

DOI: 10.5281/zenodo.17508859
UDC: 614.2:632.95.024.391(478)

БИОМОНИТОРИНГ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕСТИЦИДОВ НА ЧЕЛОВЕКА И БИОЛОГИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

BIOMONITORIZAREA EXPUNERII UMANE LA PESTICIDE ȘI MATRICI BIOLOGICE: REVISTA LITERATURII

BIOMONITORING OF HUMAN EXPOSURE TO PESTICIDES AND BIOLOGICAL MATRICES: A LITERATURE REVIEW

Юрие Пынзару, д. м. н., Инга Мирон, к. м. н., Владимир Берник, к. м. н., Владимир Бебых, к. м. н.

Научная лаборатория Химические опасности и токсикология, Отделение Гигиены труда, токсикологии и химической безопасности, Национальное Агентство Общественного Здоровья, г. Кишинев, Республика Молдова

Резюме

Цель. В статье представлен обзор литературы о современных тенденциях биомониторинга воздействия пестицидов на человека с использованием различных биологических матриц (кровь, моча, волосы и др.). Цель исследования - определение оптимальной биологической матрицы для дальнейшей разработки и внедрения эффективного алгоритма оценки воздействия пестицидов на здоровье населения Молдовы.

Методы исследования включают обзор научной литературы по биомониторингу воздействия пестицидов на человека, в том числе основные пути их поступления и применение различных биологических матриц. Были использованы базы данных Hinari (ВОЗ), Medscape, «ScienceDirect, Cochrane-Library, PubMed/MEDLINE», Medscape, Google Scholar по ключевым словам: биомониторинг; пестициды; биологические матрицы; риски для здоровья.

Результаты. В статье рассмотрены современные методы биомониторинга воздействия пестицидов на человека, анализируются преимущества и недостатки различных биологических матриц с целью определения оптимальной биологической матрицы для эффективного алгоритма оценки рисков здоровью в практике общественного здравоохранения Молдовы.

Выводы. Биомониторинг является эффективным методом в системе охраны здоровья работающих с пестицидами и населения, проживающего в местах их применения. Результаты биомониторинга позволяют выявлять уровни воздействия пестицидов на население, группы риска, оценивать эффективность профилактических мероприятий. Выбор биологической матрицы определяется физико-химическими свойствами пестицида, доступностью и удобством получения биоматериала, возможностью его надлежащего хранения и обработки, соблюдением этических норм исследования. Выбранная матрица должна быть совместима с аналитическим методом, обеспечивающим точность и надежность обнаружения конкретного пестицида или его метаболита.

Ключевые слова: биомониторинг, пестициды, биологические матрицы, риск здоровью

Rezumat

Scop. Acest articol prezintă o analiză a literaturii de specialitate privind tendințele actuale în biomonitorizarea expunerii umane la pesticide utilizând diverse matrici biologice (sânge, urină, păr etc.). Obiectivul studiului este de a identifica matricea biologică optimă pentru dezvoltarea și implementarea ulterioară a unui algoritm eficient de evaluare a expunerii la pesticide asupra sănătății populației din Republica Moldova.

Metodele de studiu includ o analiză a literaturii științifice privind biomonitorizarea expunerii umane la pesticide, inclusiv principalele căi de expunere și utilizare a diferitelor matrici biologice. Au fost utilizate următoarele baze de date: Hinari (OMS), Medscape, ScienceDirect, Cochrane-Library, PubMed/MEDLINE, Medscape și Google Scholar, utilizând următoarele cuvinte cheie: biomonitorizare; pesticide; matrici biologice; riscuri pentru sănătate.

Rezultate. Acest articol examinează metodele actuale de biomonitorizare a expunerii umane la pesticide și analizează avantajele și dezavantajele diferitelor matrici biologice pentru a determina matricea biologică optimă pentru un algoritm eficient de evaluare a riscurilor pentru sănătate în practica de sănătate publică din Republica Moldova.

Concluzii. Biomonitorizarea este o metodă eficientă pentru protejarea sănătății celor care lucrează cu pesticide și a populației care locuiește în zonele în care acestea sunt utilizate. Rezultatele biomonitorizării ne permit să identificăm nivelurile de expunere la pesticide în rândul populației și al grupurilor de risc și să evaluăm eficacitatea măsurilor preventive. Alegerea matricei biologice este determinată de proprietățile fizico-chimice ale pesticidului, disponibilitatea și ușurința obținerii biomaterialului, posibilitatea depozitării și procesării corespunzătoare a acestuia și respectarea standardelor etice de testare. Matricea selectată trebuie să fie compatibilă cu metoda analitică ce asigură acuratețea și fiabilitatea detectării unui anumit pesticid sau a metabolitului său.

Cuvinte cheie: biomonitorizare, pesticide, matrici biologice, risc pentru sănătate

Summary

Purpose. This article presents a comprehensive literature review on current approaches and trends in biomonitoring of human exposure to pesticides, using various biological matrices such as blood, urine, hair, etc. The primary objective of the study is to identify the most suitable biological matrix for the development and implementation of an effective algorithm to assess the health impact of pesticide exposure among the population of Moldova.

Methods. A systematic review of scientific literature was conducted, focusing on biomonitoring studies related to pesticide exposure in humans, major exposure pathways, and the application of different biological matrices. The search covered the following databases: Hinari (WHO), Medscape, ScienceDirect,

Cochrane Library, PubMed/MEDLINE, and Google Scholar. Key search terms included: biomonitoring, pesticides, biological matrices, health risks.

Results. The analysis highlights contemporary biomonitoring techniques used to assess human exposure to pesticides, along with a critical evaluation of the advantages and limitations of various biological matrices. Based on the reviewed evidence, this study proposes criteria for selecting the most effective matrix to support reliable and reproducible pesticide exposure assessment within the framework of public health monitoring in Moldova.

Conclusions. Biomonitoring represents an essential tool in occupational and environmental health for evaluating pesticide exposure among both workers and the general population living in agricultural areas. The results of biomonitoring facilitate the identification of exposure levels, risk groups, and the effectiveness of preventive and regulatory measures. Selection of an appropriate biological matrix should take into account the physicochemical properties of the pesticide, sample accessibility, practicality of collection and storage, and adherence to ethical standards. Furthermore, the matrix must be compatible with the analytical method to ensure accuracy, sensitivity, and reliability in detecting specific pesticides or their metabolites.

