

УДК 613.63; 57.044

БИОМОНИТОРИНГ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ НАГРУЗКИ

Ларионова Т.К.¹, Даукаев Р.А.¹, Иващенко М.А.², Артёменко Е.П.², Адиева Г.Ф.¹,
Аллаярова Г.Р.¹, Зеленковская Е.Е.¹

¹ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека»,
Уфа, Россия

²ФБУН «Екатеринбургский медицинский - научный центр профилактики и
охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора,
Екатеринбург, Россия

Определение микроэлементов в биологических средах человека является одним из наиболее информативных подходов к оценке техногенной химической нагрузки. Биомониторинг отражает фактически поступившую в организм дозу вещества и позволяет учитывать сочетанное воздействие производственных, экологических и индивидуальных факторов.

Цель исследования: обоснование информативности определения металлов в различных биологических средах работников, занятых во вредных условиях труда, как метода биоиндикации антропогенной нагрузки и элемента социально-гигиенического мониторинга.

Материалы и методы. Работа выполнена как обзорно-аналитическое исследование с использованием материалов комплексного обследования территории с выраженной техногенной нагрузкой ртутью и производства получения свинца из вторичного сырья, а также результатов определения металлов в различных биологических средах работников, занятых во вредных условиях труда на данных предприятиях. Определение металлов выполнено методами атомно-абсорбционной спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Результаты. В условиях длительного загрязнения производственной и окружающей среды ртуть выявлялась практически во всех изученных биосредах: крови, моче, волосах, ногтях, слюне, зубах и грудном молоке. Это подтверждает возможность использования многосредового подхода для оценки как профессиональной, так и экологической составляющих риска. В производственной зоне ртуть выступала ведущим вредным химическим фактором, а в окружающей среде формировала дополнительную нагрузку через

атмосферный воздух, питьевую воду и пищевые цепи. Результаты определения металлов в крови и моче работников производства свинца из вторичного сырья демонстрируют возможность выявления не только ведущего токсиканта, но и сопутствующего микроэлементного дисбаланса.

При проведении биологического мониторинга наиболее оперативными субстратами являются кровь и моча. Кровь позволяет оценивать циркулирующую фракцию металла, поступившую в организм в относительно недавний период, а моча отражает выведение металла и функциональную вовлеченность выделительной системы. Для ряда металлов, например, ртути и кадмия моча может быть более чувствительным показателем хронического поступления и выведения. Вместе с тем отсутствие тесной связи между кровью и мочой возможно, поскольку эти среды отражают разные этапы токсикокинетики. Волосы и ногти обладают иной диагностической логикой: они накапливают металлы и сохраняют информацию о воздействии дольше, чем кровь. Это делает их удобными для массовых скрининговых обследований и ретроспективного анализа. Волосы неинвазивны, просты в отборе и транспортировке, а также могут применяться как архивный материал. Ногти характеризуются большей стабильностью содержания некоторых элементов и могут использоваться для оценки более длительной нагрузки. Зубы и слюна имеют значение при специальных задачах, связанных с депонированием металлов и оценкой их циркуляции в организме.

Заключение. Биомониторинг металлов необходимо проводить дополнительно к контролю воздуха рабочей зоны в тех случаях, когда требуется оценить фактически поглощённую дозу вещества, учесть поступление металла различными путями, проверить эффективность средств индивидуальной защиты, охарактеризовать длительное или неравномерное воздействие, расследовать аварийную ситуацию, либо объяснить несоответствие между результатами контроля производственной среды и состоянием работников. Решение о его проведении должно приниматься отдельно для каждого металла с учётом его токсикокинетики, информативности используемой биологической среды, возможных непроизводственных источников и наличия критериев интерпретации.

Ключевые слова: биомониторинг, вредные условия труда, тяжелые металлы, биологические среды, социально-гигиенический мониторинг

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Иващенко М.А., Артёменко Е.П., Адиева Г.Ф., Аллаярова Г.Р., Зеленковская Е.Е. Биомониторинг металлов в условиях производственной нагрузки. Медицина труда и экология человека. 2026; 3: 208-227.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10311>

Для корреспонденции: Татьяна Кенсариновна Ларионова, e-mail: larionovatk@yandex.ru

BIOMONITORING OF METALS UNDER CONDITIONS OF PRODUCTION STRESS

Larionova T.K.¹, Daukayev R.A.¹, Ivashchenko M.A.², Artemenko E.P.², Adieva G.F.¹, Allayarova G.R.¹, Zelenkovskaya E.E.¹

¹ Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

² Yekaterinburg Medical Research Center for the Prevention and Protection of Workers' Health in Industrial Enterprises of Rospotrebnadzor, Yekaterinburg, Russia

The determination of trace elements in human biological media is one of the most informative approaches to assessing anthropogenic chemical exposure. Biomonitoring reflects the actual dose of a substance that has entered the body and makes it possible to take into account the combined effect of occupational, environmental, and individual factors. The purpose of study

The purpose of study is to substantiate the informativeness of determining metals in various biological media of workers engaged in hazardous working conditions as a method of bioindication of anthropogenic exposure and an element of socio-hygienic monitoring.

