

ЦИФРОВАЯ ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

© 2024 г. И.Б. Ушаков^{а,*}, А.В. Богомолов^{а,**}

^аГосударственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

*E-mail: iushakov@fmbcfmba.ru

**E-mail: a.v.bogomolov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.07.2024 г.

После доработки 16.09.2024 г.

Принята к публикации 15.10.2024 г.

Для увеличения продолжительности здоровой жизни и снижения суммарной временной нетрудоспособности работающего населения особое внимание необходимо уделять профилактике заболеваний. Современный уровень научно-технического прогресса позволяет повысить эффективность решения задач профилактической медицины за счёт применения цифровых технологий. Цифровая профилактическая медицина должна стать самостоятельным научным направлением. В статье дана характеристика состояния и перспектив цифровизации ключевых направлений профилактической медицины с акцентом на технологии сохранения здоровья трудоспособного населения. Обозначены актуальные вопросы цифровизации профилактической медицины и приоритеты её дальнейшего развития.

Ключевые слова: профилактическая медицина, цифровая медицина, цифровая профилактическая медицина, цифровизация медицины, цифровая трансформация здравоохранения, медицинская информатика.

DOI: 10.31857/S0869587324110043, **EDN:** SEOXJC

Задачи современной медицины не ограничиваются лечением больных — внимание системы здравоохранения всё больше смещается в сторону профилактики заболеваний с целью увеличения продолжительности здоровой жизни и снижения суммарной временной нетрудоспособности ра-

ботающих граждан [1]. Укрепление здоровья населения — одна из целей национального развития России, которая обозначена в 15 национальных проектах, выполняемых до 31 декабря 2024 г. В соответствии с Указом Президента РФ от 7 мая 2024 г., с 1 января 2025 г. начинается реализация комплекса новых национальных проектов. В паспортах завершающихся и новых проектов встречается термин “цифровая медицина”, с которым, согласно данным Росстата за 2023 г., знакомы 76% россиян.

Для анализа современного состояния цифровой медицины в России составлена онтология предметной области: из базы Российского индекса научного цитирования отобраны 422 публикации 2019–2023 гг., в названии или ключевых словах которых присутствуют термины “цифровая медицина”, “цифровое здравоохранение”, “медицинская информатика”, “медицинская информационная система”, “медицинская кибернетика”. Большинство работ посвящено технологиям телемедицины (33%), электронных медицинских карт (18%), распознавания медицинских изображений (15%), умных аптек (9%), а термины, специфичные для профилактической медицины (профилактика, риски здоровью), упомянуты лишь в 19 публикациях,



УШАКОВ Игорь Борисович — академик РАН, главный научный сотрудник ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. БОГОМОЛОВ Алексей Валерьевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

хотя это одно из ключевых направлений национального развития Российской Федерации. Таким образом, возникло противоречие между реальными потребностями и недостатком исследований в области развития цифровой профилактической медицины. Чтобы устранить это противоречие, цифровая профилактическая медицина должна стать самостоятельным направлением цифровой медицины с конкретизацией приоритетов её развития.

Цифровая профилактическая медицина объединяет учение о предупреждении возникновения заболеваний и травм, недопущении и устранении факторов риска их развития (включая государственные, гигиенические, социально-экономические и лечебно-медицинские мероприятия) и цифровые технологии сбора и обработки информации о состоянии человека на всех этапах его жизнедеятельности [2]. Она в полной мере направлена на реализацию концепции 4П-медицины (предупреждение, предотвращение, персонализация и партисипативность). Следует подчеркнуть, что автоматизация и информатизация медицины эффективно применяются с 1950-х годов. Однако цифровые технологии имеют принципиальную отличительную особенность: их компоненты территориально и пространственно распределены и синергетически увязаны в единую систему, что существенно расширяет их потенциальные возможности.

Концептуальной основой цифровой профилактической медицины выступает совокупность теоретических и эмпирических принципов, сформированных учёными в области профилактической медицины. Эти концепции соответствуют уровню научного прогресса, актуальны и востребованы, но для полноценной реализации они должны включать цифровые технологии, что обеспечит повышение эффективности разработки и внедрения профилактических мероприятий.

Цифровизация ключевых направлений профилактической медицины. Профилактическая медицина традиционно подразделяется на три направления: индивидуальная, групповая и общественная профилактика [2]. К настоящему времени в рамках всех этих направлений отработаны базовые подходы к внедрению методов цифровизации.

Повысить эффективность *индивидуальной профилактики* можно посредством цифровых помощников (виртуальные ассистенты) при мониторинге качества мер предупреждения болезней, сохранения и укрепления здоровья на базе технологий дескриптивной, прескриптивной, предиктивной и предписывающей аналитики, защищённой телекоммуникации, виртуальной и дополненной реальности, а также интеллектуальных человеко-машинных интерфейсов [3].

Эффективность *групповой профилактики* достигается за счёт автоматизированного формирования (например, на основе информации из федеральных

государственных информационных систем в сфере здравоохранения и информационных систем медицинских организаций) групп лиц, имеющих сходные симптомы и/или факторы риска, для составления комплекса профилактических мероприятий с одновременным автоматизированным контролем качества их выполнения всеми участниками группы и применением технологий прослеживаемости, интероперабельности и анализа данных [4–6].