Keywords: biomonitoring, pesticides, biological matrices, health risk

Введение

Применение средств фитосанитарного назначения (СФСН) в сельском хозяйстве получило широкое распространение, что способствовало повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Согласно прогнозам, в ближайшие годы не ожидается сокращение объёмов использования СФСН - мировое производство химических веществ удвоится к 2030 году, возрастет также и использование химикатов в потребительских товарах [1, 2, 3]. Интенсивное применение СФСН вызывает ряд экологических проблем, связанных с загрязнением почвы, грунтовых и поверхностных вод, накоплением вредных веществ в сельскохозяйственной продукции, питьевой воде, что представляет угрозу здоровью людей, препятствует их доступу к чистой воде и воздуху, нарушает право на достойный и безопасный труд [3, 4, 5, 6]. Эта тенденция подтверждает необходимость усиления контроля за использованием пестицидов в сельском хозяйстве и проведения систематического биомониторинга воздействия пестицидов на человека с целью разработки мер по защите окружающей среды и снижению риска для здоровья населения.

Материал и методы

Данное исследование посвящено обзору научной литературы по биомониторингу воздействия пестицидов на человека, включая пути их поступления в организм человека и использование различных биологических матриц. Цель - разработка и внедрение в практику общественного здравоохранения Республики Молдова эффективного алгоритма биомониторинга воздействия пестицидов на человека для оценки рисков для здоровья населения. Обзор научной литературы был проведен путем целенаправленного поиска статей за период с 1995 по 2025 год в базах данных Hinari (ВОЗ), Medscape, «ScienceDirect, Cochrane-Library, PubMed/MEDLINE», Medscape, Google Scholar. Использованы результаты собственных научных исследований и публикаций по данной теме. Анализ этих данных позволил собрать и систематизировать большой объём информации по теме исследования.

Результаты и их обсуждение

Сельское хозяйство в общем объеме производства Республики Молдова в 2024 году составляло 7,11%, вносит значительный вклад в экспорт страны и является одним из ключевых секторов экономики [7]. Специа-

лизация аграрного сектора Молдовы определяет интенсивное использование СФСН, что соответствует общемировой тенденции в отрасли [8, 9, 10]. В настоящее время значительные группы населения и большинство обитателей животного мира неизбежно подвергаются воздействию пестицидов из-за загрязнения окружающей среды или целенаправленного их применения [11, 12, 13, 14]. Взаимодействие различных групп пестицидов, используемых в разных местах и для разных целей, приводит к перекрестному загрязнению окружающей среды, накоплению их в пищевых цепях, а также к непреднамеренному воздействию новых, более токсичных химических соединений на людей через пищу, воду, воздух и при непосредственной работе с ними без средств индивидуальной защиты [13, 15, 16]. Несмотря на структурные различия, пестициды могут попадать в организм человека через кожу, ингаляционным или пероральным путем. Проблемы перорального воздействия пестицидов на население, включая группы повышенного риска, такие как дети и матери, возникают через потребление продуктов питания и воды, загрязненных пестицидами, а также при бытовом использовании пестицидов [17, 18]. Для сельскохозяйственных работников пероральный путь, как правило, маловероятный. Они подвергаются воздействию в первую очередь через кожу и дыхательные пути во время применения пестицидов или при возвращении на обработанные пестицидами поля [19]. Кожа является наиболее подверженным органом при распылении пестицидов на полях. Возможно также воздействие пестицидов на кожу работников, работающих в теплице для выращивания овощей [20]. Пестициды могут попасть в организм через слизистую оболочку глаз, вызывая раздражение, воспаление, зуд и даже химический ожог [21]. Помимо кожного и перорального, значительную опасность представляет ингаляционный путь воздействия пестицидов, особенно при распылении их на обрабатываемых полях или в условиях плохой вентиляции при смешивании, загрузке пестицида, при очистке оборудования и утилизации пустых контейнеров [22]. Вдыхание аэрозоли и пыли, содержащих пестициды, представляет собой реальный риск для здоровья людей, проживающих вблизи обрабатываемых полей [22]. Другие виды деятельности, связанные с потенциальным воздействием пестицидов, включают посев семян, обработанных пестицидами, а также прополку и сбор ранее обработанных культур. Защитные перчатки не обеспечивают надлежащую защиту рук рабочих и

могут быть источником значительного вторичного воздействия [20]. В бытовых условиях возможны случаи преднамеренного или случайного воздействия пестицидов на человека, которые происходят различными путями (проглатывание, контакт с кожей, вдыхание), часто из-за неправильного хранения, обращения или использования пестицидов.

Существуют убедительные доказательства связи воздействия пестицидов с экологическим стрессом и долгосрочными последствиями для здоровья, включая онкологические заболевания, неврологические расстройства и эндокринные нарушения [23, 24]. На степень риска для здоровья влияют тип и доза пестицидов, физические нагрузки и условия труда [8, 24, 25]. Хотя имеющиеся данные указывают на тесную связь воздействия пестицидов с рядом хронических заболеваний, необходимы дополнительные исследования для выяснения дозозависимых взаимосвязей и механизмов действия [24]. Однако, несмотря на вред пестицидов, интенсивное их применение необходимо для повышения урожайности с целью накормить растущее население мира, особенно в свете негативного воздействия изменений климата и глобальной нехватки сельскохозяйственных земель [26].

