



Шаяхметов С.Ф., Журба О.М., Алексеенко А.Н., Меринов А.В.

Гидроксिलированные полициклические ароматические углеводороды как биомаркёры воздействия на работников производства алюминия

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических ТСА», 665827, Ангарск, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Актуальность исследования обусловлена воздействием высокотоксичных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) на работников алюминиевого производства и необходимостью определения релевантных биомаркёров экспозиции для оценки риска нарушения их здоровья.

Материалы и методы. С помощью авторского метода ГХ-МС выполнены исследования содержания 7 гидроксिलированных метаболитов ПАУ (ОН-ПАУ) в моче 130 работников цехов с традиционной (ТСА) и модернизированной (ТОА) технологиями производства алюминия и 22 человек контрольной группы.

Результаты. Выявлены высокие уровни ОН-ПАУ в моче работников цехов с ТСА и ТОА, превышающие значения контрольной группы в 1,7–120,7 и 1,2–12,4 раза соответственно, и предел биологического индекса экспозиции – в 2–28 и 1,2–2,9 раза соответственно. Установлены тесные корреляционные связи между содержанием нормируемого маркерного метаболита ПАУ – 1-ОHPyr и уровнями доминирующих в моче у работников цехов с ТСА и ТОА 2-OHFlе ($r = 0,860$ и $0,869$), 3-ОHPhe ($r = 0,902$ и $0,932$) и 2-OHNap ($r = 0,433$ и $0,412$).

Ограничения исследования. Одним из потенциальных ограничений данного исследования стала сложность определения содержания в моче работников гидроксिलированных метаболитов высокомолекулярных (5,6-ядерных) ПАУ, которые преимущественно удаляются с фекальными выделениями. **Заключение.** Результаты проведенных исследований продемонстрировали, что 2-OHNap, 2-OHFlе и 3-ОHPhe могут быть применимы в качестве приоритетных биомаркёров воздействия общих ПАУ с целью оценки риска для здоровья работников в дополнение к общепринятому маркерному метаболиту 1-ОHPyr.

Ключевые слова: производство алюминия; полициклические ароматические углеводороды; гидроксिलированные метаболиты; работники; биологический мониторинг

Соблюдение этических стандартов. Исследование одобрено Локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (заключение ЛЭК № 2 от 18.02.2020 г.), выполнено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации Всемирной ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» (ред. 2013 г.), не ущемляло прав и не подвергало опасности благополучие субъектов исследования, проведено с их согласия.

Для цитирования: Шаяхметов С.Ф., Журба О.М., Алексеенко А.Н., Меринов А.В. Гидроксिलированные полициклические ароматические углеводороды как биомаркёры воздействия на работников производства алюминия. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(9): 1005–1010. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1005-1010> <https://elibrary.ru/dbisxj>

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

Вклад авторов: Шаяхметов С.Ф. – концепция и дизайн исследования, поиск источников литературы, написание текста; Журба О.М. – концепция и дизайн исследования, поиск источников литературы, сбор материала; Алексеенко А.Н. – лабораторные исследования; Меринов А.В. – сбор данных литературы, сбор материала, статистическая обработка. 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 проведено в рамках средств, выделяемых для выполнения государственного задания ФГБНУ ВСИМЭИ.

Поступила: 14.04.2026 / Поступила после доработки: 04.06.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликована: 20.10.2026

Salim F. Shayakhmetov, Olga M. Zhurba, Anton N. Alekseenko, Alexey V. Merinov

Hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure in workers of aluminum production

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is due to the impact of highly toxic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on workers of aluminum production and the need of identification of relevant exposure biomarkers to assess the risk of damage to their health.

Materials and methods. The content of seven hydroxylated metabolites of PAHs (OH-PAH) in the urine in one hundred thirty workers from workshops with traditional (TSA) and modernized (TOA) technologies for aluminum production and 22 persons in the control group were studied using the author's GC-MS method.

Results. High levels of OH-PAH were found in the urine in workers in workshops with TSA and TOA, exceeding the values of the control group by 1.7–120.7 and 1.2–12.4 times, respectively, and the limit of the biological exposure index by 2.0–28.0 and 1.2–2.9 times. Close correlations were established between the content of the standardized marker metabolite of PAHs, 1-OHPyr, and the levels of 2-OHFlе ($r = 0.860$ and 0.869), 3-OHPhe ($r = 0.902$ and 0.932), and 2-OHNap ($r = 0.433$ and 0.412) dominant in the urine in workers in workshops with TSA and TOA.

Limitations. One potential limitation of this study is the difficulty in determining the levels of hydroxylated metabolites of high molecular weight (5,6-nuclear) PAHs in the urine in workers, which are primarily eliminated with fecal excretion.

Conclusion. The results of the conducted studies demonstrated that 2-OHNap, 2-OHFlе and 3-OHPhe can be used as priority biomarkers of exposure to total PAHs for assessing the health risk of workers in addition to the generally accepted marker metabolite 1-OHPyr.