Повышение эффективности *общественной профилактики* достигается с помощью цифровых технологий, направленных на формирование сознательного отношения граждан к своему здоровью и здоровью окружающих, активное участие населения в профилактических мероприятиях и максимальное использование каждым человеком предоставляемых ему возможностей по сохранению и укреплению здоровья. К их числу относятся, в частности, технологии больших данных, программно-определяемых хранилищ данных, создания и исполнения децентрализованных приложений и смарт-контрактов, сбора, хранения и обработки децентрализованных данных, организации, синхронизации, обеспечения целостности и непротиворечивости данных [7–9]. Перечисленные направления профилактики тесно связаны с первичной, вторичной и третичной профилактикой, а цифровизация соответствующих мероприятий требует проведения специальных исследований [2].

Цифровизация системы мероприятий *первичной профилактики* связана с цифровыми технологиями предупреждения возникновения и воздействия факторов риска развития заболеваний, непрерывностью профилактических мероприятий (начиная с 12-й недели внутриутробного развития и на протяжении всей жизни), обеспечением дифференцированного характера профилактических мероприятий, массовости и комплексности профилактики, вовлечённостью лечебных учреждений, органов власти, общественных организаций и населения [10, 11].

Цифровизация системы мероприятий *вторичной профилактики* зависит от наличия цифровых технологий устранения выраженных факторов риска, которые при определённых условиях могут привести к возникновению, обострению или рецидиву заболеваний, то есть в первую очередь речь идёт об организации эффективной диспансеризации населения [12].

Цифровизация системы мероприятий *третичной профилактики* заключается в использовании цифровых технологий реабилитации пациентов, лишившихся возможности вести полноценный образ жизни: медицинская (восстановление функций органов и систем организма), социальная (формирование уверенности в собственной социальной пригодности), трудовая (восстановление трудовых навыков), психологическая (восстановление поведенческой активности) реабилитация [13].

Рассмотрим потенциал цифровизации на примере пяти ключевых направлений профилактической медицины, определённых “Программой фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы)”.

Цифровые технологии здоровьесбережения базируются на разработанной 30 лет назад каскадной схеме рисков здоровью человека при раздельном и комбинированном воздействии факторов условий жизнедеятельности [14]. На этой основе разрабатываются системы квалиметрии жизни и рискометрии здоровья работающего населения. Цифровизация расширяет их потенциальные возможности, позволяя более качественно подходить к решению прикладных задач благодаря учёту существенно большего объёма информации об обследуемых людях с привлечением технологий обработки больших данных, которые, в свою очередь, обеспечивают:

- необходимую производительность обработки данных, в том числе на основе их горизонтальной масштабируемости путём распределения на множество вычислительных узлов;
- применение специальных компьютерных методов и инструментов, позволяющих интерпретировать большой объём данных, заостряя внимание лишь на ключевых факторах эффективности, моделируя исход различных вариантов действий и отслеживая результаты принятия решений;
- реляционное (табличное) хранение информации, снабжённое лингвистическими средствами взаимодействия с базами данных, предоставляющими пользователю удобные средства формулирования запросов.

Цифровизация технологий здоровьесбережения повышает эффективность решения прикладных задач: совершенствование организации здравоохранения и медицинской науки [15]; развитие научных основ профилактики заболеваний человека [16]; изучение влияния патофизиологических механизмов производственных и неблагоприятных факторов окружающей среды (в том числе производственной) на здоровье населения [17, 18]; разработка научных основ совершенствования государственной политики, нормативно-правовой базы по проблемам экологии человека, гигиены и медицины окружающей среды, медицины труда, обеспечения химической и биологической безопасности населения [10, 16]; установление молекулярных механизмов действия и метаболизма загрязнителей пищевой продукции природного и антропогенного происхождения, пищевых добавок [16]; эпидемиологические исследования питания, пищевого статуса и состояния здоровья населения [10]; квалиметрия и безопасность пищевой продукции, в том числе полученной методами био- и нанотехнологий [19]; создание инновационных технологий для производства специализированных и функциональных пищевых продуктов

и ингредиентов [19]; анализ физического развития и оптимизации питания различных возрастных групп населения, включая спецконтингент [20]; определение безопасности и эффективности использования новых и нетрадиционных источников пищи и пищевых веществ, а также продуктов на их основе [19]; изучение молекулярных механизмов адаптогенного действия алиментарных факторов в спорте высших достижений [19].

Прогресс цифровых технологий в сфере *арктической медицины и экологии человека в экстремальных климатогеографических условиях* во многом связан с координацией этих работ на базе созданного в марте 2024 г. Федерального центра арктической медицины ФМБА России. Цифровизация этой области способствует решению таких задач, как: разработка технологий адаптивного управления организмом человека в экстремальных природно-климатических условиях Арктики [21]; изучение особенностей заболеваемости, уровня и причин смертности, состояния основных функциональных систем организма, а также генома, протеома, метаболома, кишечной микробиоты, биохимического и иммунного статуса организма у коренного и пришлого населения Арктической зоны [22]; создание новых технологий получения биотехнологических препаратов для профилактики и лечения инфекционных заболеваний, болезней адаптации и иммунной системы у коренного и пришлого населения [23]; разработка специализированных рационов и пищевых продуктов для улучшения адаптации людей к экстремальным условиям [19].

Активное внедрение цифровых технологий в *микробиологию* открывает новые возможности в следующих сферах: биотехнологии и разработка диагностических тест-систем для мониторинга течения и контроля эффективности лечения хронического гепатита В [24]; изучение молекулярно-генетических механизмов реализации генетической информации микроорганизмов и сообществ [25]; анализ генетических характеристик и специфичности действия бактериофагов [25]; выявление генетических механизмов формирования и распространения линий бактерий со множественной устойчивостью и вирулентных бактерий [26]; исследование симбиотических микробиоценозов пищеварительного тракта и роли микробиоты кишечника человека в норме и при патологии [19]; изучение молекулярных механизмов толерантности, персистенции и резистентности бактерий к противоинфекционным препаратам [27]; развитие научных основ применения информационных технологий в медицине [28, 29]; изучение молекулярных механизмов резистентности микроорганизмов к лекарственным соединениям и развитие методов диагностики и способов биологической защиты на базе вакцин и химических препаратов [27]; исследование кишечной микробиоты пациентов с заболеваниями толстой кишки для

преодоления распространения антибиотикорезистентных штаммов микроорганизмов [19].

