



Мыльникова И.В., Ефимова Н.В., Савченков М.Ф.

Оценка ртутной опасности для мужчин при многолетнем ингаляционном воздействии: стандартные сценарии на экспонированной территории

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

РЕЗЮМЕ

Введение. Одним из подходов к идентификации опасности для здоровья населения является метод стандартных сценариев. Особенno важно его применение при оценке риска для здоровья наиболее экспонированных групп населения, подвергающихся длительному воздействию неблагоприятных факторов.

Цель исследования – апробировать подходы к оценке экспозиционной нагрузки в условиях долгосрочного воздействия ртути, поступающей из окружающей и производственной среды.

Материалы и методы. Рассмотрены стандартные сценарии для мужчин по трём возрастам (20; 40 и 60 лет), трём зонам проживания в городе (до 3 км, 3–5 км, более 5 км от объединённой промплощадки); двум вариантам работы (на предприятиях, расположенных на промплощадке и за её пределами). Использованы данные мониторинга концентраций ртути в атмосферном воздухе «модельного города» и воздухе объединённой промплощадки предприятия с цехом ртутного электролиза в различные периоды его деятельности. Расчёт и оценка доз и коэффициентов опасности проведены по Р 2.1.10.3968–23.

Результаты. В период активной деятельности предприятия (до 2000 г.) среднегодовые концентрации ртути в атмосферном воздухе в I зоне жилой застройки «модельного города» составили 1,8 ПДК_{а.в.} (0,00054 мг/м³), во II зоне – 1,5 ПДК_{а.в.} (0,00046 мг/м³), в III зоне – существенно ниже величины ПДК_{а.в.} (0,000008 мг/м³). В период демонтажа оборудования (2000–2006 гг.) среднегодовые концентрации ртути в атмосферном воздухе города снизились до 0,000001 мг/м³. В постэксплуатационный период (2007–2023 гг.) ртуть в атмосферном воздухе не обнаружена. Концентрация ртути в воздухе объединённой промплощадки до 2000 г. оценивалась в 1,6 ПДК_{п.з.} (0,008 мг/м³), в 2000–2006 гг. за счёт вторичного загрязнения объединённой промплощадки – в 1,86 ПДК_{п.з.} (0,0093 мг/м³), в 2007–2023 гг. – ниже ПДК_{п.з.} (0,0043 мг/м³). Величина коэффициента опасности соответствует настораживающему уровню у мужчин, работающих на предприятиях объединённой промплощадки, в следующих группах: 40 лет – с местом жительства в I зоне; 60 лет – вне зависимости от места жительства.

Ограничения исследования. Использование в сценариях стандартных условий воздействия, не учитывающих индивидуальных особенностей суточной экспозиции и профессионального маршрута, в том числе для наиболее подверженной воздействию ртути группы работающих мужчин электролизного цеха, неполные данные о многолетнем фактическом содержании поллютанта в воздушной среде объединённой промплощадки и селитебной зоны вносят неопределённости в выполненные оценки количественной хронической экспозиции, ограничивают экстраполяцию конкретных результатов на другие группы населения.

Заключение. Моделирование сценариев многолетнего воздействия ртути на мужчин, не контактирующих с токсикантом на рабочем месте, свидетельствует о риске, обусловленном поступлением ртути из воздуха объединённой промплощадки в период эксплуатации предприятия.

Ключевые слова: ртуть; хроническая экспозиция; атмосферный воздух; воздух объединённой промышленной площадки

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

Для цитирования: Мыльникова И.В., Ефимова Н.В., Савченков М.Ф. Оценка ртутной опасности для мужчин при многолетнем ингаляционном воздействии: стандартные сценарии на экспонированной территории. Гигиена и санитария. 2025; 104(12): 1627–1634. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-12-1627-1634> <https://elibrary.ru/tauad>

Для корреспонденции: Мыльникова Инна Владимировна, e-mail: inna.mylnikova.phd.ms@gmail.com

Участие авторов: Ефимова Н.В. – концепция и дизайн исследования, разработка сценариев, написание текста; Мыльникова И.В. – сбор и анализ данных, сценарные расчёты, написание текста; Савченков М.Ф. – концепция и дизайн исследования. Все соавторы – редактирование, 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 выполнено в рамках поисковых научных исследований «Разработка технологий комплексной оценки здоровья населения, проживающего в зонах накапленного вреда прежней хозяйственной деятельности в моногородах Сибири».

Поступила: 02.06.2025 / Поступила после доработки: 27.11.2025 / Принята к печати: 02.12.2025 / Опубликована: 15.01.2026

Inna V. Mylnikova, Natalya V. Efimova, Mikhail F. Savchenkov

Assessment of the mercury hazard for men with long-term inhalation exposure: standard scenarios in an exposed area

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

ABSTRACT

Introduction. One of the approaches to identifying a hazard to public health is the standard scenario method.

The aim – to test approaches to assessing exposure load under conditions of long-term exposure to mercury coming from the environment and industrial environment.

Materials and methods. Standard scenarios for men of three ages (20, 40, and 60 years) were considered; three urban residential zones (up to 3 km, 3–5 km, and more than 5 km from the combined industrial site); and two work options (at enterprises located on and off-site). Data from monitoring mercury concentrations in the atmospheric air of a “model city” and the air of the combined industrial site of an enterprise with a mercury electrolysis shop during various periods of its operation were used. Calculation and assessment of doses and hazard quotients were conducted in accordance with R 2.1.10.3968–23.

Results. During the period of active operation of the enterprise, the average annual concentrations of mercury in the atmospheric air in residential zone I of the “model city” were 0.00054 mg/m³, in zone II – 0.00046 mg/m³, in zone III – 0.000008 mg/m³. During the period of equipment dismantling the average annual values of mercury concentrations in the atmospheric air of the city decreased significantly and reached 0.0000001 mg/m³. In the post-operational period, mercury was not detected in the atmospheric air. The hazard coefficient value corresponds to the alarming level for men working at enterprises on the territory of the combined industrial site, in the following groups: 40 years – with a place of residence in zone I; 60 years – regardless of place of residence.

Limitations. The use of standard exposure conditions in scenarios that do not take into account the individual characteristics of daily exposure and the occupational route, including for male workers in the electrolysis shop, incomplete data on the long-term actual content of the pollutant in the air of the combined industrial site and residential area introduce uncertainties in the assessment of quantitative chronic exposure.

Conclusion. Modeling scenarios of long-term mercury exposure in men not exposed to the toxicant in their workplaces demonstrates the risk posed by mercury emissions from the air of the integrated industrial site during the operation of the enterprise.

Keywords: mercury; chronic exposure; atmospheric air; air of the combined industrial site

Compliance with ethical standards. The study does not require the presentation of the conclusion of the biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Mylnikova I.V., Efimova N.V., Savchenkov M.F. Assessment of the mercury hazard for men with long-term inhalation exposure: standard scenarios in an exposed area. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal.* 2025; 104(12): 1627–1634. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-12-1627-1634> <https://elibrary.ru/tauaoe> (In Russ.)

For correspondence: Inna V. Mylnikova, e-mail: inna.mylnikova.phd.ms@gmail.com

Contributions: Mylnikova I.V. – data collection and analysis, scenario calculations, text writing; Efimova N.V. – study concept and design, scenario development, text writing; Savchenkov M.F. – study concept and design. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

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

Funding. The study was carried out within the framework of the Exploratory Scientific Research "Development of technologies for a comprehensive assessment of the health of the population living in areas of accumulated damage from previous economic activity in single-industry towns in Siberia".