Keywords: aluminum production; polycyclic aromatic hydrocarbons; hydroxylated metabolites; workers; biological monitoring

Compliance with ethical standards. The study was approved by the Local Ethics Committee of the Federal State Budgetary Scientific Institution ESIMER and was conducted in accordance with the ethical principles of research set out in the Helsinki declaration of the World Medical Association (2013 edition).

For citation: Shayakhmetov S.F., Zhurba O.M., Alekseenko A.N., Merinov A.V. Hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure in workers of aluminum production. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(9): 1005–1010. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-9-1005-1010> <https://elibrary.ru/dbisxj> (In Russ.)

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

Contribution: Shayakhmetov S.F. – concept and design of the study, organization of the study, search for literature sources, writing the text; Zhurba O.M. – concept and design of the study, search for literature sources, search for literature sources, collection of material; Alekseenko A.N. – laboratory research; Merinov A.V. – collection of literature data, collection of material, statistical processing. 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 work was performed within the framework of funds allocated for the implementation of the state task by East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research.

Received: April 14, 2026 / Revised: June 4, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: October 20, 2026

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ, полиарены) являются одними из токсических органических веществ бензольного ряда, в химической структуре которых присутствуют два бензольных конденсированных кольца и более. В России и зарубежных странах 16 соединений ПАУ включены в список приоритетных загрязнителей. ПАУ принято делить на лёгкие (летучие) 2–4-ядерные низко- и среднемолекулярные (нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен) и тяжёлые 5–6-ядерные высокомолекулярные (бензо[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен, бенз[а]пирен, дибенз[а, h]антрацен, бензо[g, h, i]перилен и индено(1,2,3-с, d)пирен) структуры [1, 2].

Полиарены наряду с высокой токсичностью и способностью накапливаться в объектах окружающей среды и организме человека характеризуются высокими токсическими, канцерогенными и мутагенными свойствами [3–5]. Профессиональная деятельность на производствах коксохимии, металлургии (алюминий, железо, сталь), битума, при проведении асфальтовых работ сопряжена с повышенным воздействием ПАУ. На работников данных производств влияет многокомпонентная смесь полиаренов, которые вызывают различные нарушения здоровья, в том числе злокачественные новообразования кожи, лёгких, мочеполовых органов [6–8].

Из-за высокой опасности ПАУ в России и других странах проводится контроль содержания в производственной и окружающей среде наиболее опасного из соединений полиаренов — бенз(а)пирена, а также некоторых других ПАУ [9]. При этом используемый в некоторых зарубежных странах альтернативный способ объективной персонализированной оценки воздействия полиаренов на человека путём определения их гидроксированных метаболитов (ОН-РАН) в моче может служить более точной мерой полученной внутренней дозы ПАУ [10–12].

Для биологического мониторинга Американской ассоциацией государственных промышленных гигиенистов (ACGIH) было предложено количественное определение принятого в качестве биомаркера экспозиции ПАУ метаболита пирена 1-гидроксипирена (1-ОНПуг) в моче, для которого установлено предельное значение биологического индекса экспозиции (BEI) 2,5 мкг/л [13]. Основной недостаток этого подхода — то, что сам по себе пирен не является канцерогенным, а количественное определение 1-ОНПуг позволяет проводить только общую оценку риска опасности экспозиции всей смеси компонентов ПАУ на организм [14].

В настоящее время ACGIH и многие исследователи указывают на необходимость изучения особенностей содержания максимально большого количества ОН-РАН в моче работников вредных производств. ОН-РАН могут стать новыми специфическими биомаркерами экспозиции разных соединений полиаренов для объективной персонализированной оценки риска нарушения здоровья [13–16]. Ранее такие исследования были проведены среди работников коксохимического производства, а также занятых укладкой и покрытием дорог горячим асфальтом, тушением лесных пожаров [14, 17, 18]. Однако изучению и сравнительному анализу содержания и распределения широкого спектра ОН-РАН в моче работников алюминиевого производства не уделялось должного внимания, и единичные исследования касались только определения содержания 1-ОНПуг [11, 15, 19].

Цель исследования — сравнительная оценка уровней содержания и распределения различных моногидроксированных метаболитов ПАУ в моче экспонированных работников электролизных цехов при разных технологиях алюминиевого производства.

Материалы и методы

Объектом исследования была биологическая среда (моча) работников электролизных цехов крупнейшего алюминиевого производства Восточной Сибири, входящего

в список общепризнанных канцерогеноопасных производств. Электролизное производство алюминия осуществляется в электролизёрах с применением традиционной технологии самообжигающихся (ТСА) и модернизированной технологии предварительно обожжённых анодов (ТОА).