Цифровые технологии в *вирусологии* способствуют решению следующих задач: определение роли вирусов в этиопатогенезе воспалительных заболеваний [30]; изучение молекулярно-биологических и генетических основ жизнедеятельности, механизмов патогенности и изменчивости вирусов [31]; установление молекулярных механизмов функционирования РНК-содержащих вирусов, вызывающих особо опасные заболевания человека и животных, макро- и микроэволюция вирусных РНК-геномов и структуры заражённой вирусом клетки [32]; установление структуры РНК-содержащих вирусов, отдельных вирусных белков с использованием уникальных научных установок на объектах “мега-сайенс” [32]; создание системы мониторинга возбудителей вирусных гепатитов [23]; разработка вирусных препаратов для персонализированной вирусной терапии онкологических заболеваний [33].

Цифровизация в области *эпидемиологии* обеспечивает: проведение молекулярно-генетических исследований эпидемиологии и экологии возбудителей инфекций [25]; создание методов профилактики распространения вируса иммунодефицита человека (ВИЧ) путём превентивного применения препаратов, угнетающих его размножение [34]; создание новых поколений вакцин против вирусных и бактериальных инфекций [35]; проведение фундаментальных физико-химических исследований патогенов и физиологических процессов, создание лекарственных препаратов для лечения и профилактики социально значимых заболеваний [29]; изучение эпидемиологических, социальных и клинических факторов, определяющих риски неблагоприятных исходов антибиотикотерапии у пациентов с инфекциями, связанными с оказанием медицинской помощи [29].

Пандемия COVID-19 стимулировала процессы цифровой трансформации в отечественной эпидемиологии, в результате чего созданы три эффективные платформы эпидемиологического мониторинга новой коронавирусной инфекции: системы агрегации данных VGARus, SOLAR и аналитическая платформа Superset [26, 27, 30]. Эти платформы осуществляют анализ эпидемиологической обстановки, принимая во внимание существенную разнородность субъектов РФ по плотности населения, географическим и экономическим условиям, и организацию постоянного молекулярно-генетического мониторинга с учётом высокой изменчивости возбудителя. Система противодействия инфекциям “Санитарный щит” (ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора) вносит существенный вклад в снижение распространения инфекционных заболеваний, их оперативную и надёжную диагностику, снижение бремени болезней, связанных с факторами окружающей среды. Кроме того, цифровые

технологии способствуют реализации новых мер безопасности без причинения людям какого-либо дискомфорта [24].

Следует отметить интенсивное развитие цифровой нутрициологии, которая затронула большинство направлений профилактической медицины: разработаны теоретические основы, опубликованы монографии и руководства, направленные на эффективное решение проблемы гигиены питания с применением цифровых технологий [19, 20].

В настоящее время особенно интенсивно развиваются цифровые технологии медицинского обеспечения участников специальной военной операции. Таким образом, повышенное внимание к решению всех перечисленных задач, приоритетное финансирование, большая востребованность полученных результатов обуславливают прогресс цифровизации, разработку и реализацию мероприятий цифровой профилактической медицины для многих социoproфессиональных групп населения.

Цифровые технологии сохранения здоровья работающего населения. Ярким примером повышения объяснительной силы профилактической медицины, обусловленным цифровизацией, служат решения таких её приоритетных задач, как сохранение здоровья, обеспечение работоспособности, надёжности деятельности и продление профессионального долголетия работающего населения. В частности, ФМБА России реализует Стратегию развития промышленной медицины, в рамках которой открыты 23 центра промышленной медицины в 11 регионах РФ, а к 2027 г. планируется открыть 60 таких центров. В результате доступ к медицинским осмотрам трудоспособного населения достиг 99%, число впервые выявленных заболеваний увеличилось на 15%, количество случаев временной нетрудоспособности снизилось на 14%, а её длительность сократилась на 18%, при этом удовлетворённость качеством медицинской помощи выросла на 30%.

В соответствии с традиционными представлениями медицинский контроль за работниками подразумевает: допуск к работе (в том числе профессиональный отбор), предсменный и послесменный медицинский контроль, углублённые медицинские освидетельствования (включая врачебные комиссии). В настоящее время мониторинг физического состояния человека фактически осуществляется до и после работы, а информации о его динамике в процессе деятельности нет: уровни и экспозиции неблагоприятных факторов в большинстве случаев определяются только в ходе специальной оценки условий труда, а в рамках медицинского обеспечения учитываются лишь в виде усреднённых величин. Между тем наличие такой объективной персонифицированной информации повысит эффективность управления рисками здоровья, ассоциированными с факторами окружающей среды. Попытки внедрения этих методов предпринимались и ранее, однако

при этом возник ряд ограничений: создание помех в работе сотрудника при регистрации характеристик его состояния, невозможность персонифицированного мониторинга интенсивности факторов условий труда в реальном времени ввиду дороговизны и большой технической сложности. Цифровые технологии помогут избежать этих проблем. Существует три вида мониторинга состояния человека в процессе работы:

- гигиеническая паспортизация источников потенциально опасных физических факторов с идентификацией траектории перемещения работников [36];
- бесконтактный мониторинг здоровья в процессе деятельности [37];
- мониторинг состояния сотрудников в ходе работы с помощью датчиков (сенсоров), встраиваемых в индивидуальную экипировку и снаряжение [38].