Materials and methods. The work was carried out as a review and analytical study using materials from a comprehensive survey of the territory with a pronounced anthropogenic load of mercury and the production of lead from secondary raw materials, as well as the results of determining metals in various biological media of workers employed in hazardous working conditions at these enterprises. The determination of metals was carried out using atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry.

Results. Under conditions of prolonged contamination of the production and environmental environment, mercury was detected in almost all the studied biological media: blood, urine, hair, nails, saliva, teeth, and breast milk. This confirms the possibility of using a multi-media approach to assess both occupational and environmental risk components. In the production zone, mercury acted as the leading harmful chemical factor, while in the environment it created an additional load through atmospheric air, drinking water, and food chains. The results of determining metals in the blood and urine of workers in the lead production industry using secondary raw materials demonstrate the possibility of identifying not only the main toxicant but also the accompanying trace element imbalance..

When conducting biological monitoring, the most responsive substrates are blood and urine. Blood allows for the assessment of the circulating fraction of the metal that entered the body in a relatively recent period, while urine reflects the excretion of the metal and the functional involvement of the excretory system. For a number of metals, including mercury and cadmium, urine may be a more sensitive indicator of chronic exposure and excretion. At the same time, the absence of a close relationship between blood and urine is possible, since these media reflect different stages of toxicokinetics. Hair and nails have a different diagnostic logic: they accumulate metals and retain information about exposure longer than blood. This makes them convenient for mass screening examinations and retrospective analysis. Hair is non-invasive, easy to collect and transport, and can also be used as an archival material. Nails are characterized by greater stability of the content of certain elements and can be used to assess longer-term exposure. Teeth and saliva are important in special tasks related to the deposition of metals and the assessment of their circulation in the body.

Conclusion. Biomonitoring of metals should be carried out in addition to monitoring the air in the work area in cases where it is necessary to assess the actual absorbed dose of the substance, take into account the intake of the metal through various routes, verify the effectiveness of personal protective equipment, characterize prolonged or uneven exposure, investigate an emergency situation, or explain the discrepancy between the results of monitoring the production environment and the health status of workers. The decision to carry it out should be made separately for each metal, taking into account its toxicokinetics, the informativeness of the biological medium used, possible non-production sources, and the availability of interpretation criteria.

Keywords: biomonitoring, harmful working conditions, heavy metals, biological environments, social and hygienic monitoring

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding: the study had no sponsorship.

For citation: Larionova T.K., Daukayev R.A., Ivashchenko M.A., Artemenko E.P., Adieva G.F., Allayarova G.R., Zelenkovskaya E.E. Biomonitoring of metals under occupational stress conditions. Occupational Health and Human Ecology. 2026; 3: 208-227.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10311>

For correspondence: Tatyana K. Larionova , e-mail: larionovatk@yandex.ru

Тяжелые металлы и близкие к ним по токсикологической значимости элементы относятся к числу приоритетных загрязнителей производственной и окружающей среды. Их источниками являются предприятия цветной и черной металлургии, горнодобывающей промышленности, энергетики, нефтехимии, переработки вторичного сырья и отходов [1-4]. Особое значение для медицины труда имеют металлы с высокой способностью к кумуляции, поливалентным токсическим действием и возможностью длительного сохранения в биологических тканях: ртуть, свинец, кадмий, мышьяк, никель, хром и ряд других элементов [5-7].

Гигиенический контроль воздуха рабочей зоны позволяет определить потенциальную внешнюю экспозицию, однако не отражает полностью фактическое поступление металла в организм. Внутренняя доза зависит от фракционного состава аэрозоля, пути поступления, продолжительности воздействия, эффективности средств индивидуальной защиты, особенностей питания, состояния обмена веществ и индивидуальной чувствительности. Поэтому определение металлов в биологических средах работников является важной частью оценки условий труда, значимым звеном медицинского наблюдения, оценки риска и профилактики профессиональных заболеваний [8-10].