Традиционный подход к оценке воздействия пестицидов на человека основывается на сравнении концентрации химических веществ с научно обоснованными нормами или ориентировочно безопасными уровнями воздействия. Однако такой метод не даёт представления о суммарном воздействии пестицидов, фактически поступивших в организм человека [27]. Концентрации отдельных веществ могут быть ниже установленных норм, но их кумулятивный эффект может превышать безопасные уровни [28]. В связи с этим предлагается другой, альтернативный подход, основанный на методологии биологического мониторинга (биомониторинг), позволяющего более объективно оценить фактическое поступление пестицидов в организм [29, 30]. Биомониторинг был определен как «измерение и оценка агентов или их метаболитов в тканях, секрете, экскрементах, выдыхаемом воздухе или любой их комбинации для оценки воздействия и риска для здоровья по сравнению с соответствующим эталоном» [31]. Данный метод позволяет выявлять новые химические воздействия, отслеживать тенденции воздействия, устанавливать распределение воздействия среди различных групп населения, а также выявлять группы населения и районы с повышенным риском воздействия и экологических угроз при относительно небольших затратах [30, 32]. Это делает его надежным научным и практическим инструментом для оценки воздействия химических веществ различного происхождения, поступающих в организм человека разными путями в определенные периоды жизни, что способствует управлению рисками для здоровья населения и окружающей среды [30, 32, 33]. Биомониторинг человека нашел широкое применение для разработки политик в области охраны окружающей среды, защиты уязвимых групп населения и содействия устойчивому управлению химическими веществами и отходами, по-

могает решать важные вопросы общественного здравоохранения [27, 34]. Он позволяет провести оценку воздействия на организм человека большинства природных и синтетических химических веществ, посредством измерения биомаркеров в биологических матрицах: кровь, моча, слюна, грудное молоко, пот, кал, волосы, зубы и ногти [12, 30, 35, 36, 37, 38]. В последнее десятилетие также наблюдается растущий интерес к анализу волос и мекония [39, 40]. Однако, двумя основными биологическими матрицами, используемыми для биомониторинга химических веществ, являются моча и кровь (сыворотка, плазма, клетки крови и т. д.), они считаются наиболее информативными для этой цели [41, 42, 43, 44, 45].

Моча, как биологическая матрица, является одной из наиболее предпочтительных биологических жидкостей для массового и регулярного биомониторинга, в первую очередь благодаря неинвазивному сбору, доступности и более высоким концентрациям метаболитов по сравнению с кровью. Так, оценка воздействия быстровыводимых эндокринных разрушителей, таких как фталаты и бисфенолы, проводилась посредством определения их биомаркеров в моче [46]. Моча является одной из основных биологических матриц для определения остаточных количеств пестицидов с помощью жидкостной и газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией [47]. Наиболее репрезентативные результаты получаются при анализе первой утренней порции мочи [35]. Однако сбор суточной мочи может быть обременительным и приводить к несоблюдению рекомендаций обследуемым [48]. Необходимо также учитывать, что биомаркеры пестицидов в моче отражают лишь недавнее воздействие пестицидов, поскольку скорость выведения почками пестицидов и их метаболитов может варьировать от быстрой до замедленной [49, 50, 51]. Вариабельность объема собираемой мочи и концентрации метаболитов пестицидов, обусловленная быстрой экскрецией в сочетании с частым, но низким или непостоянным уровнем воздействия, является существенным ограничением для точной оценки долгосрочного воздействия пестицидов [13, 20, 46]. Следовательно, уровни биомаркеров в моче предоставляют лишь ограниченные доказательства воздействия пестицидов. Однако в случае хронического воздействия, после достижения устойчивого состояния, пестицид или метаболит, присутствующий в моче, остается на относительно постоянном уровне и отражает среднюю экспозицию [13]. Выявление взаимосвязи между уровнями пестицидов и их метаболитов в моче и оценками воздействия пестицидов зависят от различий во вкладе каждого пути воздействия, который может варьироваться в зависимости от типа пестицида, его препаративной формы, интенсивности воздействия, индивидуальных особенностей организма и условий проживания [50, 52, 53, 54]. Оценка воздействия пестицида на человека, основанная на измерении метаболита в моче, собранной однократно за сельскохозяйственный сезон, не является надёжным индикатором воздействия. Для повышения точности оценки требуется многократное определение метаболитов, а также сбор нескольких

образцов у каждого обследуемого в течение сезона [53]. Хотя моча является популярной биологической матрицей, интерпретация полученной информации часто осложняется сопутствующими воздействиями, разбавлением мочи, специфичностью измерений и непостоянством экспозиции пестицидов [55].

Кровь, наряду с мочой, является одной из основных биологических матриц для анализа биомаркеров пестицидов [41, 42, 43, 44, 45, 56, 57]. Для определения химических веществ в крови обычно используют газохроматографический анализ [58, 59, 60]. Однако, короткий период полураспада некоторых пестицидов и их быстрый метаболизм приводят к тому, что однократное измерение уровня пестицидов в крови, не отражает истинный уровень их воздействия в течение того же дня, не говоря уже о более длительных периодах [24, 49, 61, 62, 63]. В результате затруднено выявление корреляции между уровнем пестицидов в крови и конечными показателями здоровья, что требует многократных измерений с учетом времени воздействия пестицида [12]. Измерение химического вещества в крови само по себе выгодно, поскольку объём крови известен, и мы можем рассчитать нагрузку на организм точнее, чем при измерении химического вещества или его метаболита в моче [64]. Кроме того, использование крови обеспечивает высокую специфичность измерений, поскольку обычно измеряется исходное химическое вещество, а не его метаболит [38, 65]. В то же время исследование метаболитов крови должно проводиться незамедлительно после сбора образца, так как существуют ограничения по их хранению и стабильности при комнатной температуре, а их концентрации могут быстро меняться из-за ферментативной и метаболической активности в крови [64]. Основным недостатком анализа крови является риск, связанный с инвазивным сбором крови (венепункция), которая может вызвать болевые ощущения, гематомы, повреждение нервов и риск инфицирования, а также существуют этические ограничения на забор крови у детей и беременных женщин [6, 26, 49, 61, 66, 67]. Эти факторы ограничивают использование крови при проведении масштабных экологических и профессиональных исследований.