Received: June 2, 2025 / Revised: November 27, 2025 / Accepted: December 2, 2025 / Published: January 15, 2026

Введение

В настоящее время пристальное внимание уделяется оценке риска для здоровья населения территорий накопленного экологического ущерба [1–3]. В частности, многочисленные исследования посвящены изучению загрязнения объектов окружающей среды ртутью и оценке последствий для здоровья населения в зоне размещения крупных химических производств, использующих ртуть в технологическом процессе [4–8]. В период активной эксплуатации химического предприятия цех ртутного электролиза был источником загрязнения окружающей среды парами металлической (элементарной) ртути, представляющей по сравнению с другими её формами наибольшую угрозу для здоровья населения [9–14]. Размещение индустриально-энергетических комплексов на ограниченных территориях объединённых промышленных площадок способствует поступлению загрязнителей в их воздушную среду от различных предприятий, в том числе не связанных единным процессом производств. Это может приводить к воздействию на человека не только химических факторов, обусловленных технологическими процессами данного предприятия, но и расположенных рядом [15, 16].

Ртуть относится к токсическим веществам 1-го класса опасности, что обусловлено устойчивой структурой химических связей, переносом на большие расстояния и высокой токсичностью большинства соединений Pb [17]. Долгосрочные последствия для здоровья человека (развитие, обострение болезней) отмечаются через годы после прекращения трудовой деятельности и контакта с ртутью [18].

Оценка нестахастических эффектов при воздействии факторов производственной среды [19], загрязнения почвы и питьевой воды химическими веществами [20, 21], контаминаントов в продуктах питания [22, 23] осуществляется, как правило, на популяционном и групповом уровнях. Особое внимание в последнее время уделяют оценке риска исходя из различных сценариев [24–26]. Преимущественно рассматривают реальное (существующее) положение и модели процесса при изменении выбросов предприятий. Вместе с тем практически отсутствуют работы, представляющие сценарии для наиболее экспонированных групп при длительном воздействии. Традиционно изучают влияние факторов среды обитания на экосенсиティブные группы (дети, беременные, лица старшего возраста). Особенности экспозиции мужчин трудоспособного возраста остаются вне внимания, хотя негативные эффекты воздействия комплекса факторов, проявляющиеся стойкими и необратимыми потерями здоровья, характерны именно для этой группы [9, 12]. Отдельного внимания требует категория мужчин, не работающих во вредных условиях, то есть напрямую не контак-

тирующих с опасными факторами производственной среды. Вышеизложенное определило интерес к изучению риска, обусловленного многолетним ингаляционным воздействием малых доз ртути, для людей, трудовая деятельность которых исключает прямой контакт с ртутью.

Цель исследования – апробировать подходы к оценке экспозиционной нагрузки в условиях долгосрочного воздействия ртути, поступающей из окружающей и производственной среды.

Материалы и методы

Рассматривался сценарий экспозиции, предполагающий длительное ингаляционное поступление ртути в организм с атмосферным воздухом и воздухом промплощадки. Исходя из сценария, создана информационная база данных «Индивидуальная ингаляционная экспозиция и коэффициенты опасности для здоровья взрослого населения г. Усолье-Сибирское при воздействии металлической ртути (1972–2023 годы)» (свидетельство государственной регистрации № 2025622120 от 22.05.2025 г.), содержащая карту зонирования территории города, временную схему экспозиции, использованные формулы для расчёта индивидуальной нагрузки, дозы и коэффициенты опасности; рассчитанные индивидуальные показатели опасности. Для расчёта величин экспозиции в качестве модельной территории использован город, на территории которого долгое время функционировало предприятие, применяющее технологию ртутного электролиза. Проведено зонирование территории города с учётом удалённости места жительства от объединённой промышленной площадки химического предприятия: I зона – до 3 км; II зона – 3–5 км; III зона – более 5 км.

Необходимость сценарных расчётов при оценке воздействия на различные группы населения в зонах влияния прежней хозяйственной деятельности промышленных предприятий отмечена в ряде работ [1, 2, 27]. Отсутствие достаточно надёжных данных о содержании поллютантов в объектах среды обитания, в том числе производственной, сложность реконструкции полного профессионального маршрута и вероятность смены места жительства делает практически невозможным точную оценку экспозиции, что определяет целесообразность использования моделей для сценарных расчётов.

Сценарием исследования определены *группы экспонированного населения*: мужчины 20; 40 и 60 лет, в том числе работающие на химических предприятиях, расположенных на территории объединённой промплощадки, но не занятые в цехе ртутного электролиза, и мужчины, работающие на предприятиях, расположенных за пределами промышленной зоны градообразующих предприятий. С учётом до-

Таблица 1 / Table 1

Сценарная продолжительность экспозиции для мужчин различного возраста (лет)

Scenario exposure duration for men of different ages (years)

Период, годы Period, years	Источники поступления ртути Sources of mercury intake	Возраст на момент исследования (2023 г.), лет Age at the time of the study (2023), years					
		20		40		60	
		1*	2*	1	2	1	2
До / Before 2000	Атмосферный воздух / Atmospheric air	0	0	17	17	37	37
	Воздух промплощадки / Industrial site air	0	0	0	0	19	19
2000–2006	Атмосферный воздух / Atmospheric air	3	3	7			
	Воздух промплощадки / Industrial site air	0	0	6	6	7	7
2007–2023	Атмосферный воздух / Atmospheric air	17					
	Воздух промплощадки / Industrial site air	2	2	17	17	17	17

Причина. * Здесь и в табл. 3: 1 – работа на предприятиях, размещённых на объединённой промплощадке; 2 – работа на предприятиях, размещённых за пределами объединённой промплощадки.

Note: * Here and in table 3: 1 – work at enterprises located on a combined industrial site; 2 – work at enterprises located outside the combined industrial site.

статочной изученности риска для здоровья рабочих цеха ртутного электролиза, в том числе проведённых на модельном предприятии, в сценарий эти лица не включены [28, 29]. Приняты значения стандартной продолжительности экспозиции ртутью при атмосферном воздействии и в период трудовой деятельности на предприятии, размещённом на объединённой промплощадке, или предприятии, расположенному за её пределами (табл. 1).

Периоды исследования определены в соответствии с этапами деятельности цеха ртутного электролиза химического комбината, рассматриваемого в качестве модели прежней хозяйственной деятельности: до 2000 г. – период активной эксплуатации; 2000–2006 гг. – переходный период, связанный с демонтажем оборудования цеха ртутного электролиза; 2007–2023 гг. – постэксплуатационный период.

Загрязнение атмосферного воздуха зоны жилой застройки оценивали по данным мониторинга Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, определившего среднегодовые концентрации ртути в атмосферном воздухе селитебной зоны города в 1973–2003 гг. Начиная с 2001 г. ртуть в пробах не определялась, в последующие годы измерения ртути в воздухе не проводили, поэтому концентрация ртути в 2001–2023 гг. условно принята равной нулю. Концентрация ртути оценивалась относительно ПДК_{ав.} 0,0003 мг/м³ в атмосферном воздухе селитебной зоны¹.

Для расчёта содержания ртути в воздухе объединённой промплощадки использовали данные санитарно-промышленной лаборатории предприятия, представленные в [30]. Согласно рекомендации Руководства по расчёту загрязнения воздуха промышленных площадок², при оценке загрязнения следует использовать величину, равную 1/3 предельно допустимой концентрации в воздухе рабочей зоны (ПДК_{р.з.}). Такой подход был отменён в период подготовки статьи, поэтому определено следующее допущение. При расчёте нагрузки в производственных условиях концентрация ртути в воздухе рабочей зоны на предприятиях, размещённых на территории объединённой промплощадки, составляет 1/3 от концентрации в цехе ртутного электролиза – источнике данного поллютанта. Исходя из среднесменной величины ПДК_{р.з.}

¹ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

² Руководство по расчёту загрязнения воздуха на промышленных площадках. Одобрено и рекомендовано к изданию Главпромстройпроектом Госстроя СССР 2 декабря 1975 г. Доступно: <https://docs.cntd.ru/document/1200100012 10.05.2025>

0,005 мг/м³ оценивали концентрацию ртути в воздухе промплощадки¹. На предприятиях, размещённых в черте селитебной зоны, концентрация ртути принята равной содержанию в атмосферном воздухе.