Измерение концентраций тяжёлых металлов в крови и моче позволяет оценить индивидуальную дозу воздействия, выявить ранние изменения до появления клинических симптомов и скорректировать технологический процесс и способ защиты работников.

Биологические среды неравнозначны по диагностической информативности. Кровь характеризует преимущественно циркулирующую дозу и недавнее воздействие; моча отражает выведение металлов и состояние выделительных механизмов; волосы и ногти могут использоваться для оценки более длительного

накопления и ретроспективного скрининга; слюна, зубы и грудное молоко применимы в специальных задачах, связанных с оценкой депонирования, обмена и передачи токсикантов. В условиях воздействия ртути, свинца, кадмия и других кумулирующих элементов анализ только одной биосреды часто недостаточен, так как не позволяет различить текущую, хроническую и остаточную нагрузку.

Значимость биомониторинга возрастает при аварийных ситуациях, несовершенстве технологических процессов, изменении состава сырья, переработке отходов и наличии одновременно производственного и экологического источников поступления металлов. В таких условиях биологические среды позволяют оценить не только факт контакта с загрязнителем, но и реальную степень его включения в обменные процессы организма.

Цель исследования. Обосновать информативность определения металлов в различных биологических средах работников, занятых во вредных условиях труда, как метода биоиндикации антропогенной нагрузки и элемента социально-гигиенического мониторинга.

Материалы и методы. Работа выполнена как обзорно-аналитическое исследование с использованием материалов комплексного эколого-гигиенического обследования территории с выраженной техногенной нагрузкой и производственного контингента, занятого во вредных условиях труда. Рассматривалась система «производственная среда - окружающая среда - биологические среды человека», что позволило оценить поступление металлов не только по концентрациям во внешних объектах, но и по их фактическому содержанию в организме.

В анализ включены данные о загрязнении воздуха рабочей зоны, атмосферного воздуха, питьевой воды, почвы и пищевых продуктов, а также результаты определения макро- и микроэлементов в крови, моче, волосах, ногтях, зубах и слюне.

В качестве модельного металла для оценки возможностей биоиндикации рассматривалась ртуть, поскольку она характеризуется высокой токсичностью, кумулятивными свойствами, способностью к миграции по пищевым цепям и сочетанием производственных и экологических путей поступления [11, 12].

Для прикладной иллюстрации использован фрагмент исследования содержания химических элементов в крови и моче работников металлургического цеха

предприятия по производству свинца из вторичного сырья. Основная группа обследованных включала плавильщиков, группа сравнения была представлена работниками других подразделений предприятия.

Определение металлов в биологических материалах и объектах среды обитания выполнено методами атомно-абсорбционной спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Ключевые моменты анализа - единообразие пробоподготовки, учет матрицы биосубстрата, а также сопоставление результатов с профессиональными, популяционными и лабораторными референсными уровнями.

Результаты представлены в виде среднего арифметического значения и ошибки среднего ($M \pm m$). Для межгрупповых сравнений применялись критерий Краскела-Уоллиса и U-критерий Манна-Уитни; различия считались статистически обусловленными при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение. В условиях длительного загрязнения производственной и окружающей среды ртуть выявлялась практически во всех изученных нами биосредах: крови, моче, волосах, ногтях, слюне, зубах и грудном молоке. Это подтверждает возможность использования многосредового подхода для оценки как профессиональной, так и экологической составляющих риска. В производственной зоне ртуть выступала ведущим вредным химическим фактором, а в окружающей среде формировала дополнительную нагрузку через атмосферный воздух, питьевую воду и пищевые цепи.

На начальном этапе наблюдения в период чрезвычайной экологической ситуации содержание ртути в крови рабочих фабрики и жителей поселка было максимальным. У значительной части обследованных концентрации превышали допустимые уровни, а у работников производственного объекта средний уровень ртути в крови оставался в течение длительного времени на уровне $66,39 \pm 7,17$ мкг/дм³.

В моче ртуть обнаружена у всех обследованных в диапазоне 1,03 – 12,10 мкг/дм³ при среднем уровне $4,42 \pm 0,68$ мкг/дм³. У 68,75 % обследованных значения находились в пределах физиологически допустимого уровня (до 5 мкг/дм³), у 12,5% - в зоне критических значений (7,5 - 15,0 мкг/дм³), выше критического уровня ртуть в моче не выявлялась. Выраженная связь между содержанием ртути в крови и моче отсутствовала, что подтверждает необходимость одновременного анализа нескольких биологических сред.