Гигиеническая паспортизация предполагает отказ от дорогостоящих устройств — дозиметров факторов риска, при этом осуществляются:

- гигиеническая паспортизация источников физических факторов путём построения пространственных полей для каждого из них, что позволяет определить интенсивность действия фактора в любой момент;
- отслеживание траектории движения каждого работника в процессе его деятельности с помощью меток радиочастотной идентификации.

Наложение траектории на карту полей физических факторов помогает провести объективную персонифицированную идентификацию рисков здоровью, обусловленных воздействием среды [36]. Подход использовался при разработке системы управления рисками развития нейросенсорной тугоухости. Получены объективные оценки доз физических факторов, воздействующих на человека в процессе работы, установлены критерияльно значимые показатели, обоснованы комплекс лечебно-профилактических мероприятий, медико-технические требования к средствам индивидуальной и коллективной защиты от шума и к аппаратуре для исследования акустического рефлекса [39]. В частности, изготовлены образцы средств индивидуальной защиты с индикаторами акустической опасности, позволяющие применять их не в течение всей рабочей смены, а только при появлении рисков здоровью и работоспособности, что отвечает концепции персонифицированного управления рисками здоровью [40]. При апробации результатов наблюдаются снижение заболеваемости инженерно-технического персонала из-за воздействия акустического фактора на 10–25% и повышение профессионального долголетия на 5–7 лет [39]. Цифровые технологии способствуют реализации системы управления здоровьем через факторы риска, что особенно важно для охраны здоровья работников на стратегически важных объектах с опасными условиями труда и населения прилегающих территорий [41].

Бесконтактный мониторинг состояния работников отработан благодаря биорадиолокации. Становление этой технологии началось в 1975 г. с теоретического обоснования базовой технологической концепции, а в 2013 г. появились миниатюрные устройства — биорадиолокаторы на чипе [42]. Цифровой бесконтактный мониторинг состояния оператора показал свою эффективность, в частности, при гигиеническом нормировании сложности полётных заданий при испытаниях вертолётчиков, распознавании стресс-индуцированных расстройств лётного состава государственной авиации в интересах их профилактики и ранней коррекции [42]. Для этого в процессе осуществления профессиональной деятельности параллельно регистрировались показатели здоровья лётчика и качества его работы, затем синтезирован интегральный показатель рабочей нагрузки, учитывающий индивидуальные особенности организма человека, его профессиональную подготовленность, особенности режима труда и отдыха и организации полётов [43]. Использование полученных результатов при планировании испытательных полётов обеспечило уменьшение напряжённости трудового процесса на 15–45% и, как следствие, снижение на 30–40% рисков, обусловленных ошибочными действиями лётчика. Этот метод потенциально эффективен для гигиенического нормирования деятельности любых социoproфессиональных групп специалистов операторского профиля.

Цифровые технологии мониторинга физического состояния работников в процессе их деятельности с помощью датчиков (сенсоров), встраиваемых в экипировку (снаряжение), позволяют без помех получать информацию о сердечно-сосудистой и дыхательной системах, концентрациях токсичных химических веществ, биомаркеров глюкозы, лактата, pH, гемоглобина, показателей электрофизиологических и сенсорных функций одежды [38]. Такие технологии успешно апробированы, в частности, при испытаниях защитного снаряжения специалистов опасных профессий (получено обоснование медицинских и эргономических требований с учётом объективных оценок состояния на всех этапах испытаний) и при разработке средств управления микроклиматом внутри средств индивидуальной защиты от биологического фактора.

Эти результаты важны для поддержания профессиональной работоспособности, сохранения здоровья и продления профессионального долголетия специалистов опасных профессий. Их реализация планируется в том числе в составе Единой ведомственной системы мониторинга биологических, радиационных и химико-токсикологических рисков здоровью персонала под эгидой ФМБА России.

Проблемы цифровизации профилактической медицины. При цифровом решении задач профилактической медицины возник ряд вопросов, игнорирование которых повлечёт за собой получение

некорректных и ошибочных результатов. К их числу относится адекватная (с медицинской точки зрения) цифровая диагностика состояния человека по двум направлениям. Во-первых, при разработке методик диагностики состояния ведётся учёт активности всех функциональных систем организма, задействованных в формировании и развитии конкретного состояния в соответствии с его доминантой. Этот подход базируется на концепции паттернов функциональных состояний операторов эргатических систем¹, сформулированной благодаря развитию идей академика А.А. Ухтомского [37]. Концепция определяет принципы формирования множества информативных характеристик конкретного диагностируемого состояния при его возникновении и развитии.

Во-вторых, при разработке способов регистрации и обработки информации учитываются информативные диапазоны изменения показателей активности функциональных систем организма. Решение этого вопроса связано с необходимостью обязательной сертификации средств регистрации и обработки информации и верификации методического обеспечения. Например, оценки спектральных показателей вариабельности ритма сердца, определённые различными сертифицированными приборами на одном и том же массиве данных, могут различаться в два и более раза вследствие использования разных модификаций преобразования Фурье [44]. Результаты сопоставления измерений сатурации крови на разных высотах прямым методом и с применением цифровых часов показали, что последние не соответствуют приемлемым критериям достоверности и систематически завышают величину сатурации [45].