Оценка хронической экспозиции проведена по методическому документу Р 2.1.10.3968–23³. При расчёте использованы величины факторов экспозиции, рекомендуемые в руководстве в качестве стандартных: скорость ингаляции взрослого человека – 20 м³/сут; масса тела (взрослый, 18 и более лет) – 70 кг. За продолжительность экспозиции при определении среднегодовой дозы до 2000 г. принимали число лет от даты рождения, в период 2000–2006 гг. – 6 лет, в период 2007–2023 гг. – 17 лет.

Таким образом, для всех рассматриваемых периодов использовали два документа: СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» и Р 2.1.10.3968–23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания».

Рассчитаны показатели HQ при загрязнении парами металлической ртути атмосферного воздуха и воздуха промышленной площадки предприятия, использующего технологию ртутного электролиза, по формуле (1):

$$HQ = \Sigma D_{\text{среднегод.}} / RfD_{ch}, \quad (1)$$

где $\Sigma D_{\text{среднегод.}}$ – суммарная среднегодовая доза в течение всего периода исследования; RfD_{ch} – референтная среднегодовая доза при хроническом воздействии ртути¹.

Для расчёта среднегодовой дозы определяли суммарную дозу за три периода – до 2000 г., 2000–2006 и 2007–2023 гг. Суммарная доза за каждый период рассчитана как сумма дозы ртути, поступившей с атмосферным воздухом и воздухом промплощадки.

Среднегодовая доза при хроническом ингаляционном воздействии ртути рассчитана по формуле:

$$D_{\text{среднегод.}} = \Sigma \mathcal{E} / BW \cdot ED, \quad (2)$$

где $\Sigma \mathcal{E}$ – суммарная экспозиционная нагрузка за три периода: до 2000 г., 2000–2006 и 2007–2023 гг. (мг/кг массы); BW – масса тела (мг/кг); ED – продолжительность воздействия, лет.

$$\Sigma \mathcal{E} = \Sigma \mathcal{E}_{\text{до 2000 г.}} + \Sigma \mathcal{E}_{\text{2000–2006 гг.}} + \Sigma \mathcal{E}_{\text{2007–2023 гг.}} \quad (3)$$

³ Р 2.1.10.3968–23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания».

Таблица 2 / Table 2

Среднегодовые концентрации ртути ($\text{мг}/\text{м}^3$) в атмосферном воздухе и воздухе объединённой промплощадки в различные периоды деятельности предприятия, M [95% CI]

Average annual concentrations of mercury (mg/m^3) in the atmospheric air and the air of the combined industrial site during different periods of the enterprise's activity, M [95% CI]

Периоды деятельности предприятия Periods of enterprise activity	Атмосферный воздух Atmospheric air	Воздух промплощадки Industrial site air
Эксплуатация цеха ртутного электролиза до 2000 г. Operation of the mercury electrolysis shop until 2000	I зона / zone – 0,00054 [0,00045–0,00061] II зона / zone – 0,00046 [0,00039–0,00053] III зона / zone – 0,000008 [0,0000072–0,0000088]	0,008 [0,0079–0,0081]
Переходный период, связанный с демонтажем оборудования цеха ртутного электролиза в 2000–2006 гг. Transition period associated with dismantling the mercury electrolysis shop equipment over 2000–2006	0,0000001 [0,0000002–0,0000009]	0,0093 [0,0070–0,0161]
Постэксплуатационный период в 2007–2023 гг. Post-operational period in 2003–2023	0 [0–0]	0,0043 [0,0034–0,0052]

Суммарная экспозиционная нагрузка за каждый период исследования ($\Sigma \mathcal{E}_i$) представляет собой сумму экспозиции ртути, поступившей с атмосферным воздухом и воздухом промплощадки:

$$\Sigma \mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{\text{атм} i} + \mathcal{E}_{\text{пп} i}, \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_{\text{атм}} = V (C_{\text{атм}} \cdot T_{\text{атм}}) \cdot ED, \quad (5)$$

где V – скорость ингаляции ($\text{м}^3/\text{день}$); $C_{\text{атм}}$ – концентрация ртути в атмосферном воздухе ($\text{мг}/\text{м}^3$); $T_{\text{атм}}$ – время, проводимое в контакте с атмосферным воздухом (16 ч); ED – продолжительность воздействия, лет.

$$\mathcal{E}_{\text{пп}} = V (T_{\text{стаж}} \cdot C_{\text{пп}} \cdot T_{\text{пп}}), \quad (6)$$

где V – скорость ингаляции у мужчин ($\text{м}^3/\text{день}$); $T_{\text{стаж}}$ – продолжительность трудового стажа в период исследования (лет); $C_{\text{пп}}$ – концентрация ртути в воздухе объединённой промышленной площадки с учётом расчётного периода ($\text{мг}/\text{м}^3$); $T_{\text{пп}}$ – время, проводимое в контакте с воздухом промплощадки (8 ч).

Референтная среднегодовая доза при хроническом воздействии ртути (RfD_{chr}) рассчитана по формуле (7):

$$RfD_{\text{chr}} = RfC \cdot V, \quad (7)$$

где RfC – референтная концентрация при хроническом ингаляционном воздействии ртути ($0,0003 \text{ мг}/\text{м}^3$); V – скорость ингаляции взрослого человека ($\text{м}^3/\text{сут}$)¹.

Статистическая обработка материалов исследования выполнена с использованием программы Microsoft Excel. Вычисляли среднюю арифметическую концентрацию паров металлической ртути и доверительный интервал M [95% CI].

Результаты

Проведена оценка среднегодовых концентраций паров металлической ртути в атмосферном воздухе селитебной зоны и воздухе объединённой промышленной площадки в различные периоды деятельности химического предприятия (в том числе цеха ртутного электролиза): активная деятельность; переходный период (демонтаж оборудования); постэксплуатационный период.

Установлено, что в атмосферном воздухе в период активной деятельности предприятия (до 2000 г.) среднегодовые концентрации металлической ртути в I зоне жилой застройки составили 1,8 ПДК_{ав.} ($0,00054 \text{ мг}/\text{м}^3$) с колебаниями показателя 1,5–2 ПДК_{ав.} ($0,00045–0,00061 \text{ мг}/\text{м}^3$), во II зоне – 1,5 ПДК_{ав.} ($0,00046 \text{ мг}/\text{м}^3$) с изменениями показателя от 1,3–1,8 ПДК_{ав.} ($0,00039–0,00053 \text{ мг}/\text{м}^3$), в III зоне содержание ртути в указанный период было существенно ниже величины ПДК_{ав.} и составляло $0,000008 \text{ мг}/\text{м}^3$ с колебаниями в пределах $0,0000072–0,0000088 \text{ мг}/\text{м}^3$. В 2000–2006 гг. в период демонтажа оборудования среднегодовые значения концентраций ртути в атмосферном воздухе города значи-

тельно снизились и достигали $0,000001 \text{ мг}/\text{м}^3$ с колебаниями в пределах $0,0000002–0,0000009 \text{ мг}/\text{м}^3$. Начиная с 2007 г. ртуть в атмосферном воздухе селитебной зоны не обнаружена и условно принята как нулевая (табл. 2).

