

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ УРОВНЕЙ РИСКА ЗДОРОВЬЮ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕТАЛЛОВ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Пшегрода А. Е., Соловьев В. В., Соколов С. М.

*Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены»,
г. Минск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассматривается вопрос практического применения метода оценки уровней риска здоровью при комплексном воздействии металлов и их соединений в виде апробации методических подходов, описанных в инструкции по применению, разработанной специалистами Научно-практического центра гигиены в рамках выполнения задания «Научно обосновать критерии установления уровней приемлемого риска здоровью при комплексном воздействии металлов и их соединений» подпрограммы «Безопасность среды обитания человека» ГНТП «Научно-техническое обеспечение качества и доступности медицинских услуг», 2021–2025 годы.

Ключевые слова: металлы и их соединения, пути поступления, комплексное воздействие, свинец и его соединения, риск хронического действия, суммарный риск, гигиеническая оценка.

Введение. В настоящее время вопрос оценки и профилактики комплексного воздействия факторов окружающей среды на организм человека и определения приемлемости соответствующего риска для здоровья достаточно актуален, в том числе ввиду роста антропогенного влияния на среду обитания. Тяжелые металлы поступают в окружающую среду в основном в результате деятельности промышленных объектов со стоками, дымом, пылью, обладают токсическим действием на организм человека, в том числе кумулятивным. Выделяют приоритетную группу токсичных металлов, в которой наиболее выраженным действием обладают ртуть, свинец и кадмий. Распространенность металлов в окружающей среде — почве, воде, атмосферном воздухе — создает множественность путей возможного поступления в организм, в то же время токсичность и способность накапливаться в организме определяет возможность реализации спектра патологических эффектов. Учитывая, что для острых эффектов необходимо поступление металлов в значительных дозах, что является относительно редким явлением, больший приоритет имеют эффекты хронические, кумулятивного характера. Длительное поступление металлов и их соединений в организм даже в небольших количествах несет в себе риски развития патологических эффектов. Возможность дать гигиеническую оценку прогнозируемым рискам позволяет выработать обоснованные механизмы управления рисками и минимизации возможности проявления стохастических патологических эффектов. Одним из металлов, обладающих способностью накапливаться в человеческом организме, является свинец, а также его соединения. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) включила свинец и его соединения в перечень 10 химических веществ, вызывающих основную обеспокоенность с точки зрения здоровья населения и требующих от государств — членов действий по защите трудящихся, детей и женщин детородного возраста. Свинец является природным токсичным металлом, который встречается в земной коре. В качестве органов-мишеней при хронической интоксикации свинцом и его соединениями в организме выступают печень, почки, мозг, свинец способен аккумулироваться в костной ткани. Его широкое при-

менение привело к масштабному загрязнению окружающей среды, попаданию свинца в организм человека и к существенным проблемам общественного здравоохранения во многих районах мира. Важными источниками загрязнения окружающей среды данным металлом являются добыча, выплавка свинца, его использование в промышленном производстве, переработка вторсырья, а также применение свинца в составе широкого ассортимента продукции: электробатареях для транспорта, пигментах, красках, припое, витражах, посуде из свинцового хрусталя, боеприпасах, керамической глазури, ювелирных изделиях. По оценке ВОЗ не существует безопасного уровня поступления свинца в организм, при котором, согласно имеющимся данным, не возникает вредных последствий [1]. Свинец обладает также канцерогенным потенциалом, при ингаляционном поступлении по данным Международного агентства по изучению рака (МАИР) и Агентства охраны окружающей среды США (U.S.EPA), относится к вероятным канцерогенам для человека (группы A2 и B2 соответственно) [2]. Принимая во внимание токсикологические характеристики при поступлении в организм человека из разных сред, на раннем этапе апробации метода свинец и его соединения были нами приоритетно выделены для проведения исследований.

Цель работы — на основании имеющихся фактических данных исследований проб атмосферного воздуха, воды, почвы, пищевых продуктов определить и дать гигиеническую оценку уровням риска здоровью при комплексном воздействии металлов и их соединений при сочетании различных путей поступления в организм для апробации применения методических подходов, описанных в инструкции по применению «Метод оценки уровней риска здоровью при комплексном воздействии металлов и их соединений» (далее — инструкция по применению) [3].

