



Лысенко А.А.

Гигиенические и биохимические аспекты влияния ртути на организм человека (обзор литературы)

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия

РЕЗЮМЕ

В современном мире на фоне высоких темпов индустриализации и экономического прогресса обостряются проблемы экологической безопасности, в том числе промышленного загрязнения ртутью объектов окружающей среды, которое оказывает негативное влияние на здоровье населения. Основные механизмы влияния ртути на организм человека исследованы, однако необходимо дальнейшее изучение воздействия низких доз токсиканта в отдалённом периоде наблюдения.

Проведён анализ литературы по базам данных Scopus, Web of Science, MedLine, SpringerLink, Sciencedirect.

Заключение. В мире известны случаи, когда экологические катастрофы, вызванные глобальными загрязнениями, становились причиной непоправимого вреда здоровью человека. На современном этапе развития промышленности остаётся актуальным антропогенное загрязнение ртутью объектов среды обитания. На первое место выходит опасность хронического воздействия низких доз токсиканта, которое требует дальнейшего изучения для выработки профилактических мер по нивелированию влияния на здоровье населения.

Ключевые слова: ртуть; хроническое воздействие; влияние ртути на организм; обзор

Для цитирования: Лысенко А.А. Гигиенические и биохимические аспекты влияния ртути на организм человека (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2024, 103(11): 1447–1451. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1447-1451> <https://elibrary.ru/jfebym>

Для корреспонденции: Лысенко Анастасия Анатольевна, e-mail: doc.anastasia07.07.90@gmail.com

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 23.08.2024 / Поступила после доработки: 27.09.2024 / Принята к печати: 19.11.2024 / Опубликовано: 17.12.2024

Anastasia A. Lysenko

Hygienic and biochemical aspects of the effect of mercury on the human body (literature review)

East Siberian Institute of Medical and Environmental Research, Angarsk, 665826, Russian Federation

ABSTRACT

In the modern world, against the background of high rates of industrialization and economic progress, environmental safety problems are becoming more acute. The issues of industrial mercury pollution of environmental objects, which has adverse consequences for public health, are relevant. The main mechanisms of mercury impact on the human body have been identified, and further study of the effects of low doses of the toxicant over the long-term follow-up period is also necessary. The literature on the databases Scopus, Web of Science, MedLine, SpringerLink, Sciencedirect was analyzed.

Conclusion. There are cases in the world when environmental disasters caused by global pollution caused irreparable harm to human health. At the present stage of industrial development, the issues of anthropogenic mercury pollution of habitat objects remain relevant. The danger of chronic exposure to low doses of the toxicant comes to the fore, which also requires further study to develop preventive measures to offset the impact on public health.

Keywords: review; mercury; chronic exposure; the effect of mercury on the body

For citation: Lysenko A.A. Hygienic and biochemical aspects of the effect of mercury on the human body (literature review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2024; 103(11): 1447–1451. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1447-1451> <https://elibrary.ru/jfebym> (In Russ.)

For correspondence: Anastasia A. Lysenko, Angarsk, e-mail: doc.anastasia07.07.90@gmail.com

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

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: August 23, 2024 / Revised: September 27, 2024 / Accepted: November 19, 2024 / Published: December 17, 2024

Изучение влияния промышленного загрязнения ртутью на сегодняшний день не теряет актуальности. Острые и хронические производственные интоксикации изучены достаточно полно, но не до конца исследовано и оценено негативное воздействие ртути на население, проживающее в зоне экологического риска.

Выполнен анализ литературы по базам данных Scopus, Web of Science, MedLine, SpringerLink, Sciencedirect.

В современном мире развитие технологических процессов идёт ускоренными темпами. Однако есть и обратная сторона индустриального прогресса – пагубное влияние токсичных веществ на организм человека и экологию. Актуальной проблемой является загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами [1]. К антропогенным источникам поступления токсикантов относят выхлопные газы, твёрдые бытовые отходы, сточные воды предприятий, пестициды и удобрения [2, 3]. В результате население подвергается влиянию тяжёлых металлов через воздух, пищевые продукты и воду, а также при контакте токсичных веществ с кожей [2]. Металлы могут проявлять антагонизм и синергию в случае комплексного воздействия на организм, что создаёт сложности в установлении влияния того или иного токсиканта на структуру и уровень заболеваемости [2–4].