Среднегодовые концентрации ртути в воздухе предприятий, расположенных на территории объединённой промплощадки, в период до 2000 г. превышали ПДК_{п.з.} в 1,6 раза ($0,008 \text{ мг}/\text{м}^3$) с колебаниями показателя 1,58–1,62 ПДК_{п.з.} ($0,0079–0,0081 \text{ мг}/\text{м}^3$). В связи с демонтажем оборудования цеха ртутного электролиза отмечено значительное увеличение концентраций ртути в переходный период – до 1,86 ПДК_{п.з.} ($0,0093 \text{ мг}/\text{м}^3$) с колебаниями 1,4–3,22 ПДК_{п.з.} ($0,0070–0,0161 \text{ мг}/\text{м}^3$). К долгосрочным последствиям деятельности цеха ртутного электролиза относятся сосредоточение вторичных источников загрязнения в пределах объединённой промплощадки (в том числе под корпусом бывшего цеха ртутного электролиза) и утилизация или захоронение ртутьсодержащих отходов, ликвидация ртутьсодержащих отходов [6, 31]. В постэксплуатационный период (2007–2023 гг.) среднегодовые концентрации ртути в воздухе объединённой промплощадки были ниже ПДК_{п.з.} ($0,0043 \text{ мг}/\text{м}^3$) с колебаниями до 1 ПДК_{п.з.} ($0,0034–0,0052 \text{ мг}/\text{м}^3$) (см. табл. 2).

С учётом среднегодовых концентраций ртути в атмосферном воздухе города и воздухе объединённой промплощадки в различные периоды деятельности предприятия рассчитаны величины суммарной среднегодовой дозы и коэффициента опасности для мужчин 20; 40 и 60 лет.

Согласно сценарию экспозиции, у мужчин 20 лет (2003 года рождения) в 2000–2006 гг. экспозиционная нагрузка ртутью, связанная с атмосферным воздухом ($\mathcal{E}_{\text{атм}}$), составила $0,0001 \text{ мг}/\text{м}^3$. В 2007–2023 гг. поступление ртути в организм было обусловлено только работой на предприятиях, расположенных на территории объединённой промплощадки, $\mathcal{E}_{\text{пп}} = 1,05 \text{ мг}/\text{м}^3$. При работе на предприятиях, находящихся за пределами объединённой промплощадки, в соответствии с нулевыми значениями концентраций ртути в атмосферном воздухе, $\mathcal{E}_{\text{пп}} = 0 \text{ мг}/\text{м}^3$. С учётом массы тела для 20-летних мужчин, работающих в условиях объединённой промплощадки и за её пределами, доза ртути составила $0,0007 \text{ мг}/\text{кг}$ и $7,1 \cdot 10^{-8} \text{ мг}/\text{кг}$ соответственно, коэффициенты опасности – 0,12 и 0,00001. По классификации уровней риска величины HQ соответствуют минимальному уровню¹.

У мужчин 40 лет в период эксплуатации цеха ртутного электролиза (до 2000 г.) поступление ртути в организм было обусловлено атмосферным воздействием и колебалось в зависимости от места проживания: максимальное значение среднегодовой дозы определено для I зоны, минимальное – для III зоны (табл. 3). Суммарная экспозиция в этот период исследования равнозначна величине $\mathcal{E}_{\text{атм}}$. В период демонтажа оборудования в цехе ртутного электролиза $\mathcal{E}_{\text{атм}}$ многократно уменьшилась ($0,0002 \text{ мг}/\text{м}^3$), а поступление

Таблица 3 / Table 3

Сценарная оценка ингаляционного поступления ртути и потенциальной опасности для мужчин 40 и 60 лет, суммарная экспозиционная нагрузка

Scenario assessment of inhalation mercury intake and potential hazard for men aged of 40 and 60 years, total exposure load

Период, годы Period, years	Источник поступления ртути Sources of mercury	I зона / zone		II зона / zone		III зона / zone	
		1	2	1	2	1	2
<i>Мужчины 40 лет / Males 40 years</i>							
До / Before 2000	Атмосферный воздух ($\mathcal{E}_{\text{атм}}$) / Atmospheric air	3.35	3.35	2.85	2.85	0.05	0.05
	Предприятия промплощадки ($\mathcal{E}_{\text{пп}}$) / Industrial site enterprises	0	0	0	0	0	0
	Всего ($\Sigma\mathcal{E}$) / Total ($\Sigma\mathcal{E}$)	3.35	3.35	2.85	2.85	0.05	0.05
2000–2006	Атмосферный воздух ($\mathcal{E}_{\text{атм}}$) / Atmospheric air	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
	Предприятия промплощадки ($\mathcal{E}_{\text{пп}}$) / Industrial site enterprises	5.65	0.00002	5.65	0.00002	5.65	0.00002
	Всего ($\Sigma\mathcal{E}$) / Total ($\Sigma\mathcal{E}$)	5.65	0.00022	5.65	0.00022	5.65	0.00022
2007–2023	Атмосферный воздух ($\mathcal{E}_{\text{атм}}$) / Atmospheric air	0	0	0	0	0	0
	Предприятия промплощадки ($\mathcal{E}_{\text{пп}}$) / Industrial site enterprises	8.89	0	8.89	0	8.89	0
	Всего ($\Sigma\mathcal{E}$) / Total ($\Sigma\mathcal{E}$)	8.89	0	8.89	0	8.89	0
Всего ($\Sigma\mathcal{E}$) / Total ($\Sigma\mathcal{E}$)		17.89	3.35	17.39	2.85	14.59	0.05
Среднемноголетняя доза, мг/кг массы / Average long-term dose, mg/kg body weight		0.0064	0.0011	0.0062	0.001	0.005	0.00001
HQ		1.1	0.19	1.03	0.17	0.87	0.003
<i>Мужчины 60 лет / Males 60 years</i>							
До / Before 2000	Атмосферный воздух ($\mathcal{E}_{\text{атм}}$) / Atmospheric air	7.29	7.29	6.21	6.21	0.11	0.11
	Предприятия промплощадки ($\mathcal{E}_{\text{пп}}$) / Industrial site enterprises	18.48	0.41	18.48	0.35	18.48	0.006
	Всего ($\Sigma\mathcal{E}$) / Total ($\Sigma\mathcal{E}$)	25.77	7.7	24.69	6.56	18.59	0.11
2000–2006	Атмосферный воздух ($\mathcal{E}_{\text{атм}}$) / Atmospheric air	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
	Предприятия промплощадки ($\mathcal{E}_{\text{пп}}$) / Industrial site enterprises	6.78	0.00002	6.78	0.00002	6.78	0.00002
	Всего ($\Sigma\mathcal{E}$) / Total ($\Sigma\mathcal{E}$)	6.78	0.00022	6.78	0.00022	6.78	0.00022
2007–2023	Атмосферный воздух ($\mathcal{E}_{\text{атм}}$) / Atmospheric air	0	0	0	0	0	0
	Предприятия промплощадки ($\mathcal{E}_{\text{пп}}$) / Industrial site enterprises	8.89	0	8.89	0	8.89	0
	Всего ($\Sigma\mathcal{E}$) / Total ($\Sigma\mathcal{E}$)	8.89	0	8.89	0	8.89	0
Всего ($\Sigma\mathcal{E}$) / Total ($\Sigma\mathcal{E}$)		41.44	7.7	40.36	6.56	34.26	0.11
Среднемноголетняя доза, мг/кг массы / Average long-term dose, mg/kg body weight		0.0098	0.0018	0.0096	0.0015	0.0081	0.00002
HQ		1.64	0.3	1.6	0.26	1.36	0.004

ртути с воздухом объединённой промплощадки в связи с началом трудовой деятельности увеличилось. Так, у работающих на предприятиях, расположенных на объединённой промплощадке, $\mathcal{E}_{\text{пп}}$ увеличился в 1,7 раза по сравнению с предшествующим периодом. В 2007–2023 гг. в результате продолжительной трудовой деятельности у мужчин, работающих на объединённой промплощадке, независимо от места жительства произошло увеличение $\mathcal{E}_{\text{пп}}$ в 2,6 раза по сравнению с периодом активной эксплуатации цеха ртутного электролиза и в 1,6 раза по отношению к $\mathcal{E}_{\text{пп}}$ в 2000–2006 гг. При этом у мужчин, занятых на производствах, расположенных за пределами объединённой промплощадки, величина $\mathcal{E}_{\text{пп}}$ была нулевой. Кратность превышения $\mathcal{E}_{\text{пп}}$ при работе на территории объединённой промплощадки по отношению к экспозиции за её пределами для лиц, проживающих в I зоне, составила 5,3, во II зоне – 6,1, в III зоне – 291,8. HQ у мужчин, работающих на предприятиях объединённой промплощадки, проживающих в I зоне, соответствует настораживающему уровню, во II и III зонах – допустимому (приемлемому) уровню. Величина HQ у мужчин, работающих на предприятиях за пределами объединённой промплощадки, соответствует минимальному уровню.