В когортном исследовании приняли участие работники основных профессий исследуемых цехов, занятые обслуживанием электролизёров, анодов и грузоподъёмных мостовых кранов, а также лица, не работающие на данном производстве и не подвергающиеся воздействию ПАУ. Общее число участников когорты — 152. Основными профессиональными группами работников цехов с ТСА ($n = 100$) были анодчики, электролизники и машинисты кранов, а цехов с ТОА ($n = 30$) — операторы-рамщики, электролизники и крановщики. Контрольную группу составили 22 человека, не подвергавшиеся воздействию ПАУ на производстве.

Сбор образцов мочи для анализа содержания ОН-РАН осуществляли в специальные пропиленовые контейнеры во время медицинского обследования работников в поликлинике завода. Пробы мочи после сбора кодировали, доставляли в лабораторию, замораживали и хранили при температуре минус 20 °С до проведения анализа. В качестве биомаркёров воздействия ПАУ определяли 7 гидроксированных низко- и среднемолекулярных полиаренов, выделяемых из организма преимущественно с мочой: 2-гидросинафталин (2-ОНNap), 2-гидроксифлуорен (2-ОНFle), 2-гидроксифенантрен (2-ОНPhe), 3-гидроксифенантрен (3-ОНPhe), 9-гидроксифенантрен (9-ОНPhe), 1-гидроксипирен (1-ОНPug) и 6-гидроксихризен (6-ОНChr). Полученные результаты определения 1-ОНПуг в моче сопоставляли с допустимым показателем BEI (ACGIH) 2,5 мкг/л [13].

Определение ОН-РАН и количественно-качественный анализ их содержания в моче осуществляли с помощью разработанной нами высокочувствительной методики хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на газовом хроматографе Agilent 7890 с масс-селективным детектором Agilent 5975. Пробоподготовка основана на дисперсионной жидкостной микроэкстракции трихлорметаном в кислой среде. Дериватизация осуществлялась в разогретом порту инжектора реагентом N,O-бистриметилсилилтрифторацемидом. В качестве диспергирующего растворителя использовали этанол. ГХ-МС анализ проводился в следующих условиях: pH = 1,6, объём этанола 300 мкл, время экстракции 25 с на высокотемпературной колонке НТ-8 в режиме температурного градиента в течение 15 мин. Линейный диапазон концентраций соответствовал 0,5–100 нг/мл. Подробная информация о методе анализа ОН-РАН и характеристиках масс-спектров была представлена в предыдущей публикации [20].

Исследование одобрено Локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (заключение ЛЭК № 2 от 18.02.2020 г.), выполнено в соответствии с этическими стандартами Хельсинкской декларации Всемирной ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека», не ущемляло прав и не подвергало опасности благополучие субъектов исследования, проведено с их согласия.

Для статистической обработки результатов исследований использовали пакет статистических программ Jamovi (version 2.3.2). В связи с отсутствием нормального распределения данных о содержании ОН-РАН в моче работников в качестве описательных статистик использовали медиану и значения межквартильного интервала. Сравнение количественных показателей осуществляли с использованием непараметрических критериев Краскала — Уоллиса и Манна — Уитни с поправкой Бонферрони. Корреляционный анализ проводили с применением коэффициента корреляции Спирмена. Результаты статистического анализа считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты

Для оценки экспозиции ПАУ и рисков, связанных с уровнями ОН-РАН, у работников производства алюминия был проведён сравнительный анализ количественного

Содержание гидроксированных метаболитов ПАУ (мкг/л) в моче работников электролизных цехов с ТСА и ТОА, *Me* (Q₂₅–Q₇₅)
Content PAHs hydroxylated metabolites (μg/L) in urine in workers in electrolysis shops with TSA and TOA, *Me* (Q₂₅–Q₇₅)