Согласно современной классификации, ртуть (Hg) относится к чрезвычайно токсичным веществам I-го класса опасности и входит, по данным Всемирной организации здравоохранения, в десятку самых опасных химических веществ, представляющих угрозу здоровью и жизни человека [5, 7]. Известно, что ртуть всегда присутствовала в окружающей среде как природный элемент, необходимый для поддержания баланса экосистем, однако беспокойство вызывают антропогенные источники её поступления в среду обитания. Эмиссия токсиканта в окружающую среду составляет 6500–8200 т в год, и только 4600–5300 т из этого количества поступает в результате естественных выбросов [6]. Несмотря на высокую токсичность и опасность для здоровья людей, ртуть и ртутные соединения по-прежнему используют во всём мире, поэтому необходимо разработать меры для сохранения здоровья населения, поддержания экосистемы и биогeoценоза [8].

Одним из самых известных исторических событий, связанных с ртутным загрязнением, стала экологическая катастрофа в Минамате (Япония). В середине XX века известной компанией Chisso были нарушены правила утилизации токсичных химических отходов, в результате чего они попали в море. Впоследствии ртутью были заражены основные продукты питания местного населения – рыба и морепродукты [9]. Это причинило непоправимый вред здоровью жителей. Прежде всего проявились неврологические последствия, которые наблюдались как у детей, так и у взрослых, в дальнейшем симптомокомплекс была названа болезнь Минамата [10]. Важно отметить, что болезнь имела как острые, так и хронические формы, которые наблюдались в отдалённом периоде. Для острой формы характерны такие проявления, как нарушения слуха и зрения, атаксия, дизартрия [11]. У части населения наблюдались психические изменения в виде перепадов настроения, снижения интеллекта, дисфункционального поведения. Также большую роль играл возраст жителей, особенно опасным было внутриутробное поражение плода [10]. При хронической форме болезни Минаматы симптомы проявлялись спустя некоторое время, и объясняется это накоплением метилртути в организме. Уровни ртути в волосах у таких пациентов не были высокими, но при этом сохранялся повышенный риск развития психических отклонений [6, 11]. Постановка диагноза была затруднена, и этот факт показал важность исследований влияния низких доз ртути на здоровье человека.

Трагедия Минаматы позволила осознать последствия недобросовестного отношения к необходимым мерам экологической безопасности, и в дальнейшем промышленных загрязнений таких масштабов удалось избежать. Однако до

сих пор сохраняется угроза заражения, речь идёт о хроническом воздействии низких доз токсиканта, и эта проблема стоит не менее остро [10]. Такому влиянию подвержены и лица группы риска (беременные женщины и дети), и взрослое население [5].

В некоторых странах идёт активная золотодобыча методом амальгамации, который является крайне токсичным и имеет неблагоприятные последствия для здоровья рабочих и экологии в целом. Однако высокие цены на драгоценные металлы и низкий уровень дохода заставляют людей идти на риск [5, 10]. Частная добыча полезных ископаемых – важное направление экономической деятельности в странах Африки, Азии, Южной Америки [5], при этом выбросы ртути составляют порядка 837,7 т в год [6]. Уже сейчас можно говорить о неблагоприятном воздействии на население, проживающее вблизи золотых приисков. Так, симптомы отравления метилртутью замечены у рыбаков бразильской Амазонии. Неврологические проявления у них также выходят на первый план: тремор, нарушение координации, равновесия. Часть территорий в Швеции и Финляндии загрязнена ртутью из-за деятельности предприятий целлюлозно-бумажной промышленности и других производств [12]. Во всём мире встречаются очаги антропогенного загрязнения ртутью, в связи с чем исследования в этой области актуальны, и их важной задачей является идентификация риска и выработка стратегии по разрешению неблагоприятной экологической ситуации.

Город Усолье-Сибирское Иркутской области – один из центров промышленного загрязнения в результате прежней хозяйственной деятельности ОАО «Усольехимпром», вследствие которой тонны ртути попали в окружающую среду [13]. В районах, оказавшихся под влиянием экологического бедствия, показатели заболеваемости населения были выше средних по Иркутской области. У жителей экспонированных территорий наблюдались вегетососудистые и нейроциркуляторные нарушения, судороги конечностей, тремор. Также проявлялись классические симптомы микромеркуриализма в виде снижения памяти, повышенной тревожности, нарушения логического мышления и других отклонений психической сферы [14].

Влияние ртути на организм человека определяется её химической формой. Этот тяжёлый металл существует в нескольких формах: элементарная ртуть, её органические и неорганические соединения [1]. Самая опасная и токсичная форма – метилртуть [15, 16]. Она образуется при биометилировании сульфатредуцирующими анаэробными водными бактериями и встречается чаще всего в водной среде [5, 17]. Однако скорость образования данного соединения ртути непостоянна и зависит, в частности, от температуры водной среды. Таким образом, изменение климата и повышение температуры воды приводят к ускорению процессов метилирования [2]. После попадания ртути в водоёмы происходит поэтапное заражение организмов: вначале фитопланктона и зоопланктона, затем рыбы, которая становится частью рациона человека [5, 15, 16].