Согласно сценарию, у мужчин 60 лет наибольшее ингаляционное поступление ртути приходится на период активной работы цеха ртутного электролиза (см. табл. 3). Максимальная величина $\mathcal{E}_{\text{атм}}$ установлена для мужчин, проживающих в I зоне, минимальная – для проживающих

в III зоне. Так как вклад экспозиции от пребывания на объединённой промплощадке значительно выше, чем от атмосферного воздуха, среднегодовая $\mathcal{E}_{\text{пп}}$ у мужчин, работающих на территории объединённой промплощадки и проживающих в I–III зонах, не имела различий. У мужчин, работающих на предприятиях, расположенных за пределами объединённой промплощадки, величина $\Sigma\mathcal{E}_{\text{до} 2000 \text{ г.}}$ была меньше, чем у мужчин, работающих на территории объединённой промплощадки: в 3,3 раза для проживающих в I зоне, в 3,8 раза – для проживающих во II зоне, в 169 раз – для проживающих в III зоне. В 2000–2006 гг. значение $\mathcal{E}_{\text{атм}}$ снизилось у мужчин независимо от места жительства и места размещения производства до 0,0002 мг/м³. Величина $\mathcal{E}_{\text{пп}}$ у мужчин, работающих на территории объединённой промплощадки, имела максимальное значение и была одинаковой независимо от места жительства – 5,65 мг/м³.

Была определена суммарная среднегодовая экспозиция за весь период исследования у мужчин 60 лет, работающих на предприятиях объединённой промплощадки. Кратность превышения $\mathcal{E}_{\text{пп}}$ у мужчин, работающих на территории объединённой промплощадки, по отношению к величине $\mathcal{E}_{\text{пп}}$ у мужчин, работающих за её пределами, с учётом места жительства составила в I зоне – 5,4, во II зоне – 6,1, в III зоне – 311,4. Рассчитанные дозы ртути у 60-летних мужчин, работающих на объединённой промплощадке, достигали максимальных значений и колебались в пределах 0,0081–0,0098 мг/кг массы тела, у работающих на предприятиях вне границ

объединённой промплощадки – 0,00002–0,0018 мг/кг массы тела. Величины HQ у мужчин 60 лет, работающих на предприятиях объединённой промплощадки и проживающих в I, II и III зонах, соответствует настораживающему уровню риска для здоровья, в то время как у 60-летних мужчин, работающих на предприятиях за границей территории объединённой промплощадки, – минимальному уровню.

Обсуждение

При ликвидации накопленного экологического вреда окружающей среде большое значение имеют установление объёма загрязняющих веществ⁴ и оценка риска воздействия объектов НВОС (объекты, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду) на здоровье населения этих территорий. Для достижения этих целей используются стандартные походы: идентификация опасности, работа с базами данных о токсичности при оценке зависимости дозы от эффекта, перенос при оценке воздействия, характеристика риска и характеристика неопределенности [27, 32]. Одним из подходов является рассмотрение различных сценариев воздействия с учётом общей и пространственной характеристики объекта [33–35].

Исследования состояния здоровья населения территорий, подвергавшихся крупномасштабным и долговременным промышленным загрязнениям, проводятся и за рубежом [4, 5, 27]. Результаты сценарных расчётов, проведённых Zhang Y. и соавт. (2021), показали, что накопленные последствия для здоровья, связанные с воздействием ртути в прогнозный период 2010–2050 гг., составляют 19 трлн долларов США (95%-й ДИ: 4,7–54). Авторы доказывают возможность существенного увеличения глобальных расходов на здравоохранение, если действия по сокращению выбросов ртути будут отложены; комплексный подход к моделированию позволяет оценить эффективность контроля выбросов ртути, как того требует Минаматская Конвенция [36].

Проведённые нами сценарные расчёты позволили определить на уровне индивидуума вклад поступления ртути из воздушной среды объединённой промплощадки. Оценка загрязнения воздуха объединённой промышленной площадки химического предприятия и атмосферного воздуха селитебной зоны модельного города в периоды активной деятельности цеха ртутного электролиза, демонтажа оборудования и в постэксплуатационный период позволила выявить тенденцию к снижению концентраций ртути. В период с 2001 г. ртуть в воздухе селитебной зоны не выявлена. Таким образом, наибольшая опасность для здоровья населения обусловлена концентрациями ртути в воздушной среде объединённой промплощадки и селитебной зоны в период до 2000 г. и в 2000–2006 г.

Результаты исследований показали, что для мужчин в возрасте 20 лет (родившихся после прекращения деятельности предприятия – источника поступления ртути) за весь период жизни не формируется уровней экспозиции, опасных для здоровья взрослого человека. Что касается других возрастных групп, то в 40 лет настораживающий уровень риска установлен для мужчин, работающих на предприятиях, размещённых на территории объединённой промплощадки и проживающих в I зоне. У мужчин данной группы величина суммарной среднегодовой дозы в период до 2000 г. определяется атмосферным воздействием ртути на 18,7%, в 2000–2006 и 2007–2023 гг. – поступлением ртути с воздухом объединённой промплощадки (на 31,6 и 49,7% соответственно). Следовательно, у мужчин 40 лет, работающих в условиях промплощадки, настораживающий уровень риска обусловлен атмосферным воздействием ртути в период активной работы цеха ртутного электролиза и работой на предприятии, расположенному на территории объединённой промплощадки, в переходном и постэксплуатационном периодах. Заслуживает внимания тот факт, что для мужчин, работаю-

щих в условиях объединённой промплощадки, но проживающих на расстоянии более 3 км от источников загрязнения, уровень риска является допустимым и минимальным.

По результатам проведённого исследования группой наибольшего риска являются мужчины 60 лет, работавшие на предприятии, размещённом на территории объединённой промплощадки, независимо от места жительства (I–III зоны). Наибольший вклад в величину суммарной среднегодовой дозы обусловлен поступлением ртути в период активной работы цеха ртутного электролиза в I зоне – на 62,2%, во II зоне – на 61,2%, в III зоне – на 54,3%. Отметим, что концентрации ртути в атмосферном воздухе на территории III зоны находились в пределах ПДК. В последующие периоды (2000–2006 и 2007–2023 гг.) величина суммарной среднегодовой дозы полностью определялась поступлением ртути с воздухом объединённой промплощадки.

Размещение на единых промплощадках нескольких предприятий определяет экспозицию для лиц, не занятых непосредственно на особо опасных производствах. Формирование таких зон, которые можно рассматривать как крупный площадной источник загрязнения сложнейшим комплексом загрязнителей, связано в первую очередь с экономическими причинами. Лица, принимающие управленические решения на муниципальном и корпоративном уровнях, заинтересованы в приближении производств к источникам энергии, сокращении протяжённости городских инженерных коммуникаций, максимальном использовании трудовых ресурсов и городских земель [37, 38]. С учётом биокумуляции ртути в организме и отсроченных последствий для здоровья необходимо осуществлять динамическое наблюдение за здоровьем населения, подвергавшегося воздействию на различных уровнях. С позиции персонализированной медицины важно определить индивидуальную принадлежность к группе риска развития отдалённых последствий воздействия ртути на здоровье населения территории НВОС. Это заставляет обратить особое внимание на программы периодических медицинских осмотров и диспансеризации населения на территориях размещения крупных промышленных агломераций и возможность переноса поллютантов в пределах больших территорий.