Тип технологии, профессия Type of technology, occupation	2-OHNaP	2-OHFlе	2-OHPhe	3-OHPhe	9-OHPhe	1-OHPyr	6-OHChr	ΣОН-ПАУ ΣОН-PAH
ТСА (все работники) TSA (all workers) <i>n</i> = 100	10.0 (4.4–18.1)	10.1 (4.8–30.7)	3.6 (1.3–10.7)	4.4 (2.1–19.6)	0.99 (0.41–2.5)	8.9 (2.7–34.9)	0.19 (0.06–0.50)	45.88 (23.43–107.95)
Электролизники Electrolyzers <i>n</i> = 43	8.8 (4.0–16.6)	5.9 (3.8–10.6)	1.6 (0.90–3.5)	2.8 (1.8–4.6)	0.84 (0.37–1.4)	5.1 (2.2–10.5)	0.13 (0.06–0.44)	26.34 (18.40–46.80)
Анодчики Anode workers <i>n</i> = 25	13.3 (8.0–18.1)	75.8 (29.9–112.3)	14.8 (10.6–29.5)	33.7 (21.2–84.0)	0.84 (0.41–4.0)	70.0 (34.1–144.9)	0.29 (0.06–0.78)	256.21 (107.18–419.30)
Машинисты крана Crane operators <i>n</i> = 32	7.6 (3.7–17.7)	11.2 (5.3–15.8)	4.1 (1.8–5.9)	5.1 (2.3–9.8)	1.4 (0.64–3.1)	6.4 (2.9–21.4)	0.14 (0.06–0.41)	49.31 (24.46–70.53)
ТОА (все работники) TOA (all workers) <i>n</i> = 30	5.3 (2.9–21.1)	3.9 (2.6–8.2)	1.4 (0.81–2.6)	2.3 (1.3–4.8)	1.6 (1.1–2.7)	3.6 (2.0–8.0)	0.06 (0.06–0.18)	24.25 (14.56–47.84)
Электролизники Electrolyzers <i>n</i> = 17	4.6 (2.7–22.6)	3.9 (3.5–6.3)	1.8 (1.1–2.5)	2.3 (1.3–4.6)	1.7 (1.1–2.5)	3.8 (2.1–8.1)	0.06 (0.06–0.16)	22.36 (14.42–39.66)
Рамщики Framers <i>n</i> = 6	8.4 (3.0–14.7)	2.6 (1.7–4.9)	0.63 (0.51–1.1)	1.3 (0.83–3.6)	1.1 (0.70–1.5)	2.9 (1.6–5.2)	0.20 (0.09–0.25)	20.15 (11.83–35.82)
Крановщики Crane operators <i>n</i> = 7	14.0 (4.8–23.2)	5.8 (2.8–10.1)	1.1 (1.1–3.9)	2.3 (1.8–5.7)	2.8 (1.4–5.4)	7.2 (2.4–8.0)	0.06 (0.06–0.06)	39.66 (21.31–66.17)
Контрольная группа Control group <i>n</i> = 22	4.5 (2.5–6.3)	0.95 (0.78–1.2)	0.26 (0.19–0.35)	0.56 (0.44–0.88)	0.32 (0.11–0.54)	0.58 (0.35–0.88)	0.40 (0.36–0.51)	8.15 (6.71–10.94)

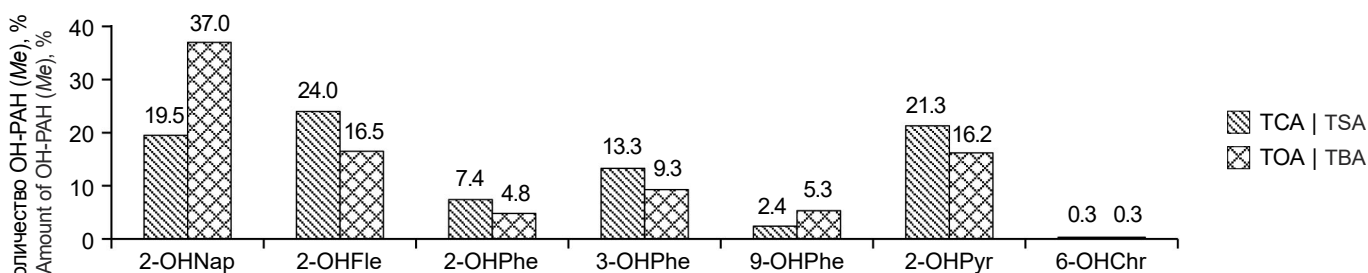
содержания и долевого соотношения различных ОН-РАН в моче рабочих основных профессий электролизных цехов и лиц контрольной группы (см. **таблицу**).

ГХ-МС анализ содержания ОН-РАН в моче работников электролизных цехов показал, что из исследуемых анализов 2-ОНNaP, 2-ОНFlе, 2-ОHPhe, 3-ОHPhe и 1-ОHPyr были обнаружены в 100% образцов мочи, за исключением 9-ОHPhe и 6-ОHChr, которые определялись в 92 и 56% проб соответственно. При этом концентрации ОН-РАН в моче работников электролизных цехов с ТСА и ТОА варьировали в различном диапазоне величин и имели неоднородный характер распределения.

В целом медианные концентрации ΣОН-РАН и индивидуальных ОН-РАН (за исключением 6-ОHChr) в моче обследованных профессиональных групп работников цехов с ТСА достоверно превышали значения контрольной группы в 3,2–31,4 и 1,7–120,7 раза, а у работников цехов с ТОА (кроме электролизников) – в 2,5–4,9 и 1,2–12,4 раза соответственно ($p < 0,05$). Самые высокие уровни содержания ОН-РАН в моче всей когорты работников электролизных цехов с ТСА и ТОА отмечались у 2-ОНNaP, 2-ОНFlе и 1-ОHPyr, самые низкие – 6-ОHChr.

В цехах с традиционной ТСА концентрации 2-ОНFlе, 2-ОHPhe, 3-ОHPhe, 1-ОHPyr и ΣОН-РАН в моче анодчиков были значительно выше, чем аналогичные показатели электролизников и машинистов кранов ($p < 0,017$). При этом наибольшие уровни содержания 1-ОHPyr в моче, превышавшие допустимую величину ВЕI (2,5 мкг/л), отмечались у анодчиков (в 28 раз), в меньшей степени – у машинистов кранов (в 2,6 раза) и электролизников (в 2 раза).