К числу факторов, сдерживающих развитие технологий цифровой профилактической медицины, относятся ограничения беспроводной передачи данных при медицинском обеспечении специалистов опасных профессий. Эти ограничения, в частности, препятствуют реализации накопленного опережающего научно-технологического задела при медицинском контроле персонала арктических комплексов, технических средств медицинской эвакуации и внедрения системы управления здоровьем специалистов опасных профессий через факторы риска. Разработанные и апробированные технологии ждут своего часа, а именно — достижения высокого уровня технологий информационной и кибербезопасности.

Можно также указать на специфические сложности реализации технологий цифровой профилактической медицины:

- невыраженность признаков изменений анализируемых состояний, что существенно усложняет их дифференцировку и распознавание опасных факторов риска;

- обратимость изменений в течение короткого времени, что может повлечь за собой пропуск потенциально опасных состояний;

- отсроченный экономический эффект реализации технологий профилактической медицины (точка безубыточности располагается в районе 10 лет, тогда как для технологий клинической медицины — 1 год);

- малые объёмы доступных репрезентативных выборок, что ограничивает возможности применения технологий искусственного интеллекта;

- игнорирование необходимости корректной верификации технологий профилактической медицины и обоснованно высокого доверия к ним практикующих врачей.

Перечисленные факторы обуславливают развитие исследований в смежных предметных областях, необходимых для успешного решения задач профилактической медицины.

Приоритеты развития цифровой профилактической медицины. Цифровизация профилактической медицины требует комплексного, межотраслевого, межведомственного и междисциплинарного подходов к её использованию в приоритетных направлениях фундаментальных и поисковых научных исследований:

- развитие научных основ применения цифровых технологий в профилактической медицине;

- разработка цифровых медицинских технологий здоровьесбережения, включая развитие научных основ профилактики заболеваний человека;

- разработка цифровых технологий медицинской реабилитации участников специальной военной операции с реализацией централизованной маршрутизации пациентов в интересах преемственности и комплексности оказываемой медицинской помощи;

- разработка цифровых медицинских технологий идентификации и минимизации рисков здоровью работающего населения;

- изучение влияния патофизиологических механизмов производственных и неблагоприятных факторов окружающей среды на здоровье населения по результатам скрининговых и углублённых медицинских исследований;

- разработка цифровых медицинских технологий адаптивного управления организмом человека в экстремальных условиях;

- научное обоснование оптимальных или, по крайней мере, безвредных сроков пребывания человека в экологически изменённых условиях, а также при сочетании воздействия экологических и других неблагоприятных факторов;

- разработка методологии цифровой диагностики состояния здоровья специалистов опасных профессий и резервов организма в зависимости от вида экологических стресс-факторов;

¹ Эргатическая система — это система, состоящая из оператора, технических средств, предмета деятельности и непосредственно взаимодействующей с ними внешней среды.

• изучение ближайших и отдалённых последствий изолированного и комбинированного воздействия неблагоприятных экологических факторов, процессов и условий на здоровье и надёжность деятельности работников опасных профессий с использованием цифровых двойников.

Цифровая профилактическая медицина включает специфические цифровые технологии, ориентированные на предупреждение возникновения заболеваний и травм, недопущение и устранение факторов риска их развития. Разработка таких технологий невозможна без непосредственного участия специалистов в области профилактической медицины, а их цифровизация расширит потенциальные возможности традиционной медицины. Отечественная наука уже заложила теоретический фундамент для развития технологий цифровой профилактической медицины, их реализация — одна из приоритетных задач на ближайшее будущее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красников Г.Я., Дубина М.В. Об основных результатах работы РАН в отчётном периоде и о приоритетных направлениях её деятельности // Вестник РАН. 2023. № 8. С. 772–778.
Krasnikov G.Y., Dubina M.V. On the main results of the RAS activity in the reporting period and priority directions of its work // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2023, no. 8, pp. 772–778. (In Russ.)
2. Профилактическая медицина в основных терминах и определениях / Под ред. В.В. Зверева. М.: Наука, 2024.
Preventive medicine in basic terms and definitions / Ed. by V.V. Zverev. Moscow: Nauka, 2024. (In Russ.)
3. Скитер Н.Н., Кетько Н.В., Нестеров П.Ю. и др. Персональные цифровые помощники как основа цифровой медицины // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2024. № 1. С. 221–224.
Skeeter N.N., Ketko N.V., Nesterov P.Yu. et al. Personal digital assistants as the basis of digital medicine // Competitiveness in the global world: economics, science, technology. 2024, no. 1, pp. 221–224. (In Russ.)
4. Османов Э.М., Решетников В.А., Гусейнова З.Г., Омаров М.А. Цифровые технологии в медицине: мнение пациентов с артериальной гипертензией // Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. 2024. № 1. С. 909–925.
Osmanov E.M., Reshetnikov V.A., Guseinova Z.G., Omarov M.A. Digital technologies in medicine: opinion of patients with arterial hypertension // Current problems of health care and medical statistics. 2024, no. 1, pp. 909–925. (In Russ.)
5. Полунина Н.В., Пивоваров Ю.П., Милушкина О.Ю. Профилактическая медицина — основа сохранения здоровья населения // Вестник РГМУ. 2018. № 5. С. 5–13.
Polunina N.V., Pivovarov Yu.P., Milushkina O.Yu. Preventive medicine is a cornerstone of health promotion // Bulletin of Russian State Medical University. 2018, no. 5, pp. 5–11. (In Russ.)
6. Ушаков И.Б., Богомолов А.В. Информатизация программ персонализированной адаптационной медицины // Вестник РАМН. 2014. № 5–6. С. 124–128.
Ushakov I.B., Bogomolov A.V. Informatization of personalized adaptation medicine programs // Annals of the Russian Academy of Medical Sciences. 2014, no. 5–6, pp. 124–128. (In Russ.)
7. Ракитский В.Н., Авалиани С.Л., Шашина Т.А., Додина Н.С. Актуальные проблемы управления рисками здоровью населения в России // Гигиена и санитария. 2018. № 6. С. 572–575.
Rakitskiy V.N., Avaliani S.L., Shashina T.A., Dodina N.S. Actual problems of population health risks management in Russia // Hygiene and Sanitation. 2018, no. 6, pp. 572–575. (In Russ.)
8. Хабриев Р.У., Стасевич Н.Ю., Картон Е.А. и др. Современные методы оценки реализации персонализированных программ профилактики возраст-ассоциированных заболеваний // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2021. № 3. С. 410–414.
Khabriev R.U., Stasevich N.Y., Carton E.A. et al. The modern methods of evaluation of implementing personalized programs of prevention of age-associated diseases // The problems of social hygiene, public health and history of medicine. 2021, no. 3, pp. 410–414. (In Russ.)
9. Зайцева Н.В., Курьянов Д.А., Землянова М.А. и др. Концептуальные основы корпоративной интеллектуальной риск-ориентированной системы анализа, прогноза и профилактики профессиональных и производственно-обусловленных нарушений здоровья работников // Анализ риска здоровью. 2023. № 4. С. 19–32.
Zaitseva N.V., Kiryanov D.A., Zemlyanova M.A. et al. Conceptual foundations of a corporate intelligent risk-based system for analysis, prediction and prevention of occupational and work-related health disorders of workers // Health risk analysis. 2023, no. 4, pp. 19–32. (In Russ.)
10. Мозганов М.Ю., Николаева Н.И., Филин А.С. и др. Анализ отдельных перспективных направлений развития оценки риска для здоровья населения в Российской Федерации (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2024. № 1. С. 76–80.
Mozganov M.Yu., Nikolaeva N.I., Filin A.S. et al. Analysis of some promising directions of the development of the public health risk assessment in the Russian Federation (review article) // Hygiene and Sanitation. 2024, no. 1, pp. 76–80. (In Russ.)