Эмиссия токсиканта в почвенные слои негативно сказывается на химическом составе, физических и биологических свойствах грунта, снижая его плодородность и образуя участки химического загрязнения [5, 18]. В почве ртуть довольно устойчива и не только не разлагается, но накапливается в корнях и листьях растений, нанося большой вред здоровью человека при употреблении растительных продуктов, произрастающих на заражённой территории [1].

Для выявления опасных уровней токсиканта в пищевых цепях в настоящее время проводят мониторинг промысловых видов рыб и морепродуктов [2]. Следует отметить, что одним из основных путей попадания ртути в организм человека является потребление заражённых продуктов [19]. Этому способствует её высокая абсорбция в желудочно-кишечном тракте с последующим распределением и накоплением в органах-мишенях [15].

Известны и другие пути поступления токсиканта в организм человека. Ингаляционный путь (вдыхание паров ртути) зачастую реализуется при систематическом и длительном контакте с небольшими концентрациями, даже если они не превышают допустимых уровней [14]. В случае незначительного превышения предельно допустимой концентрации также возможно развитие ртутной интоксикации с неврологическими проявлениями вследствие поражения нервной системы [20].

Ещё один путь поступления токсиканта в организм человека — через кожу. Примером могут служить описанные в литературе случаи интоксикации вследствие использования ртутьсодержащих косметических средств [20, 21], в частности после применения кремов для осветления кожи. Эта проблема актуальна для некоторых стран Европы, США, Австралии, Африки [22]. Ртуть проникает в кровоток через эпидермис, железы кожи (потовые и сальные), волосяные фолликулы. Её абсорбция в данном случае определяется несколькими факторами. К ним относят целостность кожи, концентрацию токсиканта в косметическом средстве, жирорастворимость средства, частоту нанесения и др. [23–25]. Описаны также и случаи проглатывания крема после нанесения на кожу вокруг рта [21]. Ведущими симптомами интоксикации и в этих, и в других случаях являются признаки поражения нервной системы, а также нефротический синдром [21, 22].

Кумулятивные свойства ртути в организме более выражены в отношении органов-мишеней — печени, почек, головного мозга. При этом в почках Hg обнаруживается в форме неорганических соединений, в головном мозге — в метилированном виде. Элиминация токсиканта из организма осуществляется преимущественно через почки и желудочно-кишечный тракт [19, 21]. Для мониторинга и оценки воздействия ртути на организм человека используют биологические матрицы, такие как волосы, кровь, моча. В частности, концентрация метилртути в волосах отражает пищевой путь поступления. В крови эта форма связана с гемоглобином, а в плазме крови и моче определяется неорганическая ртуть [2].

Изучение эффектов Hg на молекулярном уровне показало, что определяющим механизмом её токсического воздействия является снижение активности тиоловых ферментов и цитохрома P-450 путём блокирования сульфгидрильных групп. Нарушаются ферментативная деятельность, процессы детоксикации и трансформации ксенобиотиков и эндотоксинов [27]. По данным исследований, ртуть может вызывать апоптоз клеток посредством окислительного стресса. В данном случае наблюдается активация протеинкиназы, каспазы-3 и каспазы-9, повышается экспрессия проапоптотических генов, и жизнеспособность клеток в дальнейшем снижается. Также увеличивается проницаемость митохондриальных мембран, в том числе вследствие связывания тиоловых групп белков этих мембран, что приводит к набуханию органелл, усугублению окислительного стресса, повышению выработки активных форм кислорода, высвобождению цитохрома C [28]. Нарушение активности тиол- и селенсодержащих белков (глутатионпероксидаза, тиоредоксинредуктаза), обеспечивающих работу антиоксидантной системы, также усиливает явления окислительного стресса. Следует отметить, что учёные выявили связь пороговых концентраций ртути с высоким уровнем сульфгидрилсодержащих антиоксидантов, в результате чего можно считать, что нуклеофильные группы с высоким сродством к метилртути могут выступать в качестве первичных мишеней окислительного стресса [17]. Однако у лиц, имеющих в анамнезе данные о хроническом воздействии ртути, наблюдается снижение активности таких антиоксидантов, как супероксиддисмутаза и церулоплазмин. Эти и другие исследования доказывают, что под влиянием экотоксиканта сначала происходит повышение активности антиоксидантной защиты, а затем её снижение на фоне накопления продуктов перекисного окисления липидов [29].