Слюна представляет большой интерес и потенциал в качестве альтернативной биологической матрицы для биомониторинга воздействия пестицидов на человека благодаря простоте, неинвазивности и экономичности анализа, а также высокой точности отражения концентрации пестицидов и их метаболитов в слюне как показателя их уровня в тканях [38]. Слюна успешно использовалась для оценки широкого спектра биомаркеров, лекарственных препаратов, тяжелых металлов, пестицидов, гербицидов, органических растворителей, котинина и некоторых специфических микроэлементов в сельскохозяйственных регионах Египта, Аргентины, штата Огайо (США) [68, 69, 70, 71]. Измерения экспозиции пестицидов атразина, диазинона и хлорпирифоса с использованием слюны были проведены в исследованиях на животных и людях в США, Никарагуа и Таиланде,

хотя и с разной степенью успешности и сложностью для каждого пестицида [72]. Метаанализ 23-х исследований показал, что слюна является перспективной матрицей для оценки недавнего профессионального воздействия металлов и тяжелых металлов, летучих органических соединений и пестицидов (атразина, диазинона и этиона) у работников сельского хозяйства и промышленности [73]. Авторы многочисленных исследований утверждают, что слюна является простой, легкодоступной и экономичной биологической матрицей, может быть получена неинвазивным путем, позволяет провести масштабные полевые исследования, а концентрация пестицидов в слюне дает достоверную оценку экспозиции химических веществ [68, 69, 70, 71, 72, 73]. Более того, в ряде случаев слюна имеет больший потенциал для биомониторинга по сравнению с кровью и мочой.

Помимо ряда преимуществ слюны как биологической матрицы, её использование сопряжено с существенными ограничениями. К ним относятся сложные взаимодействия между компонентами слюны и токсическими веществами, наличие более низких концентраций веществ по сравнению с кровью, а также необходимость стандартизации процедуры сбора и условий хранения проб, подготовки образцов, их анализа, что затрудняет сопоставимость и интерпретацию результатов различных исследований [70, 72, 74]. Более низкие концентрации аналитов в слюне по сравнению с кровью требуют применения высокочувствительных аналитических методов диагностики, также необходимо учитывать контаминацию (например, кровью) и индивидуальную вариабельность (возраст, диета и т. д.), что снижает диагностическую ценность слюны [74].

Таким образом, слюна является перспективной биологической матрицей для биомониторинга воздействия пестицидов, поскольку её легко и неинвазивно собирать, она позволяет точно определить уровень пестицидов в тканях, способна отражать недавнее воздействие химических веществ и является экономически эффективной по сравнению с другими образцами, такими как кровь. Эти преимущества делают её перспективной матрицей для скрининга воздействия пестицидов на большие группы людей.

В последнее десятилетие наблюдается растущий интерес к использованию волос как удобного и неинвазивного источника данных о воздействии различных химических веществ на организм [52, 75, 76, 77, 78, 79]. Волосы рассматриваются как перспективная альтернатива моче и крови, поскольку токсические вещества длительное время сохраняются в белковом кератине, отражая хроническое воздействие в течение месяцев или лет, в отличие от мочи и крови, которые дают лишь краткосрочную картину воздействия из-за более высокой скорости выведения. Кроме того, волосы содержат информацию о биохимических процессах в организме и могут быть использованы для определения содержания микроэлементов и токсинов в организме [52]. Результаты пилотного когортного биомониторингового исследования показали, что анализ волос предоставляет более полную

информацию о воздействии пестицидов на беременных женщин, чем анализ мочи [80]. Исследование, проведенное среди сельских детей и их родителей, проживающих вблизи виноградников, выявило обратную зависимость между уровнем пестицидов в волосах и расстоянием от дома до виноградников [81]. Данная корреляция подтверждает целесообразность использования волос для оценки кумулятивного воздействия пестицидов, особенно в уязвимых группах населения, таких как дети. У лиц, применяющих пестициды и у жителей, не занимающихся фермерством, изучалось воздействие пестицидов посредством анализа образцов волос с помощью жидкостной хроматографии-тандемной масс-спектрометрии, что обеспечило высокую чувствительность и селективность анализа, необходимые для обнаружения пестицидов [52]. Биомониторинг волос применялся для оценки как хронического, так и недавнего воздействия антихолинэстеразных пестицидов в эпидемиологическом исследовании сельского населения о. Крит [82]. Кроме того, образцы волос использовались при масштабном исследовании воздействия на человека 30-ти эндокринных разрушителей в шести европейских странах [77]. Анализ выявил ряд широко распространённых пестицидов, что свидетельствует о хроническом воздействии этих химических веществ на население. Результаты экспериментальных исследований на лабораторных животных также подтвердили возможность применения волос для биомониторинга воздействия пестицидов [75, 76, 83]. По сравнению с результатами исследований мочи и плазмы крови, анализ волос продемонстрировал более комплексную, а иногда и более точную оценку экспозиции множества химических веществ, что делает его ценным инструментом в эпидемиологических исследованиях [80, 83].

Таким образом, волосы являются уникальным и надёжным инструментом биомониторинга из-за их медленного роста, примерно на 1 см в месяц, и анализ каждого сантиметра волос даёт информацию о среднем воздействии за месячный период [75, 76, 77]. Существенным преимуществом использования волос является простота и неинвазивность их сбора, который не требует участия медицинского персонала. Кроме того, образцы волос очень стабильны, их можно хранить и транспортировать при комнатной температуре, при этом риск деградации матрицы и аналита низок.

Пот является эффективной неинвазивной биологической матрицей для биомониторинга воздействия пестицидов, так как через кожу могут выделяться как сами пестициды, так и их метаболиты [22, 31]. В отличие от крови или мочи, пот, особенно собранный с помощью специальных пластырей, обеспечивает долгосрочное отслеживание воздействия вредных веществ [84]. Имеются данные о проведенных исследованиях уровня пестицидов у сельскохозяйственных рабочих, а также общего уровня алкоголя и наркотиков в крови путём анализа пота, что подтверждает перспективность использования этого метода для биомониторинга пестицидов [22].

В токсикологии и оценке риска для здоровья в каче-

стве альтернативных биологических матриц применяют амниотическую жидкость, выдыхаемый воздух и меконий в дополнение к традиционным образцам, таким как кровь, моча [55]. Поскольку многие из этих биологических матриц используются не так часто, полученные данные о концентрации в них химических веществ сложно сопоставить с измерениями, выполненными в традиционных матрицах [55]. Однако, поскольку многие из альтернативных биологических матриц доступны и могут предоставить потенциально полезную информацию, их не следует сбрасывать со счетов. Вместо этого рекомендуется провести исследования, оценивающие распределение химических веществ в различных матрицах, что позволит сравнивать данные между ними. Эти альтернативные биологические матрицы также предоставляют уникальные возможности для оценки воздействия химических веществ, например, на плод и могут быть собраны, когда другие образцы недоступны.