11. Кузьмин С.В., Кучма В.Р., Ракитский В.Н. и др. Роль научных организаций гигиенического профиля в научном обосновании национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровья и повышения качества жизни населения России // *Здравоохранение Российской Федерации*. 2022. № 5. С. 356–365.
Kuzmin S.V., Kuchma V.R., Rakitskiy V.N. et al. Role of scientific institutions of hygienic profile in the scientific substantiation of the national system of sanitary and epidemiological well-being, health risk management and improvement of the quality of life in the Russian population // *Health care of the Russian Federation*. 2022, no. 5, pp. 356–365. (In Russ.)
12. Михайлова А.А., Ефимова А.К., Шестаков А.В. и др. Комплексный анализ процессов интеграции информационных технологий в медицинские организации // *Вестник РАМН*. 2021. № 2. С. 196–209.
Mikhailova A.A., Efimova A.K., Shestakov A.V. et al. Complex analysis of information technologies integration and adoption into medical organizations // *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2021, no. 2, pp. 196–209. (In Russ.)
13. Разумов А.Н., Бобровницкий И.П. О разработке комплекса процессных мероприятий “Развитие науки и технологий по проблемам стресса, адаптации и реабилитации на 2024–2030 годы” // *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. 2023. № 3–2. С. 172–175.
Razumov A.N., Bobrovnikskiy I.P. On the development of a complex of process measures “Development of science and technology on problems of stress, adaptation and rehabilitation for 2024–2030” // *Problems of balneology, physiotherapy and exercise therapy*. 2023, no. 3–2, pp. 172–175. (In Russ.)
14. Ушаков И.Б. Общая структурная (каскадная) схема изменения профессионального здоровья в авиации // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 1994. № 5. С. 4–7.
Ushakov I.B. General structural (cascade) scheme of changes in occupational health in aviation // *Aerospace and environmental medicine*. 1994, no. 5, pp. 4–7. (In Russ.)
15. Демкина А.Е. Эволюция цифровой медицины: мировой и отечественный опыт // *Вестник Московского университета. Серия 21: Управление (государство и общество)*. 2023. № 2. С. 3–26.
Demkina A.E. The evolution of digital medicine: world and domestic experience // *Bulletin of the Moscow University. Series 21: Governance (State and Society)*. 2023, no. 2, pp. 3–26. (In Russ.)
16. Онищенко Г.Г. Актуальные проблемы и перспективы развития методологии анализа риска в условиях современных вызовов безопасности для здоровья населения Российской Федерации // *Анализ риска здоровью*. 2023. № 4. С. 4–18.
Onishchenko G.G. Development of the risk analysis methodology given the current safety challenges for public health in the Russian Federation // *Health risk analysis*. 2023, no. 4, pp. 4–18. (In Russ.)
17. Кузнецов П.П., Соболев К.Э., Какорина Е.П. и др. Цифровая трансформация медицины труда // *Национальное здравоохранение*. 2021. № 3. С. 41–46.
Kuznetsov P.P., Sobolev K.E., Kakorina E.P. et al. Digital transformation of occupational medicine // *National Health Care (Russia)*. 2021, no. 3, pp. 41–46. (In Russ.)
18. Зайцева Н.В., Шур П.З., Лир Д.Н. и др. Методические подходы к персонализированной оценке риска здоровью, обусловленного напряжённостью трудового процесса и её отдельными компонентами // *Анализ риска здоровью*. 2023. № 3. С. 102–111.
Zaitseva N.V., Shur P.Z., Lir D.N. et al. Methodological approaches to the personalized assessment of health risk caused by the intensity of the labor process and its individual components // *Health risk analysis*. 2023, no. 3, pp. 102–111. (In Russ.)
19. Нутрициология и клиническая диетология: национальное руководство / Под ред. В.А. Тутельяна и Д.Б. Никитюка. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2024.
Nutritionology and Clinical Dietetics: National Guidelines / Ed. by V.A. Tutelyan and D.B. Nikityuk. Moscow: GEOTAR-Media, 2024. (In Russ.)
20. Гавриков М.Б., Кислицын А.А., Орлов Ю.Н. и др. Введение в персонализированную цифровую нутрициологию. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2024.
Gavrikov M.B., Kislitsyn A.A., Orlov Yu.N. et al. Introduction to personalized digital nutrition. Moscow: GEOTAR-Media, 2024. (In Russ.)
21. Бобровницкий И.П., Нагорнев С.Н., Худов В.В., Яковлев М.Ю. Перспективные направления развития инновационных технологий здоровьесбережения в Арктической зоне Российской Федерации // *Russian Journal of Rehabilitation Medicine*. 2021. № 1. С. 16–40.
Bobrovnikskiy I.P., Nagornev S.N., Khudov V.V., Yakovlev M.Yu. Prospective areas of development innovative health saving technologies in the Arctic zone Russian Federation // *Russian Journal of Rehabilitation Medicine*. 2021, no. 1, pp. 16–40. (In Russ.)
22. Горбатова Л.Н., Дегтева Г.Н., Zubov Л.А. Арктическая медицина: проблемы и перспективы // *Арктические ведомости*. 2015. № 3 (14). С. 74–79.
Gorbatova L.N., Degteva G.N., Zubov L.A. Arctic medicine: problems and prospects // *The Arctic Herald*. 2015, no. 3 (14), pp. 74–79. (In Russ.)
23. Прилипко Н.С., Турбинский В.В., Бобровницкий И.П. Гигиеническая оценка персонализированного риска здоровью для профилактики экологически обусловленных заболеваний в системе первичной медико-санитарной помощи населению //