Материалы и методы. Исследования проводились специалистами лаборатории технологий анализа рисков здоровью республиканского унитарного предприятия «Научно-практический центр гигиены» в рамках выполнения задания 01.05 «Научно обосновать критерии установления уровней приемлемого риска здоровью при комплексном

воздействии металлов и их соединений» под-программы «Безопасность среды обитания человека» ГНТП «Научно-техническое обеспечение качества и доступности медицинских услуг», 2021–2025 годы.

Для проведения апробации метода оценки уровней риска здоровью при комплексном воздействии металлов и их соединений были использованы данные лабораторных исследований проб пищевых продуктов, воды, атмосферного воздуха, почвы, отобранных на различных территориях в 2020 г. Для определения фактической величины алиментарной экспозиции приоритетных металлов и их соединений исследовались следующие условные группы пищевой продукции: крупы, макароны, бобовые; хлебобулочные изделия; молочные продукты и яйца; мясо и мясные продукты; рыба и рыбные продукты; овощи, включая зелень и картофель; фрукты и ягоды; масложировая продукция; кондитерские изделия; сухофрукты, орехи, семена. Всего в расчет были приняты результаты исследований 123 образцов продуктов питания. Параметры потребления пищевых продуктов как моделируемый фактор экспозиции были приняты, основываясь на данных [4]. Для определения фактических содержаний приоритетных металлов и их соединений в питьевой воде в расчет приняты пробы воды из различных районов как централизованных, так и нецентрализованных систем водоснабжения. Для определения фактических содержаний приоритетных металлов и их соединений в почве были проанализированы результаты исследований образцов, отобранных из различных регионов. Расчеты по данным поступления из атмосферного воздуха также были приняты по фактическим усредненным результатам полученных исследований в различных регионах.

Произведены расчеты потенциальных рисков длительного (хронического) воздействия при ингаляционном, пероральном, трансдермальном путях поступления свинца, а также суммарного риска хронического действия при комплексном поступлении с использованием формул и согласно методике, изложенной в инструкции по применению [3], дана гигиеническая оценка полученным уровням риска.

Результаты и их обсуждение. Алгоритм оценки уровней риска здоровью при ком-

плексном воздействии свинца и его соединений представлен ниже.

1. *Расчет длительного (хронического) риска при поступлении свинца и его соединений с продуктами питания.* При анализе результатов проведенных лабораторных исследований установлено, что содержание свинца в продуктах питания в концентрациях выше нижней границы диапазона измерений (0,016 мг/кг) отмечено в 10,6 % проб, превышений нормативов в исследованном массиве проб не выявлялось. Наибольшая концентрация отмечена в пробах молока стуженного (0,298 мг/кг) и сушеных морских водорослей (0,463 мг/кг).

Содержание свинца в образцах, превышающее нижнюю границу диапазона измерений, выявлено в пробах следующих продуктов: изюм, курага, крупа пшено шлифованное, рис, пирожное, виноград, конфеты, масло сливочное, бедро куриное, пирожное, грибы сушеные.

Для расчета потребления перечисленных выше пищевых продуктов в течение года, опираясь на данные [5], принято в количестве: рис — 7,0 кг; крупа прочая — 7,0 кг; виноград свежий — 3,0 кг; виноград сушеный — 0,2 кг; куриные окорочка — 6,0 кг; молочные консервы — 1,0 кг; маргарин и другие жиры — 1,0 кг; грибы сушеные — 0,1 кг.

Среднесуточная доза поступления (ADD) рассчитывается согласно формуле

$$ADD = D_{r_{\text{гac}}} / (BW \cdot AT), \quad (1)$$

где ADD — среднесуточная доза в течение периода осреднения экспозиции (величина поступления), мг/кг массы тела в сутки; $D_{r_{\text{гac}}}$ — величина потенциальной дозы контаминанта, связанной с рационом в целом, мг/сут; BW — масса тела человека, кг (70); AT — период осреднения экспозиции (продолжительность жизни), лет (70).

Среднесуточная доза поступления по результатам расчетов составила $8,42E-05$ мг/кг \times сут.

Потенциальный риск неспецифических токсических эффектов, связанный с потреблением свинца и его соединений, рассчитан по формуле

$$\text{Risk}_{\text{хр.пр.п}} = 1 - \exp((\ln(0,84) \times (ADD/(R_{\text{fd}} \cdot K_3))^b), \quad (2)$$

где $\text{Risk}_{\text{хр.пр.п}}$ — потенциальный риск неспецифических токсических эффектов для здоровья человека,

связанный с потреблением загрязненных пищевых продуктов; ADD — среднесуточная доза, поступающая с рационом, усредненная с учетом массы тела, мг/кг массы тела в день; Rfd — референтная доза; K_3 — коэффициент запаса; b — коэффициент, учитывающий класс опасности и кумулятивные свойства контаминанта;

$$\text{Risk}_{\text{хр.пр.п}} = 4,19\text{E-}05.$$

При данной величине $\text{Risk}_{\text{хр.пр.п}}$ риск оценивается как «приемлемый».