В цехах, применяющих ТОА, медианные концентрации индивидуальных ОН-РАН и ΣОН-РАН в моче работников основных групп профессий достоверно не различались. При этом уровни содержания 1-ОHPyr в моче работников превышали предел ВЕI в 1,2–2,9 раза, преимущественно у крановщиков. Также содержание 2-ОНFlе, 2-ОHPhe, 3-ОHPhe, 1-ОHPyr и ΣОН-РАН в моче работников цехов с ТОА в целом было в 1,9–2,6 раза ниже, чем аналогичные показатели работников цехов с ТСА ($p < 0,05$). Метаболические профили долевого соотношения индивидуальных ОН-РАН в пробах мочи у работников исследуемых электролизных цехов приведены на **рисунке**.



Распределение группового состава гидроксированных метаболитов ПАУ в моче работников электролизных цехов с ТСА и ТОА.

Distribution of the group composition of PAHs hydroxylated metabolites in urine in workers in electrolysis shops with TSA and TOA.

Среди исследованных ОН-РАН в моче работников цехов с ТСА 2-ОНFle (24%), 1-ОНРуг (21,3%), 2-ОНNap (19,5%) и 3-ОНPhe (13,3%) составляющие 78,1% суммы ОН-РАН были наиболее распространёнными аналитами, за ним следовали 2- и 9-гидроксифенантрены (7,4 и 2,4% соответственно) и 6-ОНChr (0,3%). В то же время в моче работников цехов с ТОА отмечался иной порядок распределения ОН-РАН: преобладали 2-ОНNap (37%), 2-ОНFle (16,5%) и 1-ОНРуг (16,2%). Доля других метаболитов была значительно меньше: 3-ОНPhe — 9,3%, 9-ОНPhe — 5,3%, 2-ОНPhe — 4,8%, 6-ОНChr — 0,3%.

Обсуждение

В настоящее время особую актуальность приобретают оценка реальных уровней экспозиции полиаренов и анализ рисков для здоровья работников современных алюминиевых производств. В мировой практике повышенные уровни содержания маркерных токсикантов в объектах окружающей среды и биосубстратах человека рассматриваются как серьёзные доказательные аргументы их негативного воздействия на здоровье. Угрозу здоровью представляют не только сами ПАУ, но и продукты их метаболизма, зачастую более опасные, чем исходные соединения [9, 21, 22].

Проведённые нами ранее исследования [7] показали, что наиболее высокие концентрации индивидуальных соединений и суммы 13 идентифицированных ПАУ отмечались в цехах, использующих ТСА, особенно в рабочей зоне анодчиков. Более низкие значения ПАУ (в 2–93 раза) зарегистрированы в цехах с ТОА. В целом суммарная токсичность обнаруженных ПАУ, выраженных через Б(а)П — эквивалентные коэффициенты, превышала ПДК Б(а)П в 1,8–7,3 раза. При этом доля вклада отдельных соединений в суммарную степень опасности ПАУ варьировала от 17,6 до 80,3%, что свидетельствует о необходимости оценки содержания в воздухе всей смеси ПАУ и выявление в моче работников приоритетных ОН-РАН.

Результаты настоящего исследования продемонстрировали статистически значимые различия медианных концентраций отдельных ОН-РАН и Σ ОН-РАН в моче как между исследуемыми цехами, профессиональными группами, так и по сравнению с контрольной группой и допустимой величиной ВЕИ для 1-ОНРуг. Так, у работников цехов с ТСА и ТОА медианные концентрации Σ ОН-РАН и отдельных метаболитов, особенно 2-ОНNap, 2-ОНFle, 1-ОНРуг и 3-ОНPhe, в моче были в 1,7–120,7 раза выше, чем в контрольной группе. При этом уровни содержания регламентированного АСГН 1-ОНРуг в моче работников цехов с ТСА (электролизников, анодчиков и машинистов кранов) превышали значение ВЕИ в 2–28 раз. Более того, самые высокие концентрации ОН-РАН в моче, превышающие значения контрольной группы и ВЕИ, отмечались у анодчиков по сравнению с электролизниками и машинистами кранов, что свидетельствует о высоком уровне химической нагрузки ПАУ и риске нарушения здоровья у анодчиков.