Концентрации ртути в волосах работников колебались в диапазоне от 10,0 до 1407,5 мкг/кг, при среднем значении $297,15 \pm 59,86$ мкг/кг. Выявлена прямая корреляционная связь средней силы между концентрациями металла в волосах и крови ($r = 0,58$).

В зубах концентрация ртути составляла 9,89 – 174,05 мкг/кг, при среднем значении $68,72 \pm 16,71$ мкг/кг, в слюне $0,74 \pm 0,18$ мкг/дм³. Между содержанием ртути в крови и слюне выявлена высокая корреляционная зависимость ($r=0,86$), что указывает на потенциальную информативность слюны при специальных задачах биомониторинга.

После локализации в поселке источников загрязнения снижение ртути в биосредах происходило неодинаково: в крови содержание уменьшалось быстрее, в волосах - медленнее, а в ногтях металл сохранялся наиболее устойчиво. За два месяца содержание ртути в крови снизилось в 7,7 раза, в волосах в 2,4 раза, в ногтях примерно в 1,4 раза.

В таблице 1 представлены основные результаты определения ртути в биологических средах работников при хронической интоксикации.

Таблица 1. Основные результаты определения ртути в биологических средах работников производственного объекта

Table 1. Main results of mercury determination in biological media of industrial facility workers

Показатель	Результат	Интерпретация
Hg в крови	0,27 - 129,75 мкг/дм ³	профессиональная нагрузка
Hg в волосах	10,0 - 1407,5 мкг/кг	профессиональная нагрузка
Hg в моче	1,03 – 12,10 мкг/дм ³	выведение и циркуляция
Hg в зубах	9,89 – 174,05 мкг/кг	долговременное депонирование
Кровь - слюна	$r=0,86$	связь биосред

Кровь - волосы	$r = 0,58$	связь биосред
Снижение в крови	в 7,7 раза	быстрая динамика
Снижение в волосах	в 2,4 раза	средняя динамика
Снижение в ногтях	в 1,4 раза	архивный субстрат

Расчет биологической дозы ртути показал, что для работников производственного объекта основным путем поступления являлся ингаляционный. При усвоении около 80% паров неорганической ртути суточное поступление с воздухом составляло около 0,202 мг, с пищей - 0,006 мг, с водой - 0,001 мг, в сумме это соответствовало около 0,209 мг в сутки. В структуре суммарного техногенного риска у промышленных рабочих доля собственно производственной среды составляла около 70 %, а экологическая составляющая - 21,1 – 35,2 % в зависимости от периода наблюдения и режима работы предприятия.

После остановки производства и замены источника водоснабжения содержание ртути в биосредах снизилось, что подтверждает связь биомаркеров с фактическим поступлением металла. После возобновления работы предприятия содержание ртути в крови работающих вновь стало нарастать, увеличившись с 0,50 до 15,45 мкг/дм³. Несмотря на то, что средний уровень не превышал максимально допустимых значений, у части обследованных риск оставался значимым. Это показывает, что биомониторинг чувствителен не только к аварийным эпизодам, но и к изменению режима технологического процесса.

Определение металлов в крови и моче работников металлургического производства, связанного с переработкой вторичного свинец-содержащего сырья, подтвердило практическое значение биомониторинга (таблица 2).

Таблица 2. Содержание химических элементов (Pb, Sr, Zn) в биосредах работников металлургического производства

Table 2. Content of chemical elements (Pb, Sr, Zn) in biological media of metallurgical production workers

Показатель	Основная группа	Группа сравнения
Содержание Pb в крови, мкг/дм ³	382,11±39,80	22,63±7,01
Содержание Pb в моче, мкг/дм ³	50,54±10,02	1,79±1,37
Содержание Sr в крови, мкг/дм ³	15,10±1,86	10,53±4,27
Содержание Zn в моче, мкг/дм ³	206,28±49,77	549,64±241,53

Наиболее выраженные различия установлены по свинцу. Уровень свинца в крови рабочих основной группы превышал соответствующий показатель группы сравнения в 17 раз; различия статистически обусловлены ($H=18,59$; $p<0,001$).

Содержание свинца в моче у работников основной группы было в 5,46 раза выше показателя группы сравнения. Для межгрупповых различий также установлена статистическая обусловленность ($H=9,77$; $p=0,01$). Одновременно отмечалось снижение уровня цинка в моче обследованных основной группы, что может отражать нарушение обмена эссенциальных элементов на фоне свинцовой нагрузки. Содержание стронция, также входящего в состав производственной пыли, в крови работников основной группы было значимо выше, чем в группе сравнения.