Ограничения исследования. Использование в сценариях стандартных условий воздействия, не учитывающих индивидуальных особенностей суточной экспозиции и профессионального маршрута, неполные данные о фактических уровнях содержания поллютанта в воздушной среде объединённой промышленной площадки и селитебной зоны в течение рассматриваемого периода вносят неопределённости в представленные оценки. Применение неполных данных мониторинга и схем размещения ртутного производства в «модельном» городе ограничивают экстраполяцию результатов на другие группы населения. Кроме того, в сценариях не рассматривалась группа мужчин, работавших в цехе ртутного электролиза в различные периоды функционирования предприятия.

Заключение

Исследование многолетней ингаляционной хронической экспозиции при поступлении ртути с выбросами химического предприятия в приземные слои атмосферного воздуха с учётом двадцатилетнего постэксплуатационного периода показало, что к группе с настораживающим уровнем риска относятся мужчины 60 лет, не имеющие прямого контакта с ртутью, но работающие на предприятиях, расположенных на территории объединённой промплощадки.

Предложенный подход оценки многолетней экспозиции при различных функциональных режимах действия предприятия – источника поступления токсиканта в воздушную среду после устранения основных неопределённостей количественной оценки экспозиции может быть использован при прогнозировании величины накопленного вреда для здоровья населения, обосновании мер профилактики, а также при разработке планов социально-экономического развития регионов.

⁴ Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ (ред. от 25.12.2023 г.). Принят Государственной Думой 20.12.2001 г., одобрен Советом Федерации 26.12.2001 г. (ст. 80.1).

Литература

(п.п. 4, 9, 10, 17, 18, 26, 27, 32, 34–36 см. References)

1. Пичугин Е.А., Шенфельд Б.Е. Здоровье граждан и продолжительность их жизни как критерий при оценке негативного воздействия объектов накопленного вреда окружающей среды на состояние окружающей среды и человека. *Экология урбанизированных территорий*. 2021; (3): 62–70. <https://elibRARY.ru/mdybdh>
2. Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В., Гусков А.С., Колесникова Н.И., Максимова Е.В. Методические подходы и некоторые результаты оценки объектов накопленного вреда окружающей среды по критериям риска для здоровья населения. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(5): 523–31. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-5-523-531> <https://elibRARY.ru/tuttyj>
3. Онищенко Г.Г. Развитие методологии анализа риска с учетом современных проблем безопасности здоровья населения в Российской Федерации: актуальные проблемы и перспективы. *Анализ риска здоровью*. 2023; (4): 4–18. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.4.01> <https://elibRARY.ru/ccjwaj>
4. 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. <https://elibRARY.ru/tiwimz>
5. Рапута В.Ф., Амикшиева Р.А., Ярославцева Т.В. Анализ выносов ртути с промплощадки «Усольехимпром». *Интерэкско Гео-Сибирь*. 2021; 4(1): 193–8. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-1-193-198> <https://elibRARY.ru/njbbug>
6. Бухтияров И.В., Салагай О.О., Тихонова Г.И., Чурanova А.Н., Горчакова Т.Ю. Социально-гигиенические проблемы и смертность населения после ликвидации градообразующего предприятия по производству химически опасных веществ (на примере г. Усолье-Сибирское Иркутской области). *Медицина труда и промышленная экология*. 2021; 61(12): 768–80. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-12-768-780> <https://elibRARY.ru/jonwj>
7. Кучерская Т.И., Аликаева Л.А., Якубова И.Ш., Рыжков А.Л., Мошев А.Н., Фомин М.В. и др. Характеристика территории ртутного загрязнения как объектов накопленного вреда окружающей среды (научный обзор). *Профилактическая и клиническая медицина*. 2024; (4): 22–9. <https://elibRARY.ru/yabsly>
8. Рукавишников В.С., Ефимова Н.В., Безгодов И.В., Забуга Г.А., Горбунова О.В., Гребенщикова В.И. Оценка опасности содержания ртути в объектах урбанизированной среды (на примере населенных мест Иркутской области). *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2013; (3): 26–32. <https://elibRARY.ru/qouimt>
9. Лахман О.Л., Салагай О.О., Катаманова Е.В., Кудаева И.В., Журба О.М., Кодинец И.Н. и др. Опыты изучения состояния здоровья ликвидаторов по устранению загрязнения окружающей среды, связанного с производством химической продукции. *Медицина труда и промышленная экология*. 2021; 61(12): 781–6. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-12-781-786> <https://elibRARY.ru/bxrrkj>
10. Катаманова Е.В., Русанова Д.В., Казакова П.В. Нейрофизиологические и психологические показатели ликвидаторов химического загрязнения окружающей среды. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(12): 1303–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-12-1303-1308> <https://elibRARY.ru/ohpsbz>
11. Мыльникова И.В., Ушакова О.В., Ефимова Н.В., Катаманова Е.В. Сравнительный анализ первичной заболеваемости населения на территории накопленного вреда в постэксплуатационный период химического предприятия. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(9): 932–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-932-939> <https://elibRARY.ru/hvonnw>
12. Гагарин С.А., Малькова И.Л., Семакина А.В. Вклад выбросов промышленных зон г. Ижевска в формирование медико-экологической ситуации. *Известия Русского географического общества*. 2019; 151(6): 46–57. <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151646-57> <https://elibRARY.ru/bfguv>
13. Соловьев В.В., Пшегода А.Е., Соколов С.М., Грищенко Т.Д. Санитарно-гигиеническая оценка проектных решений при корректировке объединенной санитарно-защитной зоны территориального промышленного комплекса. *Здоровье и окружающая среда*. 2023; (33): 38–45. <https://elibRARY.ru/fcilwy>
14. Пичугин Е.А., Шенфельд Б.Е. The health of citizens and their life expectancy as a criterion for assessing the negative impact of objects of accumulated environmental damage on the state of the environment and man. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*. 2021; (3): 62–70. <https://elibRARY.ru/mdybdh> (in Russian)
15. Zaitseva N.V., May I.V., Kleyn S.V., Guskov A.A., Kolesnikova N.I., Maksimova E.V. Methodological approaches and some results of the assessment of objects of accumulated environmental damage according to public health risk criteria. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(5): 523–31. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-5-523-531> <https://elibRARY.ru/tuttyj> (in Russian)
16. Onishchenko G.G. Development of the risk analysis methodology given the current safety challenges for public health in the Russian Federation: vital issues and prospects. *Analiz risika zdorov'yu*. 2023; (4): 4–18. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.4.01> <https://elibRARY.ru/ccjwaj> (in Russian)
17. Плеханов В.П., Кирьянова М.Н., Маркова О.Л. Оценка риска для здоровья сварщиков (ретроспективное исследование). *Гигиена и санитария*. 2023; 102(8): 861–7. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-8-861-867> <https://elibRARY.ru/btlkcj>
18. Дерябин А.Н., Унгуярну Т.Н., Бузинов Р.В. Риск здоровью населения, связанный с экспозицией химических веществ почвы. *Анализ риска здоровью*. 2019; (3): 18–25. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.3.02> <https://elibRARY.ru/mohxq>
19. Клейн С.В., Вековшинина С.А. Приоритетные факторы риска питьевой воды систем централизованного питьевого водоснабжения, формирующие негативные тенденции в состоянии здоровья населения. *Анализ риска здоровью*. 2020; (3): 49–60. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.06> <https://elibRARY.ru/tkvfdn>
20. Кику П.Ф., Ананьев В.Ю., Кислицына Л.В., Морева В.Г., Кондратьев К.В., Сабирова К.М. и др. Риск воздействия на здоровье населения Приморского края химических контаминантов в продуктах питания. *Экология человека*. 2017; (11): 18–22. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2017-11-18-22> <https://elibRARY.ru/zskchr>
21. Богданова О.Г., Ефимова Н.В., Багаева Е.Е., Тармаева Н.А. Оценка риска для здоровья населения, связанного с содержанием в растениеводческой продукции нитратов. *Вопросы питания*. 2021; 90(3): 40–9. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-3-40-49> <https://elibRARY.ru/fwwdq>
22. Осинова Т.С., Федоренко Е.В., Чеботкова Д.В., Лебединская К.С. Оценка алиментарной экспозиции отдельными органическими соединениями, ассоциированными с полилактидными материалами, контактирующими с пищевой продукцией. *Здоровье и окружающая среда*. 2023; (33): 100–8. <https://doi.org/10.21668/hzmusn>
23. Прилипко Н.С., Турбинский В.В., Борбовницкий И.П. Гигиеническая оценка персонализированного риска здоровью для профилактики экологически обусловленных заболеваний в системе первичной медико-санитарной помощи населению. Обзор. *Russian Journal of Rehabilitation Medicine*. 2020; (3): 5–35. <https://elibRARY.ru/btwwbr>
24. Лахман О.Л., Рукавишников В.С., Шаяхметов С.Ф., Соседова Л.М., Катаманова Е.В., Бодиенкова Г.М. и др. Профессиональные нейроинтоксикации: клинико-экспериментальные исследования. *Медицина труда и промышленная экология*. 2015; 55(9): 82–3. <https://elibRARY.ru/umgqn>
25. Мешакова Н.М., Дьякович М.П., Шаяхметов С.Ф., Лисецкая Л.Г. Формирование рисков нарушения здоровья у работников, экспонированных ртутью. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(10): 945–50. <https://elibRARY.ru/yoscqwt>
26. Безгодов И.В. *Гигиеническая оценка ртутного загрязнения в Иркутской области*: Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. Иркутск; 2006. <https://elibRARY.ru/qeadub>
27. Якимова Н.Л., Соседова Л.М. Ретроспективный анализ ртутного загрязнения производственной среды в цехах ОАО «Усольехимпром» и «Саянскхимпласт». *Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2009; (5–6): 71–4. <https://elibRARY.ru/llwqgl>
28. Костарев В.Г., Шляпников Д.М., Бражкин А.В., Паздерина Т.Г., Май И.В., Максимова Е.В. Оценка и ранжирование объектов накопленного вреда окружающей среды по критериям риска для здоровья населения: опыт Пермского края. *Анализ риска здоровью*. 2025; (1): 51–62. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2025.1.05> <https://elibRARY.ru/pneznq>
29. Май И.В., Вековшинина С.А., Клейн С.В., Никифорова Н.В. Методические подходы к обоснованию размещения объекта по производству пищевой продукции в границах санитарно-защитных зон предприятий иных отраслей промышленности. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(11): 1308–14. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1308-1314> <https://elibRARY.ru/efxfdk>
30. Мамчик Н.П., Данилов А.Н., Каменева О.В., Шабаева О.Н. Особенности обоснования границ санитарно-защитных зон промышленных предприятий в условиях сложившейся застройки. *Санитарный врач*. 2024; (12): 876–82. <https://doi.org/10.33920/med-08-2412-05> <https://elibRARY.ru/krypnq>