Важно, что в цехах с ТОА существенных различий содержания приоритетных ОН-РАН в моче между основными группами профессий не наблюдалось. Тем не менее уровни содержания 1-ОНРуг в моче работников были выше предела ВЕИ в 1,2–2,9 раза, особенно у крановщиков, рабочее место которых расположено в верхней зоне цеха, что может указывать на накопление метаболита в организме и повышенный риск для здоровья работающих. При этом концентрации обнаруженных ОН-РАН в моче работников цехов с модернизированной ТОА оказались в 1,9–2,6 раза ниже, чем аналогичный показатель у рабочих цехов с традиционной ТСА. По данным Тушек М. и соавт., концентрация 1-ОНРуг в моче на уровне 4,4 мкг/г креатинина (примерно 3,4 мкг/л) может быть связана с относительным риском возникновения рака лёгких примерно на уровне 1,3, а уровни свыше 7,7 мкг/г креатинина (около 6 мкг/л) рассматриваются как повышенный риск карциномы лёгких у работников

[23]. При этом степень негативного влияния полициклических ароматических углеводородов на организм во многом определяется их химической структурой и токсикологическими характеристиками ОН-РАН. Поступая в организм, соединения ПАУ подвергаются метаболизму с образованием гидроксильрованных производных, способных связываться с ДНК и запускать канцерогенный процесс [3].

Сравнение полученных результатов с данными зарубежной литературы показало, что уровни содержания 2-ОНFle, 2-, 3-ОНPhe и 1-ОНРуг в моче анодчиков цехов с ТСА были в 2,7–70 раз выше, чем показатель у работников коксохимического производства (27,6; 3,7; 5,7; 15,4 мкг/л соответственно), лесных пожарных (2,3; 0,5; 1,1; 0,9 мкг/л) и асфальтировщиков дорог (1-ОНРуг 0,26–1,4 мкг/л). При этом у электролизников и машинистов кранов цехов с ТСА и у всех профессиональных групп работников цехов с ТОА значения ОН-РАН были ниже, чем у рабочих коксохимического завода, но выше уровней ОН-РАН у лесных пожарных и асфальтировщиков дорог [14, 17, 18].

Известно, что одним из важных этапов биомониторинга ПАУ является оценка процентных соотношений и корреляционных связей между уровнями экскретируемых с мочой ОН-РАН. Такой анализ позволяет выяснить метаболический профиль и выявить релевантные биомаркеры экспозиции ПАУ у работников вредных производств [14]. Анализ расчётов процентных соотношений содержания разных групп ОН-РАН в моче у работников цехов с ТСА и ТОА выявил общее преобладание 2-ОНNap, 2-ОНFle, 1-ОНРуг и 3-ОНPhe, составляющее соответственно 78,1 и 78,9% от Σ ОН-РАН. Ранговый порядок долевого распределения ОН-РАН в моче работников цехов с ТСА имел следующую последовательность: 2-ОНFle (24% от Σ 7 ОН-РАН) > 1-ОНРуг (21,3%) > 2-ОНNap (19,5%) > 3-ОНPhe (13,3%) > 2-ОНPhe (7,4%) > 9-ОНPhe (2,4%) > 6-ОНChr (0,3%). У работников цехов с ТОА ранговый порядок долевого распределения имел вид: 2-ОНNap (37%) > 2-ОНFle (16,5%) > 1-ОНРуг (16,2%) > 3-ОНPhe (9,3%) > 9-ОНPhe (5,3%) > 2-ОНPhe (4,8%) > 6-ОНChr (0,3%). Выявленные различия в распределении ОН-РАН, вероятно, были обусловлены разными технологиями электролиза алюминия, уровнями содержания в воздухе цехов соединений ПАУ и их качественным составом, связанными с этим метаболическими и кинетическими процессами экскреции из организма.

Корреляционный анализ взаимосвязи между содержанием ОН-РАН в моче работников цехов с ТСА и ТОА продемонстрировал высокую степень корреляции между концентрациями регламентированного маркера экспозиции ПАУ 1-ОНРуг и уровнями 2-ОНFle ($r = 0,86$ и $0,869$ соответственно), 2-ОНPhe ($r = 0,884$ и $0,848$) и 3-ОНPhe ($r = 0,902$ и $0,932$), а также умеренную и слабые связи между уровнями 1-ОНРуг и концентрациями 2-ОНNap ($r = 0,433$ и $0,412$), 9-ОНPhe ($r = 0,254$ и $0,426$) и 6-ОНChr ($r = 0,292$). Также отмечалась высокая степень корреляции между уровнями 2-ОНFle и 2-ОНPhe ($r = 0,891$ и $0,813$), 3-ОНPhe ($r = 0,886$ и $0,841$), между содержанием 2-ОНPhe и 3-ОНPhe ($r = 0,945$ и $0,898$) в моче обследованных, что указывает на действие единого источника (фактора) загрязнения воздуха рабочей зоны. В целом порядок расположения исследуемых ОН-РАН в зависимости от тесноты (силы) их корреляции с нормируемым 1-ОНРуг был следующим: высокая — 2-ОНFle; 2-ОНPhe; 3-ОНPhe > умеренная — 2-ОНNap > слабая — 9-ОНPhe; 6-ОНChr. Интерпретация данных анализа количественного распределения и ассоциаций между концентрациями ОН-РАН в моче работников цехов с ТСА и ТОА показывает, что 2-ОНNap, 2-ОНFle и 3-ОНPhe могут быть применены в качестве приоритетных биомаркеров воздействия общих ПАУ в дополнение к общепризнанному маркерному метаболиту 1-ОНРуг. Использование только 1-ОНРуг для оценки риска опасности экспозиции ПАУ может приводить к потере информации о характере и степени негативного воздействия широкого спектра полиаренов.