- Российский журнал экологической и восстановительной медицины. 2020. № 3. С. 5–35.
- Prilipko N.S., Turbinsky V.V., Bobrovniksky I.P.* Hygienic assessment of personalized health risk for the prevention of environmentally caused diseases in the system of primary health care for the population // *Russian Journal of Rehabilitation Medicine*. 2020, no. 3, pp. 5–35. (in Russ.)
24. *Акимкин В.Г.* Национальная система микробиологического мониторинга микроорганизмов, устойчивых к противомикробным препаратам // *Вестник РАН*. 2024. № 1. С. 4–10.
Akimkin V.G. National system for microbiological monitoring of microorganisms resistant to antimicrobial drugs // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2024, no. 1, pp. 4–10. (In Russ.)
 25. *Акимкин В.Г., Семенов Т.А., Хафизов К.Ф. и др.* Стратегия геномного эпидемиологического надзора: проблемы и перспективы // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии*. 2024. № 2. С. 163–172.
Akimkin V.G., Semenenko T.A., Khafizov K.F. et al. Genomic surveillance strategy. Problems and perspectives // *Journal of microbiology epidemiology immunobiology*. 2024, no. 2, pp. 163–172. (In Russ.)
 26. *Акимкин В.Г., Хафизов К.Ф., Дубоделов Д.В. и др.* Молекулярно-генетический мониторинг и технологии цифровой трансформации в современной эпидемиологии // *Вестник РАМН*. 2023. № 4. С. 363–369.
Akimkin V.G., Khafizov K.F., Dubodelov D.V. et al. Molecular genetic monitoring and digital transformation technologies in modern epidemiology // *Annals of the Russian academy of medical sciences*. 2023, no. 4, pp. 363–369. (In Russ.)
 27. *Козлов Р.С., Кузьменков А.Ю., Виноградова А.Г.* Антибиотикорезистентность как медицинская проблема // *Вестник РАН*. 2024. № 1. С. 11–18.
Kozlov R.S., Kuzmenkov A.Yu., Vinogradova A.G. Antibiotic resistance as a medical problem // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2024, no. 1, pp. 11–18. (In Russ.)
 28. *Богомолов А.В.* Информационные технологии цифровой адаптивной медицины // *Информатика и автоматизация*. 2021. № 5. С. 1154–1182.
Bogomolov A.V. Information technologies of digital adaptive medicine // *Informatics and automation*. 2021, no. 5, pp. 1154–1182. (In Russ.)
 29. *Гусев А.В., Владзимирский А.В., Голубев Н.А., Зарубина Т.В.* Информатизация здравоохранения Российской Федерации: история и результаты развития // *Национальное здравоохранение*. 2021. № 3. С. 5–17.
Gusev A.V., Vladzimirskii A.V., Golubev N.A., Zarubina T.V. Informatization of healthcare in the Russian Federation: history and results of development // *National Health Care (Russia)*. 2021, no. 3, pp. 5–17. (In Russ.)
 30. *Шилкина Н.П., Дряженкова И.В., Юнонин И.Е., Четвертакова Ж.Е.* Некоторые аспекты патогенеза иммуновоспалительных заболеваний // *Терапия*. 2022. № S7 (59). С. 103–104.
Shilkina N.P., Dryazhenkova I.V., Yunonin I.E., Chetvertakova Zh.E. Some aspects of the pathogenesis of immuno-inflammatory diseases // *Therapy*. 2022, no. S7 (59), pp. 103–104. (In Russ.)
 31. *Москалев А.В., Гумилевский Б.Ю., Апчел В.Я., Цыган В.Н.* Новый взгляд на иммунопатогенез инфекции, вызванной вирусом иммунодефицита человека // *Вестник Российской военной-медицинской академии*. 2023. № 4. С. 665–680.
Moskalev A.V., Gumilevskiy B.Yu., Apchel V.Ya., Tsygan V.N. A new look at the immunopathogenesis of infection caused by the human immunodeficiency virus // *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2023, no. 4, pp. 665–680. (In Russ.)
 32. *Муратходжаев Д.Н., Арипова Т.У.* Основа противовирусной защиты человека – РНК-интерференция // *Медицинская иммунология*. 2022. № 5. С. 1065–1074.
Muratkhodjaev J.N., Aripova T.U. RNA interference is the basis of human antiviral defense // *Medical Immunology (Russia)*. 2022, no. 5, pp. 1065–1074. (In Russ.)
 33. *Пестов Н.Б., Назаренко А.С., Бирюкова Ю.К. и др.* Перспективы применения онколитических вирусных средств в онкогематологии и при солидных опухолях // *Клиническая онкогематология. Фундаментальные исследования и клиническая практика*. 2024. № S1. С. 5–6.
Pestov N.B., Nazarenko A.S., Biryukova Y.K. et al. Perspectives for the Use of Oncolytic Viral Agents in Oncohematology and in Solid Tumors // *Clinical oncohematology. Basic research and clinical practice*. 2024, no. S1, pp. 5–6. (In Russ.)
 34. *Покровский В.В.* В авангарде борьбы с распространением вируса иммунодефицита человека // *Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы*. 2023. № 2. С. 88–96.
Pokrovsky V.V. At the forefront of the fight against the spread of the human immunodeficiency virus // *Epidemiology and infectious diseases. Current issues*. 2023, no. 2, pp. 88–96. (In Russ.)
 35. *Нагиева Ф.Г., Баркова Е.П., Строева А.Д. и др.* Новый подход к оценке иммуномодулирующей и вирус-ингибирующей активности медицинских препаратов // *Инфекционные болезни: новости, мнения, обучение*. 2022. № 4 (43). С. 82–90.
Nagieva F.G., Barkova E.P., Stroeve A.D. et al. A new approach to assessing the immunomodulatory and virus-inhibiting activity of medical preparations // *Infectious diseases: news, opinions, training*. 2022, no. 4 (43), pp. 82–90. (In Russ.)
 36. *Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Драган С.П., Солдатов С.К.* Методологические основы персон-