2. *Расчет длительного (хронического) риска при поступлении свинца и его соединений с атмосферным воздухом.* При анализе результатов загрязнения атмосферного воздуха установлено, что максимальная концентрация свинца и его соединений в массиве исследованных проб составила 0,20 мкг/м³.

Учитывая, что загрязняющее вещество свинец и его соединения относится к 1-му классу опасности, предельно допустимая концентрации составляет 1,0 мкг/м³, расчет длительного (хронического) риска при поступлении в организм человека свинца и его соединений с атмосферным воздухом проводится согласно формуле

$$\text{Risk}_{\text{хр.атм.в}} = 1 - \exp(1\pi(0,84) \cdot (C/\text{ПДК}_{\text{с.с}})^b / K_3), \quad (3)$$

где $\text{Risk}_{\text{хр.атм.в}}$ — вероятность развития неспецифических токсических эффектов при хроническом ингаляционном воздействии металлов и их соединений; C — среднесуточная концентрация металлов и их соединений, мкг/м³; $\text{ПДК}_{\text{с.с}}$ — среднесуточная предельно допустимая концентрация металлов и их соединений, мкг/м³ (ПДК); K_3 — коэффициент запаса (значения меняются в зависимости от класса опасности металлов и их соединений), для веществ 1-го класса — 7,5; b — значения коэффициента устанавливаются в зависимости от класса опасности металлов и их соединений, для веществ 1-го класса — 2,35;

$$\text{Risk}_{\text{хр.атм.в}} = 1 - \exp(1\pi(0,84) \cdot (0,20/0,3)^{2,35}/7,5);$$

$$\text{Risk}_{\text{хр.атм.в}} = 1,04\text{E-}03.$$

При данной величине $\text{Risk}_{\text{хр.атм.в}}$ риск оценивается как «приемлемый».

3. *Расчет длительного (хронического) риска при поступлении свинца и его соединений с питьевой водой.* При анализе результатов исследований питьевой воды установлено, что превышений гигиенического норматива не выявлено, удельный вес проб с содержанием свинца в концентрациях выше нижней

границы диапазона измерений (0,003 мг/дм³) составил 2,8 %, максимальное содержание свинца и его соединений в массиве исследованных проб составило 0,008 мг/дм³. ПДК свинца в воде составляет 0,03 мг/дм³, свинец относится к веществам 2-го класса опасности. Расчет потенциального риска длительного (хронического) воздействия при поступлении свинца и его соединений в организм человека с питьевой водой пероральным путем ($\text{Risk}_{\text{хр.пв}}$) проводим по формуле

$$\text{Risk}_{\text{хр.пв}} = 1 - \exp((1\pi(0,84)/(\text{ПДК} \cdot K_3)) \cdot C), \quad (4)$$

где C — концентрация металлов и их соединений в питьевой воде, мг/л; ПДК — предельно допустимая концентрация металлов и их соединений в воде, мг/л; K_3 — коэффициент запаса (10);

$$\text{Risk}_{\text{хр.пв}} = 1 - \exp((\ln(0,84)/(0,03 \times 10)) \cdot 0,008),$$

$$\text{Risk}_{\text{хр.пв}} = 4,64\text{E-}03.$$

При данной величине $\text{Risk}_{\text{хр.пв}}$ риск оценивается как «приемлемый».