Заключение

Пестициды, широко применяемые в сельском хозяйстве, могут попадать в организм с загрязненной пищей и водой, через кожу и дыхательные пути, что может привести к острому и хроническому отравлению и различным долгосрочным проблемам со здоровьем.

Для точной оценки индивидуального воздействия пестицидов, определения их кумулятивной дозы из разных источников и установления связи между воздействием и проблемами со здоровьем целесообразно использовать биомониторинг - измерение концентраций пестицидов или их метаболитов в различных биологических матрицах с использованием высокочувствительных хроматографических методов.

Моча и кровь остаются основными биологическими матрицами для биомониторинга воздействия пестицидов, однако концентрации токсических веществ в этих жидкостях отражают лишь недавнее, краткосрочное воздействие и высокую вариабельность концентраций пестицидов. Эти ограничения требуют использования альтернативных матриц, например, волос, грудного молока, которые лучше подходят для оценки долгосрочного или хронического воздействия благодаря своей способности накапливать и отражать исторические уровни воздействия

Неинвазивные матрицы - моча, волосы или слюна предпочтительны для долгосрочного биомониторинга, поскольку позволяют избежать стресса, связанного с инвазивными заборами крови, обеспечивают более точную долгосрочную оценку, но требуют сложных аналитических методов и тщательного планирования исследований для преодоления высокой вариабельности.

К основным проблемам при биомониторинге человека относятся: соблюдение этических норм обследования, обеспечение качества и стандартизация биологических образцов и аналитических исследований, а также стоимость проведения анализов.

Биомониторинг - информативный метод оценки воздействия пестицидов на человека, требующий исполь-

зования по возможности неинвазивных биологических матриц, тщательного отбора биомаркеров и аналитов, применения чувствительных аналитических методов для точной оценки совокупного воздействия пестицидов из профессиональных, экологических и пищевых источников. На основе анализа современных методов биомониторинга воздействия пестицидов на человека,

преимуществ и недостатков различных биологических матриц сделан вывод о необходимости учета всех этих факторов для определения оптимальной биологической матрицы с целью разработки эффективного алгоритма оценки рисков здоровью и внедрению его в практику общественного здравоохранения Молдовы.

Библиография

1. UN. The Global Framework on Chemicals – For a Planet Free of Harm from Chemicals and Waste. Bonn, Germany. 2023:21. Available at: <https://www.chemicalsframework.org/page/text-global-framework-chemicals>
2. UN. Environmental and health impacts of pesticides and fertilizers and ways of minimizing them. Envisioning a chemical-safe world. 5. 1972-2022:24. Available at: <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/34463/JSUNEPPE.pdf?sequence=15>
3. ВОЗ. Роль сектора здравоохранения в обеспечении безопасного обращения с химическими веществами. Доклад Секретариата. A69/19. 04.03.2016 [VOZ. Rol' sektora zdravookhraneniya v obespechenii bezopasnogo obrashcheniya s khimicheskimi veshchestvami. A69/19. 04.03.2016 (In Russ.)]. Available at: https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA69/A69_19-ru.pdf
4. UN. Strategic Approach to International Chemicals Management. SAICM/ICCM.5/4. Bonn, Germany, 25–29.09.2023 Available at: https://www.chemicalsframework.org/sites/default/files/documents/Report-%20SAICM-ICCM.5-4_27022024.pdf
5. Zhang P, Carlsten C, Chaleckis R, et al. Defining the Scope of Exposome Studies and Research Needs from a Multidisciplinary Perspective. *Environ Sci Technol Lett.* 2021;8(10):839-852. doi:10.1021/acs.estlett.1c00648
6. Sun J, Fang R, Wang H, et al. A review of environmental metabolism disrupting chemicals and effect biomarkers associating disease risks: Where exposomics meets metabolomics. *Environ Int.* 2022;158:106941. doi:10.1016/j.envint.2021.106941
7. Молдова: Доля сельского хозяйства в ВВП. The Global Economy. Com. [Moldova: Dolya sel'skogo khozyaystva v VVP. The Global Economy. Com. (In Russ)]; Available at: <https://ru.theglobaleconomy.com/>
8. Пынзару Ю, Берник В, Мирон И, Бебых В. Проблема эндокринных разрушителей в Республике Молдова [The problem of endocrine disruptors in the Republic of Moldova]. *Arta Medica.* 2023;89(4):52-61
9. AgroExpert. В Молдове объем использования пестицидов составляет от 1,6 кг/га до 4,6 кг/га. AgroExpert.com. 20.03.2022. [AgroExpert. V Moldove ob'yem ispol'zovaniya pestitsidov sostavlyayet ot 1,6 kg/ga do 4,6 kg/ga. AgroExpert.com. 20.03.2022 (In Russ.)]. Available at: <https://agroexpert.md/rus/v-moldove/v-moldove-objem-ispolizovaniya-pestitsidov-sostavlyayet-ot-1-6-kg-ga-do-4-6-kg-ga>
10. IPEN. The International POPs Elimination Project. Moldova without Persistent Organic Pollutants. Moldova; November 2004:8. Available at: https://ipen.org/sites/default/files/documents/1mol_moldova_without_pops-en.pdf
11. Hayes TB, Case P, Chui S, et al. Pesticide mixtures, endocrine disruption, and amphibian declines: are we underestimating the impact?. *Environ Health Perspect.* 2006;114 Suppl 1(Suppl 1):40-50. doi:10.1289/ehp.8051
12. Woodruff TJ, Zota AR, Schwartz JM. Environmental chemicals in pregnant women in the United States: NHANES 2003-2004. *Environ Health Perspect.* 2011;119(6):878-885. doi:10.1289/ehp.1002727
13. Капка-Skrzypczak L, Cyranka M, Skrzypczak M, Kruszewski M. Biomonitoring and biomarkers of organophosphate pesticides exposure - state of the art. *Ann Agric Environ Med.* 2011;18(2):294-303.
14. Bolognesi C. Genotoxicity of pesticides: a review of human biomonitoring studies. *Mutat Res.* 2003;543(3):251-272. doi:10.1016/s1383-5742(03)00015-2
15. IPEN. Brosché, S. The Global Threat from Highly Hazardous Pesticides. IPEN. February 2024:36. Available at: https://ipen.org/sites/default/files/documents/hhps_report-2023-final-2.pdf
16. Das PP, Shaik AP, Jamil K. Genotoxicity induced by pesticide mixtures: in-vitro studies on human peripheral blood lymphocytes. *Toxicol Ind Health.* 2007;23(8):449-458. doi:10.1177/0748233708089040
17. Luo Y, Zhang M. Multimedia transport and risk assessment of organophosphate pesticides and a case study in the northern San Joaquin Valley of California. *Chemosphere.* 2009;75(7):969-978. doi:10.1016/j.chemosphere.2009.01.005
18. Trunelle KJ, Bennett DH, Tancredi DJ, et al. Pyrethroids in house dust from the homes of farm worker families in the MICASA study. *Environ Int.* 2013;61:57-63. doi:10.1016/j.envint.2013.09.007
19. Willenbockel CT, Prinz J, Dietrich S, et al. A Critical Scoping Review of Pesticide Exposure Biomonitoring Studies in Overhead Cultures. *Toxics.* 2022;10(4):170. Published 2022 Mar 31. doi:10.3390/toxics10040170
20. Jurewicz J, Hanke W, Sobala W, Ligocka D. Assessment of the dermal exposure to azoxystrobin among women tending cucumbers in selected Polish greenhouses after restricted entry intervals expired--the role of the protective gloves. *Int J Occup Med Environ Health.* 2009;22(3):261-267. doi:10.2478/v10001-009-0026-3
21. Jaga K, Dharmani C. Ocular toxicity from pesticide exposure: A recent review. *Environ Health Prev Med.* 2006;11(3):102-107. doi:10.1265/ehpm.11.102
22. Yusa V, Coscolla C, Millet M. New screening approach for risk assessment of pesticides in ambient air. *Atmospheric Environment.* 2014;96:322-330. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.07.047
23. Ahmad MF, Ahmad FA, Alsayegh AA, et al. Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. *Heliyon.* 2024;10(7):e29128. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e29128