Важнейшим механизмом токсического влияния ртути является нарушение внутриклеточного гомеостаза ионов кальция посредством изменения его поступления через кальциевые мембранные каналы. Тем самым активируются кальций-зависимые ферменты, которые могут изменять функции протеинкиназы [30]. Окислительный стресс также вызывает высвобождение кальция из митохондрий, усугубляя его дисбаланс. Эти механизмы характеризуют и нейротоксичный потенциал ртути [30, 31]. К механизмам воздействия Hg на нервную систему относятся также нарушение работы рецепторов нейротрансмиттеров, нейромодуляторов, истощение системы антиоксидантной защиты, ингибирование тканевых ферментов [17]. Экотоксикант снижает адаптивный потенциал организма посредством подавления эффектов адреналина, норадреналина, серотонина и дофамина. В результате нарушаются процессы активации и торможения в нервной системе. Затем наступают неврологические и психические изменения в виде когнитивных нарушений, эмоциональной лабильности, снижения памяти и мотивации. Подобные симптомы отмечены у лиц, экспонированных ртутью, что подтверждает негативное влияние Hg на психическую сферу и нервную систему в целом [26]. При этом отмечено преобладание психопатологических изменений над неврологическими проявлениями [32, 33]. Также наблюдалось компенсаторное повышение концентрации норадреналина и цилиарного нейротрофического фактора в начальном периоде с последующим повышением нейромедиаторов (дофамина, серотонина и гистамина) и снижением уровня адреналина [32, 34]. Изменения концентрации этих веществ могут быть связаны с психоневрологическими проявлениями. Замечена связь высокого уровня дофамина и невроподобных состояний, повышенной концентрации серотонина и увеличения частоты неврозов и психопатических расстройств [35, 36].

Многие исследования показывают связь повышенного риска развития дислипидемии с влиянием тяжёлых металлов [37, 38]. Например, хроническое воздействие ртути вызывает повышение уровня общего холестерина и его проатерогенных фракций [39]. При этом наблюдается уменьшение концентрации холестерина липопротеинов высокой плотности, увеличение индекса атерогенности [40]. Однако в данном случае снижение уровня холестерина липопротеинов высокой плотности может быть дополнительным признаком окислительного стресса в результате окислительной модификации активными формами кислорода [29]. Также исследователи выявили возрастные группы, более подверженные негативному влиянию ртути. У лиц в возрасте 20–39 и 40–59 лет дислипидемия была диагностирована гораздо чаще в сравнении с группой старше 60 лет. Люди молодого возраста имеют, по-видимому, более высокий риск развития дислипидемии, чем пожилые [41]. Кроме того, доказано, что мужчины более склонны к дислипидемии, как и лица с отягощённым анамнезом (артериальной гипертензией, сахарным диабетом). Также прослеживалась связь повышенной концентрации токсиканта в организме с увеличением активности ферментов: гамма-глутамилтрансферазы, аланинаминотрансферазы и аспартатаминотрансферазы [42, 43].

Ртуть может ускорять формирование атеросклеротических поражений и быть фактором риска в патогенезе болезней системы кровообращения. Показана роль Hg в развитии гиперплазии гладкой мускулатуры кровеносных сосудов. Опубликованы данные об ингибирующем влиянии ртути на параоксоназу-1 — фермент, который замедляет атеросклеротический процесс посредством предупреждения окисления липопротеинов и уменьшения образования липидных пероксидов [44, 45]. Есть данные о связи уровня Hg в организме с нарушением сердечного ритма, гипертонией, ишемической болезнью сердца [46, 47]. Важной составляющей патогенеза сосудистых

патологий являются вызванные ртутной интоксикацией эндотелиальная дисфункция, окислительный стресс и воспаление эндотелия [48]. Хроническое воздействие Hg проявляется в увеличении синтеза мощных факторов вазоконстрикции (эндотелина-1, ангиотензина II и гистамина) с параллельным снижением вазодилатационного потенциала — уменьшением концентрации серотонина и оксида азота. Также наблюдается увеличение выработки гомоцистеина, который участвует в сосудистом воспалении и способствует процессам окисления липопротеидов низкой плотности, усиливая повреждение эндотелия [49]. У стажированных лиц повышенные уровни антител к окисленным липопротеидам низкой плотности свидетельствуют об эндотелиальной дисфункции и ухудшении функционального состояния эндотелия в целом [50].

Заключение

Негативное влияние ртути на здоровье человека и окружающую среду доказано многими исследованиями. К её токсическим эффектам относят снижение активности тиоловых ферментов, истощение в системе антиоксидантной защиты и окислительный стресс, нарушение работы рецепторного аппарата клеток и другие изменения на молекулярном уровне. Ртуть влияет на важнейшие системы регуляции в организме и входит в список самых опасных химических веществ. Повсеместное её распространение и использование в технологических процессах представляет риски для здоровья населения и экологическую угрозу. Поэтому актуальными на сегодняшний день являются исследования воздействия экотоксиканта на организм, мониторинг загрязнения среды обитания и изучение здоровья населения, проживающего в зоне экологического риска.