4. *Расчет длительного (хронического) риска при поступлении свинца и его соединений с почвой.* При анализе результатов загрязнения почвы установлено, что среднее содержание свинца и его соединений в массиве исследованных проб составило 10,01 мг/кг. Расчет длительного (хронического) риска при поступлении в организм человека свинца и его соединений с почвой ингаляционным путем проводится согласно формуле

$$\text{Risk}_{\text{хр.почв.инг}} = 1 - \exp((\ln(0,84) \times (LADD/(Rfd \cdot K_3))^b), \quad (5)$$

где $\text{Risk}_{\text{хр.почв.инг}}$ — потенциальный длительный (хронический) риск для здоровья человека при поступлении в организм свинца и его соединений с почвой ингаляционным путем; LADD — среднесуточная доза в течение жизни, мг/кг·сут; Rfd — референтная доза; K_3 — коэффициент запаса (значения меняются в зависимости от класса опасности металлов и их соединений) для 1-го класса — 7,5; b — значения коэффициента устанавливаются в зависимости от класса опасности металлов и их соединений для 1-го класса — 2,35;

$$\text{Risk}_{\text{хр.почв.инг}} = 1 - \exp((\ln(0,84) \times (1,34 \cdot \text{E-}08 / (0,0003 \cdot 7,5))^{2,35}),$$

$$\text{Risk}_{\text{хр.почв.инг}} = 1,39\text{E-}12.$$

При данной величине $\text{Risk}_{\text{хр.почв.инг}}$ риск оценивается как «приемлемый».

Расчет длительного (хронического) риска при поступлении в организм человека свинца и его соединений с почвой пероральным путем проводится согласно формуле

$$\text{Risk}_{\text{хр.почв.пер}} = 1 - \exp((\ln(0,84) / \text{ADD} / (\text{Rfd} \cdot \text{K}_3))^b), \quad (6)$$

где $\text{Risk}_{\text{хр.почв.пер}}$ — потенциальный длительный (хронический) риск для здоровья человека при поступлении в организм человека металла и его соединений с почвой ингаляционным путем; ADD — среднесуточная доза, мг/кг массы тела в день; Rfd — референтная доза; K_3 — коэффициент запаса; b — коэффициент, учитывающий класс опасности и кумулятивные свойства контаминанта;

$$\text{Risk}_{\text{хр.почв.пер}} = 1 - \exp((\ln(0,84) / (4,07\text{E}-07 / 0,0035 \cdot 100))^1),$$

$$\text{Risk}_{\text{хр.почв.пер}} = 2,03\text{E}-07.$$

При данной величине $\text{Risk}_{\text{хр.почв.пер}}$ риск оценивается как «приемлемый».

Длительный (хронический) риск при поступлении в организм человека свинца и его соединений с почвой накожным (трансдермальным) путем проводили согласно формуле

$$\text{Risk}_{\text{хр.почв.тр}} = 1 - \exp((\ln(0,84) \times \text{LADD} / (\text{Rfd} \cdot \text{K}_3))^b), \quad (7)$$

где $\text{Risk}_{\text{хр.почв.тр}}$ — потенциальный длительный (хронический) риск для здоровья человека при поступлении в организм человека металлов и их соединений с почвой накожным (трансдермальным) путем; LADD — среднесуточная доза в течение жизни, мг/кг·сут; Rfd — референтная доза; K_3 — коэффициент запаса; b — коэффициент, учитывающий класс опасности и кумулятивные свойства контаминанта;

$$\text{Risk}_{\text{хр.почв.тр}} = 1 - \exp((\ln(0,84) \times (1,69\text{E}-09 / (0,0035 \cdot 100))^1),$$

$$\text{Risk}_{\text{хр.почв.тр}} = 8,42\text{E}-10.$$

При данной величине $\text{Risk}_{\text{хр.почв.тр}}$ риск оценивается как «приемлемый».

Суммарный риск длительного (хронического) воздействия при поступлении с почвой свинца и его соединений рассчитан по формуле

$$\text{Risk}_{\text{хр.пч}} = \text{Risk}_{\text{хр.почв.инг}} + \text{Risk}_{\text{хр.почв.пер}} + \text{Risk}_{\text{хр.почв.тр}}, \quad (8)$$

где $\text{Risk}_{\text{хр.пч}}$ — суммарный риск длительного (хронического) воздействия при поступлении в организм

человека металлов и их соединений с почвой; $\text{Risk}_{\text{хр.почв.инг}}$, $\text{Risk}_{\text{хр.почв.пер}}$, $\text{Risk}_{\text{хр.почв.тр}}$ — потенциальные длительные (хронические) риски для здоровья человека при поступлении в организм человека металла и его соединений с почвой ингаляционным, пероральным, накожным (трансдермальным) путями;

$$\text{Risk}_{\text{хр.пч}} = 1.39\text{E}-12 + 2.03\text{E}-07 + 8,42\text{E}-10,$$

$$\text{Risk}_{\text{хр.пч}} = 2,03\text{E}-07.$$

При данной величине $\text{Risk}_{\text{хр.пч}}$ риск оценивается как «приемлемый».