24. Shekhar C, Khosya R, Thakur K, et al. A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term human health impacts. *Toxicol Rep.* 2024;13:101840. doi:10.1016/j.toxrep.2024.101840
25. Fucic A, Duca RC, Galea KS, et al. Reproductive Health Risks Associated with Occupational and Environmental Exposure to Pesticides. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(12):6576. doi:10.3390/ijerph18126576
26. UN. Human Rights Council, Report of the Special Rapporteur on the right to food, A/HRC/34/48, 24 January 2017. Available at: <https://www.refworld.org/reference/themreport/unhrc/2017/en/115614>
27. Пынзару Ю, Берник В, Бебых В. Перспективы биомониторинга для оценки здоровья при воздействии приоритетных химических веществ в Республике Молдова. [Perspectives of biomonitoring for health assessment of the impact of priority chemical substances in the Republic of Moldova]. *Arta Medica.* 2024;90(1):39-43.
28. Van Broekhuizen FA, Posthuma L, Traas TP. Addressing combined effects of chemicals in environmental safety assessment under REACH - A thought starter. RIVM Letter report. 2016-0162:36. Available at: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0162.pdf>
29. American Chemistry Council. Chemistry Creates America Competes. Biomonitoring. 2025. Available at: <https://www.americanchemistry.com/industry-groups/diisocyanates-dii/scientific-concepts/biomonitoring>
30. WHO. Human biomonitoring: facts and figures. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2015:104. Available at: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/164588/WHO-EURO-2015-3209-42967-60040-eng.pdf?sequence=3>
31. ILO. Encyclopaedia of Occupational Health & Safety. Part IV. Tools and Approaches. 27. Biological Monitoring. 2011. Available at: <https://www.iloencyclopaedia.org/part-iv-23957>
32. WHO. Human biomonitoring programmes: importance for sound chemicals management. Technical summary. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2023:20. Available at: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/368102/WHO-EURO-2023-7572-47339-69476-eng.pdf?sequence=3>
33. WHO. Human biomonitoring. Basics: educational course. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2023:290. Available at: <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289060097>
34. Barr DB. Biomonitoring of exposure to pesticides. *J. Chem. Health Saf.* 2008;15(6):20-29. doi: 10.1016/j.jchas.2008.07.001
35. Angerer J, Ewers U, Wilhelm M. Human biomonitoring: state of the art. *Int J Hyg Environ Health.* 2007;210(3-4):201-228. doi:10.1016/j.ijheh.2007.01.024
36. Mueller W, Jones K, Fuhrmann S, et al. Factors influencing occupational exposure to pyrethroids and glyphosate: An analysis of urinary biomarkers in Malaysia, Uganda and the United Kingdom. *Environ Res.* 2024;242:117651. doi:10.1016/j.envres.2023.117651
37. ООН, ЮНЕП. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях с поправками, внесенными в 2009 году. 66 с. [OON, YUNEP. Stokgol'mskaya konventsiya o stoykikh organicheskikh zagryaznitelyakh s popravkami, vnesennymi v 2009 godu. 66 s. (In Rus.); Available at: https://chm.pops.int/Portals/0/sc10/files/a/stockholm_convention_text_r.pdf
38. Barr DB, Thomas K, Curwin B, et al. Biomonitoring of exposure in farmworker studies. *Environ Health Perspect.* 2006;114(6):936-942. doi:10.1289/ehp.8527
39. Hardy EM, Dereumeaux C, Guldner L, et al. Hair versus urine for the biomonitoring of pesticide exposure: Results from a pilot cohort study on pregnant women. *Environ Int.* 2021;152:106481. doi:10.1016/j.envint.2021.106481
40. ВОЗ. Биомаркеры и оценка риска: концепции и принципы (Гигиенические критерии состояния окружающей среды; 155). 1996; 96 с. [VOZ. Biomarkery i otsenka riska: kontseptsii i printsipy (Gigiyenicheskiye kriterii sostoyaniya okruzhayushchey sredy; 155). 1996; 96 s. (In Rus.)]. Available at: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/139694/5225032605.pdf?sequence=1>
41. Moreira A, Guedes J, Vieira da Silva M. New Methodologies and Techniques for Biomonitoring Pesticide Exposure in Agricultural Workers: A Systematic Review. *Toxics.* 2025;13(2):104. doi:10.3390/toxics13020104
42. Hakme E, Poulsen ME, Lassen AD. A Comprehensive Review on Pesticide Residues in Human Urine. *J Agric Food Chem.* 2024;72(32):17706-17729. doi:10.1021/acs.jafc.4c02705
43. Barr DB, Wilder LC, Caudill SP, Gonzalez AJ, Needham LL, Pirkle JL. Urinary creatinine concentrations in the U.S. population: implications for urinary biologic monitoring measurements. *Environ Health Perspect.* 2005;113(2):192-200. doi:10.1289/ehp.7337
44. Sexton K, Needham LL, Pirkle JL. Human Biomonitoring of Environmental Chemicals: Measuring chemicals in human tissues is the "gold standard" for assessing people's exposure to pollution. *American Scientist.* 2004;92(1):38-45.
45. Pirkle JL, Sampson EJ, Needham LL, Patterson DG, Ashley DL. Using biological monitoring to assess human exposure to priority toxicants. *Environ Health Perspect.* 1995;103 Suppl 3(Suppl 3):45-48. doi:10.1289/ehp.95103s345
46. Fäys F, Hardy EM, Palazzi P, Haan S, Beausoleil C, Appenzeller BMR. Biomonitoring of fast-elimination endocrine disruptors - Results from a 6-month follow up on human volunteers with repeated urine and hair collection. *Sci Total Environ.* 2021;778:146330. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146330
47. Birolli WG, Lanças FM, Dos Santos Neto AJ, Silveira HCS. Determination of pesticide residues in urine by chromatography-mass spectrometry: methods and applications. *Front Public Health.* 2024;12:1336014. doi:10.3389/fpubh.2024.1336014
48. Kissel JC, Curl CL, Kedan G, et al. Comparison of organophosphorus pesticide metabolite levels in single and multiple daily urine samples collected from preschool children in Washington State. *J Expo Anal Environ Epidemiol.* 2005;15(2):164-171. doi:10.1038/sj.jea.7500384
49. Barr DB, Angerer J. Potential uses of biomonitoring data: a case study using the organophosphorus pesticides chlorpyrifos and malathion. *Environ Health Perspect.* 2006;114(11):1763-1769. doi:10.1289/ehp.9062
50. Egeghy PP, Cohen Hubal EA, Tulve NS, et al. Review of pesticide urinary biomarker measurements from selected US EPA children's observational exposure studies. *Int J Environ Res Public Health.* 2011;8(5):1727-1754. doi:10.3390/ijerph8051727
51. Klimowska A, Amenda K, Rodzaj W, Wileńska M, Jurewicz J, Wielgomas B. Evaluation of 1-year urinary excretion of eight metabolites of synthetic pyrethroids, chlorpyrifos, and neonicotinoids. *Environ Int.* 2020;145:106119. doi:10.1016/j.envint.2020.106119
52. ILO. Encyclopaedia of Occupational Health & Safety. Часть IV. Инструменты и подходы. Токсикология. Методы токсикологических испытаний. 2011.