Литература

(п.п. 1–5, 9–12, 17, 18, 21–25, 28, 30, 31, 37, 38, 41–44, 46–48 см. References)

6. Ракитский В.Н., Синицкая Т.А., Скупневский С.В. Современные проблемы загрязнения ртутью окружающей среды (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2020; 99(5): 460–7. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-5-460-467> <https://elibrary.ru/cxkmri>
7. ВОЗ. Ртуть и здоровье. Основные факты; 2017. Доступно: <https://who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
8. ВОЗ. Доклад Конференции Сторон Минаматской конвенции о ртути о работе ее пятого совещания; 2023.
13. Ванчугова В.А. Комплексная оценка воздействий на окружающую среду последствий техногенной аварии. *Архивариус*. 2017; 3(18): 36–41. <https://elibrary.ru/ugprzb>
14. Ефимова Н.В., Коваль П.В., Рукавишников В.С., Безгодов И.В. Проблемы, связанные с загрязнением ртутью объектов окружающей среды. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2005; (1): 127–33. <https://elibrary.ru/kzzjff>
15. Коваль П.В., Калмычков Г.В., Лавров С.М., Удодов Ю.Н., Бутаков Е.В., Файфилд Ф.В. и др. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме Братского водохранилища. *Доклады Академии наук*. 2003; 388(2): 225–7. <https://elibrary.ru/optlrx>
16. Пастухов М.В., Гребенщикова В.И., Шевелёва Н.Г. Оценка накопления ртути разными группами планктона Братского водохранилища. В кн.: *Проблемы геохимии эндогенных процессов в окружающей среде. Том 1*. Иркутск; 214–8.
19. Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И., Шешуков В. С. Оценка поступления малых доз ртути в организм человека с продуктами питания. *Экология человека*. 2017; (10): 16–20.
20. Краснопеева И.Ю. Ртутная интоксикация. *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*. 2005; 57(7): 104–8. <https://elibrary.ru/jrgyxz>
26. Лахман О.Л., Катаманова Е.В., Константинова Т.Н., Шевченко О.И., Мещерягин В.А., Андреева О.К. и др. Современные подходы к классификации профессиональной интоксикации ртутью. *Экология человека*. 2009; (12): 22–7. <https://elibrary.ru/kyzrob>
27. Савченков М.Ф., Рукавишников В.С., Ефимова Н.В. Ртуть в окружающей среде и ее влияние на здоровье населения (на примере Байкальского региона). *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*. 2010; 99(8): 9–11. <https://elibrary.ru/nhoebf>
29. Маснавиева Л.Б., Бударина Л.А., Кудашева И.В. Показатели антиоксидантной защиты и перекисного окисления липидов у лиц с нейротоксикацией в отдаленном периоде. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2010; (4): 115–8. <https://elibrary.ru/ogutwd>
32. Рукавишников В.С., Лахман О.Л., Соседова Л.М., Шахметов С.Ф., Бодиевкова Г.М., Кудашева И.В. и др. Профессиональные нейротоксикации: закономерности и механизмы формирования. *Медицина труда и промышленная экология*. 2014; 54(4): 1–6. <https://elibrary.ru/sceviv>
33. Катаманова Е.В., Шевченко О.И., Лахман О.Л., Брежнева И.А., Проскоков К.М. Нарушения высших психических функций при энцефалопатии различного генеза. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2012; (1): 26–31. <https://elibrary.ru/pbtylj>
34. Кудашева И.В., Маснавиева Л.Б., Попкова О.В., Дьякович О.А. Изменения нейробиохимических показателей у лиц, экспонированных парами ртути. *Медицина труда и промышленная экология*. 2015; 55(4): 11–5. <https://elibrary.ru/trllpl>
35. Левин Я.И. Нейробиохимическая медицина. Часть 1. Церебральные дофаминергические системы. *Современная терапия психических расстройств*. 2008; (1): 4–8. <https://elibrary.ru/taxuit>
36. Григоров О.В., Ахапкин Р.В., Александровский Ю.А. Современные представления о патогенетической терапии тревожных расстройств. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2019; 119(10): 111–20. <https://doi.org/10.17116/jnevro201911910111>
39. Кудашева И.В., Дьякович О.А., Маснавиева Л.Б., Дьякович М.П., Шахметов С.Ф. Прогнозирование значений индекса атерогенности у работающих при воздействии ртути. *Медицина труда и промышленная экология*. 2017; 57(10): 34–8. <https://elibrary.ru/ztuvil>
40. Кудашева И.В., Бударина Л.А. Изменение биохимических показателей при воздействии паров металлической ртути. *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2012; (6): 24–7. <https://elibrary.ru/pjbopf>
45. Боровкова Е.И., Антипова Н.В., Корнеев Т.В., Шахпаронов М.И., Боровков И.М. Параоксоназ: универсальный фактор антиоксидантной защиты организма человека. *Вестник Российской академии медицинских наук*. 2017; 72(1): 5–10. <https://doi.org/10.15690/vramn764> <https://elibrary.ru/yfyipx>
49. Наумова О.В., Кудашева И.В., Маснавиева Л.Б., Дьякович О.А. Маркёры сосудистого тонуса и воспаления у лиц, экспонированных ртутью. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(10): 1079–84. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-10-1079-1084> <https://elibrary.ru/juvmrm>
50. Наумова О.В., Кудашева И.В., Маснавиева Л.Б., Дьякович О.А. Роль молекул межклеточной адгезии и антител к окисленным липопротеидам низкой плотности в патогенезе сердечно-сосудистых заболеваний при воздействии ртути. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(10): 1120–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-10-1120-1126> <https://elibrary.ru/kefivb>