Результаты определения свинца, стронция и цинка в крови и моче работников металлургического производства демонстрируют возможность выявления не только ведущего токсиканта, но и сопутствующего микроэлементного дисбаланса.

Проведенный при периодическом медицинском осмотре работников предприятия лабораторный анализ наиболее чувствительных к свинцовой интоксикации показателей подтвердил специфические симптомы воздействия металла: снижение содержания гемоглобина в крови у 20,8 % работников и повышение уровня δ -аминолевулиновой кислоты в моче у 43,6 %. Кроме того, у 24,3 % обследованных выявлена эссенциальная гипертензия, у 33,0 % - заболевания

костно-мышечной системы и соединительной ткани, которые также могут быть вызваны длительным воздействием свинца.

Полученные данные позволяют рассматривать определение металлов в биосредах как самостоятельный и необходимый компонент гигиенической оценки вредных условий труда. По сравнению с анализом воздуха рабочей зоны биомониторинг обладает принципиальным преимуществом: он отражает не потенциальную, а фактически реализованную внутреннюю нагрузку, однако в большинстве случаев на предприятиях ограничиваются только измерением концентрации металлов в воздухе. Биомониторинг особенно важен при сочетанном воздействии нескольких путей поступления - ингаляционного, перорального и контактного.

В таблице 3 приведены литературные примеры связи загрязнения воздуха рабочей зоны свинцом и ртутью с содержанием металлов в биосредах человека.

Таблица 3. Содержание свинца и ртути в воздухе рабочей зоны и биосредах работников

Table 3. The content of lead and mercury in the air of the work area and the biological environment of workers

Производство	Содержание металла в воздухе	Уровень металла в крови работников	Уровень металла в моче работников
Свинец			
Аккумуляторный завод, Иран [13]	$0,30 \pm 0,02$ мг/м ³	559,5 мкг/дм ³	–
Аккумуляторный завод, Япония [14]	$0,007 \pm 0,004$ мг/м ³	$102,0 \pm 40,0$ мкг/дм ³	–
Ртуть			
Завод «Каустик» [3]:	$0,005 - 0,008$ мг/м ³	$29,20 \pm 11,82$	–

вакуумная выпарка		мкг/дм ³	
электролиз	0,025–0,046 мг/м ³	49,24±4,48 мкг/дм ³	26,93±5,62 мкг/дм ³
регенерация	0,020–0,075 мг/м ³	81,40±14,1 мкг/дм ³	30,4±5,8 мкг/дм ³

При производстве аккумуляторов содержание свинца в воздухе рабочей зоны на одном предприятии было 0,30 мг/м³, уровень в крови работников составлял 559,5 мкг/дм³ [13], в аналогичном производстве, со значительно меньшим содержанием металла в воздухе (0,007 мг/м³), в крови его концентрация также ниже (102,0 ± 40,0 мкг/дм³) [14]. В процессе амальгамирования максимальное содержание ртути в воздухе рабочей зоны превышало ПДК_{сс} в 10 раз - 0,05 мг/м³, что приводило к значительному росту содержания металла в крови (49,24 ± 4,48 мкг/дм³) и моче (26,93 ± 5,62 мкг/дм³) [3].

Связь между содержанием металлов в производственной среде и их уровнем в биосредах работников подтверждает значение биомониторинга для оценки профессионального риска. В зарубежной практике биологический мониторинг закреплён в стандартах OSHA по свинцу и кадмию, в биологических индексах ACGIH и в европейских подходах к контролю канцерогенов и мутагенов [15-18].

Отдельное значение имеет внеплановый биомониторинг при авариях, нарушениях технологического процесса, изменении сырья или запуске оборудования после реконструкции. Пример ртутного загрязнения показывает, что смена режима работы предприятия сопровождалась изменением содержания ртути не только в биосредах работников, но и населения. Следовательно, биомониторинг должен применяться не только как плановый медицинский контроль, но и как инструмент оценки последствий технологических инцидентов и эффективности проведенных профилактических мероприятий.

Приведенные данные по металлургическому производству показывают, что анализ крови и мочи работников остается наиболее доступным методом выявления внутренней нагрузки металлами в условиях промышленного производства. Однако эти данные не должны подменять более широкий подход:

при длительном воздействии и при необходимости ретроспективной оценки целесообразно дополнять кровь и мочу анализом волос и ногтей.