- [Vsemirnaya organizatsiya zdavookhraneniya. Encyclopaedia of Occupational Health & Safety. Chast' IV. Instrumenty i podkhody. Toksikologiya. Metody toksikologicheskikh ispytaniy. 2011 (In Rus.)]. Available at: <https://www.iloencyclopaedia.org/ru/part-iv-66769/toxicology-57951/toxicology-test-methods>
53. Fernández SF, Pardo O, Adam-Cervera I, et al. Biomonitoring of non-persistent pesticides in urine from lactating mothers: Exposure and risk assessment. *Sci Total Environ.* 2020;699:134385. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134385
54. Arcury TA, Grzywacz JG, Isom S, et al. Seasonal variation in the measurement of urinary pesticide metabolites among Latino farmworkers in eastern North Carolina. *Int J Occup Environ Health.* 2009;15(4):339-350. doi:10.1179/oe.2009.15.4.339
55. Barr DB, Wang RY, Needham LL. Biologic monitoring of exposure to environmental chemicals throughout the life stages: requirements and issues for consideration for the National Children's Study. *Environ Health Perspect.* 2005;113(8):1083-1091. doi:10.1289/ehp.7617
56. Yusa V, Millet M, Coscolla C, Roca M. Analytical methods for human biomonitoring of pesticides. A review. *Anal Chim Acta.* 2015;891:15-31. doi:10.1016/j.aca.2015.05.032
57. Hakme E, Poulsen ME, Lassen AD. A Comprehensive Review on Pesticide Residues in Human Urine. *J Agric Food Chem.* 2024;72(32):17706-17729. doi:10.1021/acs.jafc.4c02705
58. Alegretti AP, Thiesen FV, Maciel GP. Analytical method for evaluation of exposure to benzene, toluene, xylene in blood by gas chromatography preceded by solid phase microextraction. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci.* 2004;809(1):183-187. doi:10.1016/j.jchromb.2004.06.016
59. Angerer J, Hörsch B. Determination of aromatic hydrocarbons and their metabolites in human blood and urine. *J Chromatogr.* 1992;580(1-2):229-255. doi:10.1016/0378-4347(92)80537-z
60. Barr DB, Barr JR, Maggio VL, et al. A multi-analyte method for the quantification of contemporary pesticides in human serum and plasma using high-resolution mass spectrometry. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci.* 2002;778(1-2):99-111. doi:10.1016/s0378-4347(01)00444-3
61. Albertini R, Bird M, Doerrer N, et al. The use of biomonitoring data in exposure and human health risk assessments. *Environ Health Perspect.* 2006;114(11):1755-1762. doi:10.1289/ehp.9056
62. LaKind JS, Barraj L, Tran N, Aylward LL. Environmental chemicals in people: challenges in interpreting biomonitoring information. *J Environ Health.* 2008;70(9):61-64.
63. Flesch IM, Cattani SA, Domingues D, et al. The importance of blood trace elements in the biomonitoring of agrochemicals exposure and effects on DNA and epigenetic alterations. *J Trace Elem Med Biol.* 2025;89:127647. doi:10.1016/j.jtemb.2025.127647
64. Barr DB, Barr JR, Driskell WJ, et al. Strategies for biological monitoring of exposure for contemporary-use pesticides. *Toxicol Ind Health.* 1999;15(1-2):168-179. doi:10.1191/074823399678846556
65. Ross JH, Driver JH, Cochran RC, Thongsinthusak T, Krieger RI. Could pesticide toxicology studies be more relevant to occupational risk assessment?. *Ann Occup Hyg.* 2001;45 Suppl 1:S5-S17. doi:10.1016/s0003-4878(00)00095-8
66. Muniz JF, McCauley L, Scherer J, et al. Biomarkers of oxidative stress and DNA damage in agricultural workers: a pilot study. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2008;227(1):97-107. doi:10.1016/j.taap.2007.10.027
67. Spiewak R. Pesticides as a cause of occupational skin diseases in farmers. *Ann Agric Environ Med.* 2001;8(1):1-5.
68. Timchalk C, Poet TS, Kousba AA, Campbell JA, Lin Y. Noninvasive biomonitoring approaches to determine dosimetry and risk following acute chemical exposure: analysis of lead or organophosphate insecticide in saliva. *J Toxicol Environ Health A.* 2004;67(8-10):635-650. doi:10.1080/15287390490428035
69. Filippi I, Fernández P, Grimalt JO, Butinof M, Amé MV, et al. Glyphosate and AMPA in saliva and other traditional human matrices. New findings for less invasive biomonitoring to the exposure to pesticides. *Environmental Advances.* 2024;(15):100474. doi:10.1016/j.envadv.2023.100474
70. Michalke B, Rossbach B, Göen T, Schäferhenrich A, Scherer G. Saliva as a matrix for human biomonitoring in occupational and environmental medicine. *Int Arch Occup Environ Health.* 2015;88(1):1-44. doi:10.1007/s00420-014-0938-5
71. Denovan LA, Lu C, Hines CJ, Fenske RA. Saliva biomonitoring of atrazine exposure among herbicide applicators. *Int Arch Occup Environ Health.* 2000;73(7):457-462. doi:10.1007/s004200000174
72. Lu C. Using Salivary Biomarker for Pesticide Exposure and Risk Assessment: Possibilities and Pitfalls. *Epidemiology.* 2006;17(6):S135.
73. Sousa G, Delerue-Matos C, Wang X, Rodrigues F, Oliveira M. Potential of Saliva for Biomonitoring of Occupational Exposure: Collection of Evidence from the Literature. *Occupational and Environmental Safety and Health IV.* 2023;449:587-598. doi:10.1007/978-3-031-125-8_47
74. Kang JH, Kho HS. Blood contamination in salivary diagnostics: current methods and their limitations. *Clin Chem Lab Med.* 2019;57(8):1115-1124. doi:10.1515/cclm-2018-0739
75. Smith-Baker C, Saleh MA. Hair as a marker for pesticides exposure. *J Environ Sci Health B.* 2011;46(7):648-653. doi:10.1080/03601234.2012.597701
76. Tutudaki M, Tsakalof AK, Tsatsakis AM. Hair analysis used to assess chronic exposure to the organophosphate diazinon: a model study with rabbits. *Hum Exp Toxicol.* 2003;22(3):159-164. doi:10.1191/0960327103ht3340a
77. IRES. Pesticides found in Hair samples. ANALYSIS REPORT | 180907-02. Version 2. 2018:84. Available at: <https://www.greens-efa.eu/files/doc/docs/3a09fba8ed8028317aebdac4c43145db.pdf>
78. Appenzeller BM, Tsatsakis AM. Hair analysis for biomonitoring of environmental and occupational exposure to organic pollutants: state of the art, critical review and future needs. *Toxicol Lett.* 2012;210(2):119-140. doi:10.1016/j.toxlet.2011.10.021
79. Yin S, Been F, Liu W, Covaci A. Hair as an alternative matrix to monitor human exposure to plasticizers - Development of a liquid chromatography - tandem mass spectrometry method. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci.* 2019;1104:94-101. doi:10.1016/j.jchromb.2018.09.031
80. Hardy EM, Dereumeaux C, Guldner L, et al. Hair versus urine for the biomonitoring of pesticide exposure: Results from a pilot cohort study on pregnant women. *Environ Int.* 2021;152:106481. doi:10.1016/j.envint.2021.106481
81. Polledri E, Mercadante R, Consonni D, Fustinoni S. Cumulative Pesticides Exposure of Children and Their Parents Living near Vineyards by Hair Analysis. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(7):3723. doi:10.3390/ijerph18073723