Ограничения исследования. Одно из потенциальных ограничений этого исследования — сложность определения содержания в моче работников гидроксилированных метаболитов высокомолекулярных (5,6-ядерных) ПАУ, которые преимущественно удалялись с фекальными выделениями. Необходимы дальнейшие исследования неметаболизированных лёгких (2–3-ядерных) и тяжёлых (5–6-ядерных) соединений ПАУ в крови и моче работников.

Заключение

Результаты проведённых исследований продемонстрировали высокие уровни содержания индивидуальных ОН-РАН и суммы ОН-РАН (включая маркерный 1-ОНРуг) в моче работников алюминиевого производства, превышавшие в 1,7–120,7 раза значения контрольной группы и в 1,2–28 раз — предел ВЕИ для 1-ОНРуг. Такой результат может свидетельствовать о серьёзной угрозе здоровью работников. Самые высокие медианные концентрации ОН-РАН в моче и связанные с ними риски для здоровья наблюдались у работников, особенно анодчиков, цехов с ТСА, более низ-

кие (в 1,9–2,6 раза) — у работников цехов с ТОА. Разница была обусловлена применяемой технологией производства алюминия, уровнями экспозиции ПАУ и профессией работников. В групповом составе измеренных ОН-РАН в моче работников данных цехов отмечено преобладание 2-ОННар, 2-ОНФле, 1-ОНРуг и 3-ОНРфе (78,1 и 78,9% от ΣОН-РАН). Установлены тесные корреляционные связи между содержанием нормируемого маркерного метаболита ПАУ — 1-ОНРуг и уровнями доминирующих 2-ОНФле ($r = 0,86$ и $0,869$), 3-ОНРфе ($r = 0,902$ и $0,932$) и 2-ОННар ($r = 0,433$ и $0,412$) в моче работников цехов с ТСА и ТОА. Полученные данные свидетельствуют о том, что 2-ОННар, 2-ОНФле и 3-ОНРфе в моче могут быть применены в качестве приоритетных биомаркеров воздействия общих ПАУ при оценке риска для здоровья работников производства алюминия в дополнение к общепризнанному нормированному АСГИН маркерному метаболиту ПАУ — 1-ОНРуг. Одновременное определение в моче уровней нескольких приоритетных биомаркеров экспозиции ПАУ позволит выявить характер воздействия смеси полиаренов и объективно оценить риски для здоровья работников.

Литература

(п.п. 2–6, 8, 10–18, 23 см. References)

1. Смола В.И. ПАУ в окружающей среде: проблемы и решения. Часть 1. М.: Полиграф сервис; 2013.
7. 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): 492–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-492-496> <https://elibrary.ru/nigvwd>
9. 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>
19. Шаяхметов С.Ф., Алексеев А.Н., Меринов А.В., Журба О.М. Идентификация и характеристика содержания метаболита полициклических ароматических углеводородов 1-гидроксилирена в моче как маркера экспозиции работников электролизных цехов алюминиевого производства. *Анализ риска здоровью*. 2022; (3): 90–7. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.3.08> <https://elibrary.ru/wretzp>
20. Алексеев А.Н., Журба О.М., Меринов А.В., Шаяхметов С.Ф. Хромато-масс-спектрометрическое определение гидроксилированных полиароматических углеводородов в моче с помощью дисперсионной жидкостно-жидкостной микроэкстракции и дериватизации в порту инъектора. *Журнал аналитической химии*. 2024; 79(10): 1132–40. <https://elibrary.ru/teyde>
21. Шилов В.В., Маркова О.Л., Кузнецов А.В. Биомониторинг воздействия вредных химических веществ на основе современных биомаркеров. Обзор литературы. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(6): 591–6. <https://elibrary.ru/qlaqms>
22. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Чашин В.П., Гудков А.Б. Научные принципы применения биомаркеров в медико-экологических исследованиях (обзор литературы). *Экология человека*. 2019; (9): 4–14. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-9-4-14> <https://elibrary.ru/wswnqj>