Комплексный анализ научных данных показал, что каждая биологическая среда имеет собственное значение и преимущества для оценки воздействия химических элементов (таблица 4).

Таблица 4. Информативность биологических сред при определении химических элементов

Table 4. Informative value of biological media in the determination of chemical elements

Биологическая среда	Преимущество использования	Что отражает	Основное применение
Кровь	Оперативность	Циркулирующая доза	Недавнее воздействие (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Zn)
Моча	Неинвазивный отбор	Выведение металла	Биомониторинг (Cd, Hg, As, Cr, Cu)
Волосы	Длительное хранение	Накопленная нагрузка	Скрининг и ретроспектива
Ногти	Стабильность	Длительная нагрузка	Дополнительный архивный субстрат
Слюна	Простота отбора	Связь с циркуляцией	Специальные исследования
Зубы	Депонирование	Долговременное накопление	Ретроспективная оценка

Наиболее оперативными субстратами являются кровь и моча. Кровь позволяет оценивать циркулирующую фракцию металла, поступившую в организм в

относительно недавний период, а моча отражает выведение металла и функциональную вовлеченность выделительной системы. Для ряда металлов, включая ртуть и кадмий, моча может быть более чувствительным показателем хронического поступления и выведения. Вместе с тем отсутствие тесной связи между кровью и мочой возможно, поскольку эти среды отражают разные этапы токсикокинетики.

Волосы и ногти обладают иной диагностической логикой: они накапливают металлы и сохраняют информацию о воздействии дольше, чем кровь. Это делает их удобными для массовых скрининговых обследований и ретроспективного анализа. Волосы неинвазивны, просты в отборе и транспортировке, а также могут применяться как архивный материал. Ногти характеризуются большей стабильностью содержания некоторых элементов и могут использоваться для оценки более длительной нагрузки. Зубы и слюна имеют значение при специальных задачах, связанных с депонированием металлов и оценкой их циркуляции в организме.

Заключение. Биомониторинг металлов необходимо проводить дополнительно к контролю воздуха рабочей зоны в тех случаях, когда требуется оценить фактически поглощённую дозу вещества, учесть поступление металла различными путями, проверить эффективность средств индивидуальной защиты, охарактеризовать длительное или неравномерное воздействие, расследовать аварийную ситуацию, либо объяснить несоответствие между результатами контроля производственной среды и состоянием работников. Решение о его проведении должно приниматься отдельно для каждого металла с учётом его токсикокинетики, информативности используемой биологической среды, возможных непроизводственных источников и наличия критериев интерпретации.

Список литературы:

1. Шилов В.В., Никанов А.Н., Ковшов А.А., Баринев В.А., Гудков А.Б., Ермолин С.П. Токсиколого-гигиеническая характеристика воздуха рабочей зоны производства цветных металлов. *Медицина труда и промышленная экология*. 2025; 65(5): 326-332. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-5-326-332>.
2. Абдрахманова Е.Р., Гимранова Г.Г., Репина Э.Ф., Ахметшина В.Т., Бейгул Н.А., Газизова Н.Р., и др. Влияние производственных факторов на формирование здоровья работников металлургического производства. *Медицина труда и экология человека*. 2025; 3: 6-21. <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10301>.