References

1. Pichugin E.A., Shenfeld B.E. The health of citizens and their life expectancy as a criterion for assessing the negative impact of objects of accumulated environmental damage on the state of the environment and man. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*. 2021; (3): 62–70. <https://elibRARY.ru/mdybdh> (in Russian)
2. Zaitseva N.V., May I.V., Kleyn S.V., Guskov A.A., Kolesnikova N.I., Maksimova E.V. Methodological approaches and some results of the assessment of objects of accumulated environmental damage according to public health risk criteria. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(5): 523–31. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-5-523-531> <https://elibRARY.ru/tuttyj> (in Russian)
3. Onishchenko G.G. Development of the risk analysis methodology given the current safety challenges for public health in the Russian Federation: vital issues and prospects. *Analiz risika zdorov'yu*. 2023; (4): 4–18. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.4.01> <https://elibRARY.ru/ccjwaj> (in Russian)
4. Reboucas R.C., Santos E.C.O., Oliveira L.C., Jesus I.M., Silva R.F., Câmara V.M., et al. Long-term environmental methylmercury exposure is associated with neurotoxicity in the Yanomami population. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2024; 21(3): 544–58.
5. Ilchenko I.N. The review of studies concerning evaluation of effect of mercury on population in post-soviet countries using data of human biomonitoring. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii*. 2015; 59(1): 48–53. <https://elibRARY.ru/tiwimz> (in Russian)
6. Raputa V.F., Amikshieva R.A., Yaroslavtseva T.V. The analysis of mercury emissions from “Usolyekhimprom” industrial site. *Interespo Geo-Sibir*. 2021; 4(1): 193–8. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-1-193-198> <https://elibRARY.ru/njbbug> (in Russian)
7. Bulkhiyarov I.V., Salagai O.O., Tikhonova G.I., Churanova A.N., Gorchakova T.Yu. Social and hygienic problems and mortality of the population after the liquidation