References

1. Wang L., Ma Y., Lin W. A coumarin-based fluorescent probe for highly selective detection of hazardous mercury ions in living organisms. *J. Hazard. Mater.* 2024; 461: 132604. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132604>
2. Esteban-López M., Arrebola J.P., Juliá M., Pärt P., Soto E., Cañas A., et al. Selecting the best non-invasive matrix to measure mercury exposure in human biomonitoring surveys. *Environ. Res.* 2022; 204(Pt. D): 112394. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112394>
3. Guo X., Li N., Wang H., Su W., Song Q., Liang Q., et al. Combined exposure to multiple metals on cardiovascular disease in NHANES under five statistical models. *Environ. Res.* 2022; 215(Pt. 3): 114435. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114435>
4. Fu Z., Xi S. The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicol. Mech. Methods*. 2020; 30(3):167–76. <https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594>
5. Mestanza-Ramón C., Jiménez-Oyola S., Gavilanes Montoya A.V., Vizuete D.D.C., D'Orio G., Cedeño-Laje J., et al. Human health risk assessment due to mercury use in gold mining areas in the Ecuadorian Andean region. *Chemosphere*. 2023; 344: 140351. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140351>
6. Rakitskii V.N., Synitskaya T.A., Skupnevskii S.V. Current issues of environmental mercury pollution (review). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(5): 460–7. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-5-460-467> <https://elibrary.ru/cxkmri> (in Russian)
7. WHO. Mercury and health. Basic facts; 2017. Available at: <https://who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
8. WHO. Report of the Conference of the Parties to the Minamata Convention on Mercury on its fifth meeting; 2023.
9. Li C., Shen J., Zhang J., Lei P., Kong Y., Zhang J., et al. The silver linings of mercury: Reconsideration of its impacts on living organisms from a multi-timescale perspective. *Environ. Int.* 2021; 155: 106670. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106670>
10. Ha E., Basu N., Bose-O'Reilly S., Dórea J.G., McSorley E., Sakamoto M., et al. Current progress on understanding the impact of mercury on human health.