3. Шаяхметов С.Ф., Лисецкая Л.Г., Мещакова Н.М. Оценка загрязнения воздуха рабочей зоны ртутью и содержания её в биосредах у работников производства каустика и хлора /*Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН*, 2010; 4(74): 59-63.
4. Еремейшвили А.В., Крылова П.П. Содержание тяжёлых металлов в биосубстратах работников нефтехимической промышленности. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(5): 568-571. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-568-571> <https://elibrary.ru/qlawlf/>
5. Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M., editors. *Handbook on the Toxicology of Metals*. 5th ed. London: Academic Press; 2022.
6. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol*. 2014; 7(2): 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>.
7. Скальный А.В., Рудаков И.А. Биоэлементы в медицине. – М.: Издательский дом «ОНИКС: 21 век: Мир, 2004. - 272 с.
8. Морозов Д.Ю. Биомониторинг человека как метод оценки воздействия факторов химической природы на работников судоремонтной и судостроительной отрасли. *Морская медицина*. 2021; 7(2): 69-79. <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-2-69-79>
9. Зибарев Е.В., Эллинген Д.Г., Томассен И., Чащин В.П., Чащин М.В., Кузьмин А.В. Биологический мониторинг как способ управления профессиональными рисками. *Уральский медицинский журнал*. 2011; 9(87): 16-18.
10. Angerer J., Ewers U., Wilhelm M. Human biomonitoring: state of the art. *Int J Hyg Environ Health*. 2007; 210(3–4): 201-228. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.01.024>.
11. Ильченко И.Н. Обзор исследований по оценке воздействия ртути на население в постсоветских странах с использованием данных биомониторинга человека. *Здравоохранение Российской Федерации*. 2015; 59 (1): 48-53.
12. Гладышев В.Б. Токсичные свойства ртути и ее влияние на организм животных и человека. *The Scientific Heritage*. 2021; 81(2): 16-22. <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-81-2-16-22> <https://elibrary.ru/mxseab>.
13. Ghobakhloo S, Mostafaii GR, Mehravar F, Javady Moghadam Z, Ghobakhloo Z, Miranzadeh MB. Biomonitoring of occupational lead exposure in a lead-acid batteries factory. *Clin Cancer Investig J*. 2022. Available from: <https://ccij-online.org/storage/files/article/95e54b0b-1536-4bd9-9faa-b0867e90e4f2-7bdjl9mJzPK7JJOG/33-ccl.pdf>
14. Ono A, Horiguchi H. Relationship between personal-sampled air lead and blood lead in low-lead-exposure workers in Japan to apply multiple regression models determining

permissible air lead concentration. *J Occup Health*. 2021; 63(1): e12264. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12264>.

15. Occupational Safety and Health Administration. 29 CFR 1910.1025: Lead. Washington (DC): OSHA.

16. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Blood lead level guidance. Atlanta: CDC; 2024.

17. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati: ACGIH; 2024.

18. European Parliament and Council. Directive 2004/37/EC on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens or mutagens at work. *Official Journal of the European Union*. 2004.

References:

1. Shilov V.V., Nikanov A.N., Kovshov A.A., Barinov V.A., Gudkov A.B., Ermolin S.P. Toxicological and hygienic characteristics of air in the working zone of non-ferrous metals production. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2025; 65(5): 326-332. (In Russ.) <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2025-65-5-326-332>.

2. Abdrakhmanova E.R., Gimranova G.G., Repina E.F., Akhmetshina V.T., Beigul N.A., Gazizova N.R., et al. The influence of production factors on the formation of the health of workers in metallurgical industries, preventive measures. *Occupational Health and Human Ecology*. 2025; 3: 6-21. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10301>.

3. Shayakhmetov S.F., Lisetskaya L.G., Meshakova N.M. Assessments of air pollution with mercury in working zone And its content in biomaterials of employees at the caustic and chlorine production. *Bulletin of the East Siberian Scientific Center of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2010; 4(74): 59-63. (In Russ.)

4. Ereimeyshvili A.V., Krylova P.P. Influence of occupational factors on the content of heavy metals in biosubstrates in petrochemical industry workers. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(5): 568-571. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-568-571> <https://elibrary.ru/qlawlf>.

5. Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M., editors. *Handbook on the Toxicology of Metals*. 5th ed. London: Academic Press; 2022.

6. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol*. 2014; 7(2): 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>.

7. Skalnyi A.V., Rudakov I.A. Bioelements in medicine. Moscow: ONYX Publishing House: 21st century: Mir Publ., 2004. - 272 p. (In Russ.)
8. Morozov D.Yu. Human biomonitoring as a method for assessing the impact of chemical factors on workers of the ship repair and shipbuilding industry. *Marine medicine*. 2021; 7(2): 69-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-2-69-79>.
9. Zibarev E.V., Ellingsen D.G., Thomassen Y., Chashchin V.P., Chashchin M.V., Kuzmin A.V. Biological monitoring as method occupational risks assessment. *Ural Medical Journal*. 2011; 9(87): 16-18. (In Russ.)
10. Angerer J., Ewers U., Wilhelm M. Human biomonitoring: state of the art. *Int J Hyg Environ Health*. 2007; 210(3-4): 201-228. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.01.024>.
11. Ilchenko I.N. Review of studies on assessing the impact of mercury on the population in post-Soviet countries using human biomonitoring data. *Health Care of the Russian Federation*. 2015; 59(1): 48-53 (In Russ.)
12. Gladyshev V. B. Toxic properties of mercury and its effect on the organisms of animals and humans. *The Scientific Heritage*. 2021; 81(2): 16-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-81-2-16-22> <https://elibrary.ru/mxseab>
13. Ghobakhloo S, Mostafaii GR, Mehravar F, Javady Moghadam Z, Ghobakhloo Z, Miranzadeh MB. Biomonitoring of occupational lead exposure in a lead-acid batteries factory. *Clin Cancer Investig J*. 2022. Available from: <https://ccij-online.org/storage/files/article/95e54b0b-1536-4bd9-9faa-b0867e90e4f2-7bdjl9mJzPK7JJOG/33-ccl.pdf>
14. Ono A, Horiguchi H. Relationship between personal-sampled air lead and blood lead in low-lead-exposure workers in Japan to apply multiple regression models determining permissible air lead concentration. *J Occup Health*. 2021; 63(1): e12264. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12264>.
15. Occupational Safety and Health Administration. 29 CFR 1910.1025: Lead. Washington (DC): OSHA.
16. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Blood lead level guidance. Atlanta: CDC; 2024.
17. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati: ACGIH; 2024.
18. European Parliament and Council. Directive 2004/37/EC on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens or mutagens at work. *Official Journal of the European Union*. 2004.