- of a city-forming enterprise for the production of chemically hazardous substances (on the example of Usolye-Sibirskoye, Irkutsk region). *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2021; 61(12): 768–80. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-12-768-780> <https://elibrary.ru/jonwv> (in Russian)
8. Kucherskaya T.I., Alikbaeva L.A., Yakubova I.Sh., Ryzhkov A.L., Moschev A.N., Fomin M.V., et al. Characteristics of mercury pollution territories as objects of accumulated harm to the environment (scientific review). *Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina*. 2024; (4): 22–9. <https://elibrary.ru/yablsy> (in Russian)
 9. U.S. Department of Health and Human Services. Toxicological Profile for Mercury. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR); 2024.
 10. Wu Y.S., Osman A.I., Hosny M., Elgarahy A.M., Eltaweil A.S., Rooney D.W., et al. The toxicity of mercury and its chemical compounds: molecular mechanisms and environmental and human health implications: a comprehensive review. *ACS Omega*. 2024; 9(5): 5100–26. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07047>
 11. Rukavishnikov V.S., Efimova N.V., Bezgodov I.V., Zabuga G.A., Gorbunova O.V., Grebenchikova V.I. Risk estimation of mercury content in the urban environmental objects (on example, Irkutsk region settlements). *Problemy bezopasnosti i chrezvyachainykh situatsii*. 2013; (3): 26–32. <https://elibrary.ru/quouim> (in Russian)
 12. Lakhman O.L., Salagai O.O., Katamanova E.V., Kudaeva I.V., Zhurba O.M., Kodinet I.N., et al. The experience in studying the health status of liquidators to eliminate environmental pollution associated with the production of chemical products. *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2021; 61(12): 781–6. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-12-781-786> <https://elibrary.ru/bxrrkj> (in Russian)
 13. Katamanova E.V., Rusanova D.V., Kazakova P.V. Neurophysiological and psychological indicators of liquidators of chemical pollution of the environment. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(12): 1303–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-12-1303-1308> <https://elibrary.ru/ohpsbz> (in Russian)
 14. Mylnikova I.V., Ushakova O.V., Efimova N.V., Katamanova E.V. Comparative analysis of the primary morbidity in the population in the territory of accumulated risk over the post-operation period of a chemical enterprise. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2024; 103(9): 932–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-932-939> <https://elibrary.ru/hvonnw> (in Russian)
 15. Gagarin S.A., Malkova I.L., Semakina A.V. The contribution of emissions from industrial zones of Izhevsk to the formation of the medical and ecological situation. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2019; 151(6): 46–57. <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151646-57> <https://elibrary.ru/bfguvs> (in Russian)
 16. Soloviov V.V., Pshegoda A.E., Sokolov S.M., Gritsenko T.D. Sanitary-hygienic assessment of design solutions for the establishment of sanitary protective zones of the territorial industrial complex. *Zdorov'e i okruzhayushchaya sreda*. 2023; (33): 38–45. <https://elibrary.ru/fciwy> (in Russian)
 17. Amano K.O.A., Ntiri-Asiedu A.G. Mercury emission from the aluminium industry: a review. *M.O.J. Eco Environ. Sci.* 2020; 5(3): 129–35. <https://doi.org/10.15406/mojes.2020.05.00185>
 18. Fields C.A., Borak J., Louis E.D. Mercury-induced motor and sensory neurotoxicity: systematic review of workers currently exposed to mercury vapor. *Crit. Rev. Toxicol.* 2017; 47(10): 811–44. <https://doi.org/10.1080/10408444.2017.1342598>
 19. Plekhanov V.P., Kir'yanova M.N., Markova O.L. Health risk assessment for welders (retrospective study). *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(8): 861–7. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-8-861-867> <https://elibrary.ru/btlkj> (in Russian)
 20. Deryabin A.N., Unguryanu T.N., Buzinov R.V. Population health risk caused by exposure to chemicals in soils. *Health risk analysis*. 2019; (3): 18–25. <https://doi.org/10.2166/health.risk/2019.3.02.eng> <https://elibrary.ru/rywakz>
 21. Kleyn S.V., Vekovshinina S.A. Priority risk factors related to drinking water from centralized water supply system that create negative trends in population health. *Health Risk Analysis*. 2020; (3): 48–59. <https://doi.org/10.2166/health.risk/2020.3.06.eng> <https://elibrary.ru/sqzcl>
 22. Kiku P.F., Ananov V.Yu., Kislisina L.V., Moreva V.G., Kondratyev K.V., Sabirova K.M., et al. The risk of impact on the health of the population of Primorye territory contaminant chemical in food. *Ekologiya cheloveka*. 2017; (11): 18–22. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2017-11-18-22> <https://elibrary.ru/zskchr> (in Russian)
 23. Bogdanova O.G., Efimova N.V., Bagaeva E.E., Tarmaeva N.A. Risk assessment for public health associated with nitrate content in crop products. *Voprosy pitaniya*. 2021; 90(3): 40–9. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-3-40-49> <https://elibrary.ru/fwwoq> (in Russian)
 24. Osipava T.S., Fedorenko E.V., Chebotkova D.V., Lebedinskaya K.S. Assessment of alimentary exposure to selected organic compounds associated with polylactide food contact materials. *Zdorov'e i okruzhayushchaya sreda*. 2023; (33): 100–8. <https://elibrary.ru/hzmusn> (in Russian)
 25. Prilipko N.S., Turbinsky V.V., Bobrovitsky I.P. Hygienic evaluation of personalized health risk for prevention of environmentally diseased diseases in the primary health care system. Overview. *Russian Journal of Rehabilitation Medicine*. 2020; (3): 5–35. <https://elibrary.ru/btuwr> (in Russian)
 26. GBD 2021 Tobacco Forecasting Collaborators. Forecasting the effects of smoking prevalence scenarios on years of life lost and life expectancy from 2022 to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet Public Health*. 2024; 9(10): e729–44. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(24\)00166-X](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(24)00166-X)
 27. Zhang S., Han Y., Peng J., Chen Y., Zhan L., Li J. Human health risk assessment for contaminated sites: A retrospective review. *Environ. Int.* 2023; 171: 107700. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107700>
 28. Lakhman O.L., Rukavishnikov V.S., Shahaymetov S.F., Sosedova L.M., Katamanova E.V., Bodienkova G.M., et al. Occupational neurointoxications: clinical and experimental research. *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2015; 55(9): 82–3. <https://elibrary.ru/umgnh> (in Russian)
 29. Meshchakov N.M., Dyakovich M.P., Shayakhmetov S.F., Lisetskaya L.G. Formation of risks for a health disaster in workers, exposed to mercury. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2018; 97(10): 945–50. <https://elibrary.ru/yocwt> (in Russian)
 30. Bezgodov I.V. *Hygienic Assessment of Mercury Pollution in the Irkutsk Region*: Diss. Irkutsk; 2006. <https://elibrary.ru/qeaubd> (in Russian)
 31. Yakimova N.L., Sosedova L.M. Retrospective analysis of mercury contamination of production environment in the shops of joint-stock "Ussolyechimprom" and "Sayanskchimplast". *Byulleten' Vostochno-Sibirskego nauchnogo tsentra Sibirskego otdeleniya Rossijskoj akademii meditsinskikh nauk*. 2009; (5–6): 71–4. <https://elibrary.ru/lwiql> (in Russian)
 32. Pasetto R., Zona A., Marsili D., Buratti F.M., Iavarone I., Soggiu M.E., et al. Promotion of environmental public health and environmental justice in communities affected by large and long lasting industrial contamination: methods applied and lessons learned from the case study of Porto Torres (Italy). *Front. Public Health*. 2024; 12: 1408127. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1408127>
 33. Kostarev V.G., Shlyapnikov D.M., Brazhkin A.V., Pazderina T.G., May I.V., Maksimova E.V. Assessing and ranking of brownfields per health risk criteria: experience gained in the Perm Region. *Analiz risika zdorov'yu*. 2025; (1): 51–62. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2025.1.05> <https://elibrary.ru/nneznq> (in Russian)
 34. Chalvatzaki E., Chatoutsidou S.E., Almeida S.M., Morawska L., Lazaridis M. The representativeness of outdoor particulate matter concentrations for estimating personal dose and health risk assessment of school children in Lisbon. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023; 20(8): 5564. <https://doi.org/10.3390/ijerph20085564>
 35. Hassan Bhat T., Jiawen G., Farzaneh H. Air Pollution Health Risk Assessment (AP-HRA), principles and applications. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021; 18(4): 1935. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041935>
 36. Zhang Y., Song Z., Huang S., Zhang P., Peng Y., Wu P., et al. Global health effects of future atmospheric mercury emissions. *Nat. Commun.* 2021; 12(1): 3035. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23391-7>
 37. May I.V., Vekovshinina S.A., Kleyn S.V., Nikiforova N.V. Methodical approaches to the substantiation of accommodation of the object for food products in the boundaries of sanitary-protective zones of enterprises of other lines of the industry. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(11): 1308–14. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1308-1314> <https://elibrary.ru/efxfdk> (in Russian)
 38. Mamchik N.P., Danilov A.N., Kameneva O.V., Shabaeva O.N. Features of substantiation of the boundaries of sanitary protection zones of industrial enterprises in the conditions of the current development. *Sanitarnyi vrach.* 2024; (12): 876–82. <https://doi.org/10.33920/med-08-2412-05> <https://elibrary.ru/krynmq> (in Russian)

Сведения об авторах

Мыльникова Инна Владимировна, доктор мед. наук, доцент, ст. науч. сотр. ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: inna.mylnikova.phd.ms@gmail.com

Ефимова Наталья Васильевна, доктор мед. наук, профессор, вед. науч. сотр. ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: med_eco_lab@list.ru

Савченков Михаил Федосович, доктор мед. наук, профессор, академик РАН, почётный профессор ФГБНУ ВСИМЭИ, 664003, Иркутск, Россия. E-mail: mfs36@mail.ru

Information about the authors

Inna V. Mylnikova, DSc (Medicine), associate professor, senior researcher, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0169-4513> E-mail: inna.mylnikova.phd.ms@gmail.com

Natalya V. Efimova, DSc (Medicine), professor, leading researcher, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7218-2147> E-mail: med_eco_lab@list.ru

Mikhail F. Savchenkov, DSc (Medicine), professor, academician of the RAS, professor emeritus, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, 664003, Irkutsk, Research, <https://orcid.org/0000-0002-1246-8327> E-mail: mfs36@mail.ru