References

1. Smola V.I. PAHs in the Environment: Problems and Solutions. Part 1 [PAU v okruzhayushchei srede: problemy i resheniya. Chast' 1]. Moscow: Poligraf servis; 2013. (in Russian)
2. McGowin A.E. Polycyclic aromatic hydrocarbons. In: *Chromatographic Analysis of the Environment*. 3rd edition. CRC Press; 2006: 555–616.
3. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Some Non-Heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures*. Lyon; 2010.
4. 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> <https://elibrary.ru/ydvbgk>
5. 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> <https://elibrary.ru/lvgibi>
6. 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> <https://elibrary.ru/yejddk>
7. Shayakhmetov S.F., Rukavishnikov V.S., Marinaite I.I., Merinov A.V. Content of polyarenes in the air of the working area at aluminum production. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2025; 104(4): 492–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-492-496> <https://elibrary.ru/nigvwd> (in Russian)
8. 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> <https://elibrary.ru/qitertd>
9. 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)
10. Jongeneelen F. Guidelines for biological monitoring of workers in aluminium production facilities for urinary 1-hydroxypyrene (1-pyrenol). *J. Environ. Monit.* 2004; 6(5): 61N–5N. <https://doi.org/10.1039/b312767m> <https://elibrary.ru/ebucaz>
11. Klöslöva Z., Drimal M., Balog K., Koppová K., Dubajová J. The relations between polycyclic aromatic hydrocarbons exposure and 1-OHP levels as a biomarker of the exposure. *Cent. Eur. J. Public Health*. 2016; 24(4): 302–7. <https://doi.org/10.21101/cejph.a4179>
12. Zhang Y., Ding J., Shen G., Zhong J., Wang C., Wei S., et al. Dietary and inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and urinary excretion of monohydroxy metabolites – a controlled case study in Beijing, China. *Environ. Pollut.* 2014; 184: 515–22. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.005>
13. 2020 TLVs and BEIs: Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati; 2020.
14. Campo L., Rossella F., Pavanella S., Mielzynska D., Siwinska E., Kapka L., et al. Urinary profiles to assess polycyclic aromatic hydrocarbons exposure in coke-oven workers. *Toxicol. Lett.* 2010; 192(1): 72–8. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2008.12.018>
15. Barbeau D., Persoons R., Marques M., Hervé C., Laffitte-Rigaud G., Maitre A. Relevance of urinary 3-hydroxybenzo(a)pyrene and 1-hydroxypyrene to assess exposure to carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures in metallurgy workers. *Ann. Occup. Hyg.* 2014; 58(5): 579–90. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu004>
16. Hadrup N., Mielżyńska-Svách D., Kozłowska A., Campisi M., Pavanella S., Vogel U. Association between a urinary biomarker for exposure to PAH and blood level of the acute phase protein serum amyloid A in coke oven workers. *Environ. Health*. 2019; 18(1): 81. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0523-1> <https://elibrary.ru/qsnuw>
17. Adetona O., Simpson C.D., Li Z., Sjödin A., Calafat A.M., Naeher L.P. Hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure to wood smoke in wildland firefighters. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2017; 27(1): 78–83. <https://doi.org/10.1038/jes.2015.75>
18. Fostinelli J., Madeo E., Toraldo E., Sarnico M., Luzzana G., Tomasi C., et al. Environmental and biological monitoring of occupational exposure to polynuclear

- aromatic hydrocarbons during highway pavement construction in Italy. *Toxicol. Lett.* 2018, 298: 134–40. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.06.005>
19. Shayakhmetov S.F., Alekseenko A.N., Merinov A.V., Zhurba O.M. Identification and characterization of 1-hydroxypyrene contents in urine as a marker of exposure to PAH in workers of electrolysis workshops at aluminum production. *Health Risk Analysis*. 2022; (3): 90–7. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.3.08.eng> <https://elibrary.ru/paiyzt>
20. Alekseenko A.N., Zhurba O.M., Merinov A.V., Shayakhmetov S.F. Determination of hydroxylated polyaromatic hydrocarbons in urine by gas chromatography-mass spectrometry using dispersive liquid-liquid microextraction and injector-port derivatization. *J. Anal. Chem.* 2024; 79(10): 1491–9. <https://doi.org/10.1134/S1061934824700886> <https://elibrary.ru/nzlmji>
21. Shilov V.V., Markova O.L., Kuznetsov A.V. Biomonitoring of influence of harmful chemicals on the basis of the modern biomarkers. Literature review. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(6): 591–6. <https://elibrary.ru/qlaqms> (in Russian)
22. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Chashchin V.P., Gudkov A.B. Scientific principles of use of biomarkers in medico-ecological studies (review). *Ekologiya cheloveka*. 2019; (9): 4–14. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-9-4-14> <https://elibrary.ru/wswngj> (in Russian)
23. Tuček M., Bencko V., Volný J., Petanová J. A contribution to the health risk assessment of exposure to exhaust gases in custom officers at border crossing. *Čes. Prac. Lék.* 2006; 7(2): 76–83. (in Czech)

Сведения об авторах

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

Журба Ольга Михайловна, доктор биол. наук, вед. науч. сотр., зав. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: zhurba99@gmail.com

Алексеенко Антон Николаевич, канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: alexeenko85@mail.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

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

Olga M. Zhurba, DSc (Biology), leading researcher, head, Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9961-6408> E-mail: zhurba99@gmail.com

Anton N. Alekseenko, PhD (Chemistry), senior researcher, Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4980-5304>, e-mail: alexeenko85@mail.ru

Alexey V. Merinov, PhD (Biology), researcher, Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, 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