Вклад авторов: Ларионова Т.К., Иващенко М.А. – разработка концепции и дизайна исследования, написание текста; Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Иващенко М.А., Артеменко Е.П., Адиева Г.Ф. – сбор и обработка материала, выполнение анализов; Аллаярова Г.Р., Зеленковская Е.Е. – статистическая обработка данных; Ларионова Т.К., Даукаев Р.А. – научное редактирование. Все авторы утвердили окончательную версию статьи.

Author contribution: Larionova T.K., Ivashchenko M.A. – development of the concept and design of research, writing the text; Larionova T.K., Daukaev R.A., Ivashchenko M.A., Artemenko E.P., Adieva G.F. – collection and processing of material, performing analyses; Allayarova G.R., Zelenkovskaya E.E. – statistical data processing; Larionova T.K., Daukaev R.A. – scientific editing. All the authors have approved the final version of the article. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Информация об авторах:

Ларионова Татьяна Кенсариновна - к.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: larionovatk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9754-4685>.

Даукаев Рустем Аскарлович - к.б.н., заведующий химико-аналитическим отделом ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: ufa.lab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0421-4802>.

Иващенко Максим Андреевич - научный сотрудник ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, ул. Попова, д. 30, г. Екатеринбург, 620014, Россия; e-mail: ivachenko@ymrc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1253-3202>

Артёменко Елизавета Павловна - научный сотрудник ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, ул. Попова, д. 30, г. Екатеринбург, 620014, Россия; e-mail: artemenkoe@ymrc.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0125-0063>

Адиева Гюзелия Фаритовна – к.б.н., старший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии

человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: agyzelia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2377-3471>

Аллаярова Гузель Римовна - к.б.н., старший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: guzel-all@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0838-3598>.

Зеленковская Евгения Евгеньевна - младший научный сотрудник химико-аналитического отдела ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», ул. Степана Кувыкина, д. 94, г. Уфа, 450106, Россия; e-mail: evgeniazelenkovskaya@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7682-2703>.

Author information:

Tatyana K. Larionova - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Chemical and Analytical Department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: larionovatk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9754-4685>.

Maksim A. Ivashchenko, Head of the Department of Information Analysis, Researcher, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers; E-mail: ivachenko@ymrc.ru; ORCID iD: 0000-0003-1253-3202.

Rustem A. Daukaev - Candidate of Biological Sciences, Head of the Chemical and Analytical Department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: ufa.lab@yandex.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-0421-4802> .

Elizaveta P. Artemenko - Researcher at the Yekaterinburg Medical Research Center for the Prevention and Health Protection of Industrial Workers, Rospotrebnadzor, 30 Popova St., Yekaterinburg, 620014, Russia; e-mail: artemenkoep@ymrc.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0125-0063>

Guzelia F. Adieva – PhD in Biology, Senior Researcher at the Chemical and Analytical Department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: agyzelia@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0003-2377-3471>

Guzel R. Allayarova - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Chemical and Analytical Department of the Ufa Research Institute of Occupational

Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: guzel-all@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-0838-3598>

Evgeniya E. Zelenkovskaya, Junior Researcher at the Chemical Analytical Institute Department of the Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, 94 Stepan Kuvykin St., Ufa, 450106, Russia; e-mail: evgeniazelenkovskaya@yandex.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-7682-2703>

Поступила/Received: 18.08.2026

Принята в печать/Accepted: 28.08.2026