82. Tsatsakis, A., Toutoudaki, M., Tzatzarakis, M. Assessing Chronic Exposure to Anticholinesterase Pesticides by Hair Analysis. In: Dishovsky, C., Pivovarov, A. (eds) Counteraction to Chemical and Biological Terrorism in East European Countries. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. Springer, Dordrecht. 2009:203-211. doi:10.1007/978-90-481-2342-1_24
83. Appenzeller BMR, Hardy EM, Grova N, et al. Hair analysis for the biomonitoring of pesticide exposure: comparison with blood and urine in a rat model. Arch Toxicol. 2017;91(8):2813-2825. doi:10.1007/s00204-016-1910-9
84. ОМБ. Пот - наиболее перспективный биологический материал для неинвазивных методов тестирования 20.03.2019; [OMB. Pot - naiboleye perspektivnyu biologicheskiy material dlya neinvazivnykh metodov testirovaniya 20.03.2019 (In Russ)]. Available at: <https://omb.ru/news/market/37201/>
-

Получено – 09.08.2025, принято к публикации – 27.08.2025

Автор, ответственный за переписку: Владимир Бебых, e-mail: vladbebih1952@gmail.com

Заявление о конфликте интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Отчет о финансировании: Статья написана по инициативе авторов за счет финансирования Субпроекта „Modelarea biomonitoringului uman ca instrument prioritar în gestionarea riscurilor chimice”, Codul subprogramului: cifrul 130101.

Цитирование: Пынзару Ю, Мирон И, Берник В, Бебых В. Биомониторинг воздействия пестицидов на человека и биологические матрицы: обзор литературы [Biomonitoring of human exposure to pesticides and biological matrices: a literature review]. Arta Medica. 2025;95(2):47-55.