professor, leading researcher of the laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8740-3133> E-mail: salimf53@mail.ru

Viktor S. Rukavishnikov, DSc (Medicine), professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences scientific supervisor of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2536-1550> E-mail: rvs_2010@mail.ru

Irina I. Marinaite, PhD (Chemistry), senior researcher of the Laboratory of hydrochemistry and atmospheric chemistry, Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3856-420X> E-mail: marin@lin.irk.ru

Alexey V. Merinov, PhD (Biology), researcher of the Analytical ecotoxicology and biomonitoring laboratory, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7848-6432> E-mail: alek-merinov@mail.ru