Расчет суммарного риска длительного (хронического) воздействия свинца и его соединений при комплексном поступлении проведен по формуле

$$\text{Risk}_{\text{хр}} = \text{Risk}_{\text{хр.пр.п}} + \text{Risk}_{\text{хр.п.в}} + \text{Risk}_{\text{хр.атм.в}} + \text{Risk}_{\text{хр.пч}}, \quad (9)$$

где $\text{Risk}_{\text{хр}}$ — суммарный риск длительного (хронического) воздействия при комплексном поступлении металлов и их соединений; $\text{Risk}_{\text{хр.пр.п}}$, $\text{Risk}_{\text{хр.п.в}}$, $\text{Risk}_{\text{хр.атм.в}}$, $\text{Risk}_{\text{хр.пч}}$ — риски длительного (хронического) воздействия при поступлении металлов и их соединений с продуктами питания, питьевой водой, атмосферным воздухом, почвой соответственно;

$$\text{Risk}_{\text{хр}} = 4,9\text{E}-05 + 4,64\text{E}-03 + 1,04\text{E}-03 + 2,03\text{E}-07,$$

$$\text{Risk}_{\text{хр}} = 5,72\text{E}-03,$$

что соответствует приемлемому уровню риска.

Таким образом, на основании произведенных расчетов суммарного риска длительного (хронического) воздействия при комплексном поступлении свинца в организм полученный результат оценен с гигиенических позиций как «приемлемый». Данная степень риска характеризуется как минимальная, при таком уровне, как правило, отсутствуют неблагоприятные медико-экологические тенденции в состоянии здоровья экспонируемых популяций.

Заключение. Метод оценки уровней риска здоровью при комплексном воздействии металлов и их соединений позволяет на основании данных лабораторных исследований содержания металлов и их соединений в образцах различных сред рассчитать и оценить суммарный потенциальный риск воздействия при поступлении контаминанта в организм разными путями — алиментарным, с почвой, атмосферным воздухом,

водой. Исходя из опыта проведенных исследований, апробацию следует продолжить с расширением изучаемого спектра металлов и их соединений, а также для расчетов с последующей гигиенической оценкой риска рефлекторного (острого) действия и канцерогенного риска. Также на примере определения рисков здоровью при комплексном поступлении свинца как металла выраженного промышленного генеза следует более детально изучить потенциальную модель использования анализируемого метода оценки уровней риска при проекти-

ровании санитарнозащитных зон промышленных объектов. Возможность прогнозировать степени канцерогенного и неканцерогенных рисков здоровью, в том числе хронического (длительного) действия, с гигиенической оценкой для потенциально экспонируемой популяции позволяет внести дополнительные обоснования необходимости разработки профилактических мероприятий при функционировании и проектировании объектов, оказывающих влияние на здоровье человека и окружающую среду.

Список цитированных источников

1. Lead poisoning. World Health Organization Newsroom [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>. — Date of access: 10.04.2023.
2. Agents Classified by the IARC Monographs. Volumes 1-123. International Agency for Research on Cancer [Electronic resource]. — Mode of access: <https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/09/ClassificationsAlphaOrder.pdf>. — Date of access: 10.04.2023.
3. Метод оценки уровней риска здоровью при комплексном воздействии металлов и их соединений : инструкция по применению, рег. № 041-0622: утв. Гл. гос. санитар, врачом Республики Беларусь 10.06.2022. — Минск : Научно-практический центр гигиены, 2022. — 29 с.
4. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду : руководство Р 2.1.10.1920-04. — М. : Федеральный центр государственного эпиднадзора Минздрава России, 2004. — С. 78–80.

Application of the method for assessing the health risk levels under the combined effect of metals and their compounds on the body

Pshegroda A. E., Soloviov V. V., Sokolov S. M.

Scientific Practical Center of Hygiene, Minsk, Republic of Belarus

The article presents a discussion of the practical application of the health risk assessing method in case of complex effects of metals and their compounds by implementation of the methodological approaches described in the instructions for use developed by the specialists of the Scientific Practical Center of Hygiene within the framework of project “To scientifically substantiate the criteria for establishing the levels of acceptable health risk in case of complex effects of metals and their compounds” of the subprogram “Safety of the human environment”.

Keywords: metals and their compounds, routes of entry, complex exposure, lead and its compounds, chronic risk, total risk, hygienic assessment.

Поступила 12.07.2023