Review article

- Environ. Res.* 2017; 152: 419–33. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.042>
11. Harada M. Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution. *Crit. Rev. Toxicol.* 1995; 25(1): 1–24. <https://doi.org/10.3109/10408449509089885>
 12. Ceccatelli S., Daré E., Moors M. Methylmercury-induced neurotoxicity and apoptosis. *Chem. Biol. Interact.* 2010; 188(2): 301–8. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2010.04.007>
 13. Vanchugova V.A. Complex assessment of impacts on the environment of consequences of technogenic. *Archivarius.* 2017; 3(18): 36–41. <https://elibrary.ru/yprzb> (in Russian)
 14. Efimova N.V., Koval P.V., Rukavishnikov V.S., Bezgodov I.V. Problems associated with mercury pollution of environmental objects. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk.* 2005; (1): 127–33. <https://elibrary.ru/kzzjff> (in Russian)
 15. Koval P.V., Kalmychov G.V., Lavrov S.M., Butakov E.V., Alieva V.I., Lavrov S.M., et al. Anthropogenic component and mercury balance in ecosystem of the Bratsk hydropower reservoir. *Doklady Akademii nauk.* 2003; 388(2): 225–7. <https://elibrary.ru/lhvfih> (in Russian)
 16. Pastukhov M.V., Grebenshchikova V.I., Shevelova N.G. Assessment of mercury accumulation by different groups of plankton of the Bratsk Reservoir. In: *Problems of Geochemistry of Endogenous Processes in the Environment. Volume 1 (Problemy geokhimii endogennykh protsessov v okruzhayushchei srede. Tom 1)*. Irkutsk; 2007: 214–8. (in Russian)
 17. Farina M., Aschner M., Rocha J.B. Oxidative stress in MeHg-induced neurotoxicity. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2011; 256(3): 405–17. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2011.05.001>
 18. Bhattacharya S. Can the toxic heavy metals be beneficial at trace levels? Understanding their outranged biological functions. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.* 2024; 43(1): 71–7. <https://doi.org/10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2023049292>
 19. Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I., Sheshukov V.S. Intake assessment of small doses of mercury in the human body with food. *Ekologiya cheloveka.* 2017; (10): 16–20 (in Russian)
 20. Krasnoperova I.Yu. Mercury intoxication. *Sibirskii meditsinskii zhurnal (Irkutsk).* 2005; 57(7): 104–8. <https://elibrary.ru/jrgyxx> (in Russian)
 21. Chan T.Y. Inorganic mercury poisoning associated with skin-lightening cosmetic products. *Clin. Toxicol. (Phila).* 2011; 49(10): 886–91. <https://doi.org/10.3109/15563650.2011.626425>
 22. Tang H.L., Mak Y.F., Chu K.H., Lee W., Fung S.K., Chan T.Y., et al. Minimal change disease caused by exposure to mercury-containing skin lightening cream: a report of 4 cases. *Clin. Nephrol.* 2013; 79(4): 326–9.
 23. Akhtar A., Kazi T.G., Afridi H.I., Khan M. Human exposure to toxic elements through facial cosmetic products: Dermal risk assessment. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2022; 131: 105145. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2022.105145>
 24. Palmer R.B., Godwin D.A., McKinney P.E. Transdermal kinetics of a mercurous chloride beauty cream: an in vitro human skin analysis. *J. Toxicol. Clin. Toxicol.* 2000; 38(7): 701–7. <https://doi.org/10.1081/clt-100102383>
 25. Ramli F.F. Clinical management of chronic mercury intoxication secondary to skin lightening products: A proposed algorithm. *Bosn. J. Basic Med. Sci.* 2021; 21(3): 261–9. <https://doi.org/10.17305/bjbm.2020.4759>
 26. Lakhman O.L., Katamanova E.V., Konstantinova T.N., Shevchenko O.I., Mesherjagin V.A., Andreeva O.K., et al. Contemporary approaches to the classification of occupational mercury intoxication. *Ekologiya cheloveka.* 2009; (12): 22–7. <https://elibrary.ru/kyzpbob> (in Russian)
 27. Savchenkov M.F., Rukavishnikov V.S., Efimova N.V. Environmental mercury and its influence on population health (on example of Baikal region). *Sibirskii meditsinskii zhurnal (Irkutsk).* 2010; 99(8): 9–11. <https://elibrary.ru/nhoebf> (in Russian)
 28. Korotkov S.M. Mitochondrial oxidative stress is the general reason for apoptosis induced by different-valence heavy metals in cells and mitochondria. *Int. J. Mol. Sci.* 2023; 24(19): 14459. <https://doi.org/10.3390/ijms241914459>
 29. Masnavieva L.B., Budarina L.A., Kudaeva I.V. Indices of antioxidant protection and lipid peroxidation in persons with neurointoxication in long-term period after exposure. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk.* 2010; (4): 115–8. <https://elibrary.ru/ogutwd> (in Russian)
 30. Abbott L.C., Nigussie F. Mercury toxicity and neurogenesis in the mammalian brain. *Int. J. Mol. Sci.* 2021; 22(14): 7520. <https://doi.org/10.3390/ijms22147520>
 31. Farina M., Avila D.S., da Rocha J.B., Aschner M. Metals, oxidative stress and neurodegeneration: a focus on iron, manganese and mercury. *Neurochem Int.* 2013; 62(5): 575–94. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2012.12.006>
 32. Rukavishnikov V.S., Lakhman O.L., Sosodova L.M., Shayakhmetov S.F., Bodienkova G.M., Kudayeva I.V., et al. Occupational neurointoxications: patterns and mechanisms of formation. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya.* 2014; 54(4): 1–6. <https://elibrary.ru/sceviv> (in Russian)
 33. Katamanova E.V., Shevchenko O.I., Lakhman O.L., Brezhneva I.A., Proskokov K.M. Disorders of higher psychical functions in encephalopathy of different genesis. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk.* 2012; (1): 26–31. <https://elibrary.ru/pbtylj> (in Russian)
 34. Kudayeva I.V., Masnavieva L.B., Popkova O.V., Dyakovitch O.A. Neurochemical parameters change in individuals exposed to mercury vapors. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya.* 2015; 55(4): 11–5. <https://elibrary.ru/trllpl> (in Russian)
 35. Levin Ya.I. Neurochemical medicine. *Sovremennaya terapiya psikhicheskikh rassstroistv.* 2008; (1): 4–8. <https://elibrary.ru/taxuit> (in Russian)
 36. Grigorova O.V., Akhapiin R.V., Aleksandrovskii Yu.A. Modern concepts of pathogenetic therapy of anxiety disorders. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. C.C. Korsakova.* 2019; 119(10): 111–20. <https://doi.org/10.17116/jnevro201911910111> (in Russian)
 37. Kang P., Shin H.Y., Kim K.Y. Association between Dyslipidemia and Mercury Exposure in Adults. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2021; 18(2): 775. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020775>
 38. Wang G., Fang L., Chen Y., Ma Y., Zhao H., Wu Y., et al. Association between exposure to mixture of heavy metals and hyperlipidemia risk among U.S. adults: A cross-sectional study. *Chemosphere.* 2023; 344: 140334. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140334>
 39. Kudaeva I.V., Dyakovich O.A., Masnavieva L.B., Dyakovich M.P., Shayakhmetov S.F. Forecasting the atherogenic index values in works exposed to mercury. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya.* 2017; 57(10): 34–8. <https://elibrary.ru/ztuvil> (in Russian)
 40. Kudayeva I.V., Budarina L.A. Biochemical indexes modification at exposure of metallic mercury vapours. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk.* 2012; (6): 24–7. <https://elibrary.ru/pjbopf> (in Russian)
 41. Liang J.H., Pu Y.Q., Liu M.L., Hu L.X., Bao W.W., Zhang Y.S., et al. Joint effect of whole blood metals exposure with dyslipidemia in representative US adults in NHANES 2011–2020. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2023; 30(42): 96604–16. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28903-0>
 42. Yao X., Steven Xu X., Yang Y., Zhu Z., Zhu Z., Tao F., et al. Stratification of population in NHANES 2009–2014 based on exposure pattern of lead, cadmium, mercury, and arsenic and their association with cardiovascular, renal and respiratory outcomes. *Environ. Int.* 2021; 149: 106410. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106410>
 43. Lee S., Cho S.R., Jeong I., Park J.B., Shin M.Y., Kim S., et al. Mercury exposure and associations with hyperlipidemia and elevated liver enzymes: a nationwide cross-sectional survey. *Toxics.* 2020; 8(3): 47. <https://doi.org/10.3390/toxics8030047>
 44. Ayotte P., Carrier A., Ouellet N., Boiteau V., Abdous B., Sidi E.A., et al. Relation between methylmercury exposure and plasma paraoxonase activity in Inuit adults from Nunavik. *Environ. Health Perspect.* 2011; 119(8): 1077–83. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003296>
 45. Borovkova E.I., Antipova N.V., Korneenko T.V., Shakhparonov M.I., Borovkov I.M. Paraonase: the universal factor of antioxidant defense in human body. *Vestnik Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk.* 2017; 72(1): 5–10. <https://doi.org/10.15690/vramn764> <https://elibrary.ru/yfyipx> (in Russian)
 46. Ivanova E.S., Shuvalova O.P., Eltsova L.S., Komov V.T., Kornilova A.I. Cardiometabolic risk factors and mercury content in hair of women from a territory distant from mercury-rich geochemical zones (Cherepovets city, Northwest Russia). *Environ. Geochem Health.* 2021; 43(11): 4589–99. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00939-6>
 47. Choi S., Kwon J., Kwon P., Lee C., Jang S.I. Association between blood heavy metal levels and predicted 10-year risk for a first atherosclerosis cardiovascular disease in the general Korean population. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020; 17(6): 2134. <https://doi.org/10.3390/ijerph17062134>
 48. Houston M.C. The role of mercury and cadmium heavy metals in vascular disease, hypertension, coronary heart disease, and myocardial infarction. *Altern. Ther Health Med.* 2007; 13(2): S128–33.
 49. Naumova O.V., Kudaeva I.V., Masnavieva L.B., Dyakovich O.A. Markers of vascular tone and inflammation in persons exposed to mercury. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2019; 98(10): 1079–84. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-10-1079-1084> <https://elibrary.ru/juvirm> (in Russian)
 50. Naumova O.V., Kudaeva I.V., Masnavieva L.B., Dyakovich O.A. Role of intercellular adhesion molecules and antibodies to oxidized LDL in pathogenesis of cardiovascular diseases under mercury exposure. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2020; 99(10): 1120–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-10-1120-1126> <https://elibrary.ru/kefivb> (in Russian)

Сведения об авторе

Лысенко Анастасия Анатольевна, аспирант, врач КДЛ ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: doc.anastasia07.07.90@gmail.com

Information about the author

Anastasia A. Lysenko, PhD student, doctor of the clinical laboratory of the East Siberian Institute of Medical and Environmental Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-6521-2130> E-mail: doc.anastasia07.07.90@gmail.com