- нифицированного гигиенического мониторинга // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2017. № 6. С. 53–56.
- Ushakov I.B., Bogomolov A.V., Dragan S.P., Soldatov S.K.* Methodological fundamentals of personified hygiene monitoring // *Aerospace and environmental medicine*. 2017, no. 6, pp. 53–56. (In Russ.)
37. *Ушаков И.Б., Богомолов А.В.* Диагностика функциональных состояний человека в приоритетных исследованиях отечественных физиологических школ // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2021. № 3. С. 91–100.

Ushakov I.B., Bogomolov A.V. Diagnostics of human functional states in priority studies of Russian physiological schools // *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2021, no. 3, pp. 91–100. (In Russ.)

 38. *Шешегов П.М., Зинкин В.Н., Дворянчиков В.В., Миронов В.Г.* Нейросенсорная тугоухость шумовой этиологии у военнослужащих: диагностика, лечение и профилактика // *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2015. № 2 (50). С. 60–66.

Sheshegov P.M., Zinkin V.N., Dvoryanchikov V.V., Mironov V.G. Sensorineural hearing loss of noise etiology in military personnel: diagnosis, treatment and prevention // *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2015, no. 2 (50), pp. 60–66. (In Russ.)

 39. *Тюрин И.Н., Гетманцева В.В., Андреева Е.Г., Ташпулатов С.Ш.* Электронный текстиль: обзор основных направлений исследований // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2024. № 1 (409). С. 5–12.

Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Andreeva E.G., Tashpulatov S.S. Electronic textiles: a review of main research areas // *Proceedings of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2024, no. 1 (409), pp. 5–12. (In Russ.)

 40. *Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Драган С.П., Солдатов С.К.* Методологические основы персонифицированного акустического мониторинга // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 10. С. 33–39.

Ushakov I.B., Bogomolov A.V., Dragan S.P., Soldatov S.K. Methodological foundations of the person-alized acoustic monitoring // *Occupational safety in industry*. 2020, no. 10, pp. 33–39. (In Russ.)

 41. *Бухтияров И.В., Кузьмина Л.П., Головкова Н.П. и др.* Разработка комплекса приоритетных мер по интеграции инструментов оценки условий труда для формирования уровней профессиональных рисков // *Медицина труда и промышленная экология*. 2022. № 9. С. 558–565.

Bukhtiyarov I.V., Kuzmina L.P., Golovkova N.P. et al. Development of a set of priority measures for the integration of tools for assessing working conditions for the formation of occupational risk levels // *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2022, no. 9, pp. 558–565. (In Russ.)

 42. *Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Солдатов С.К. и др.* Рискометрия функциональной надёжности лётчика. М.: Физматлит, 2022.

Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V., Soldatov S.K. et al. Riskometry of functional reliability of the pilot. Moscow: Fizmatlit, 2022. (In Russ.)

 43. *Солдатов А.С., Коронков С.О.* Технология управления исследованиями резервов внимания лётчика при подготовке к пилотированию вертолёта с применением очков ночного видения // *Современное образование*. 2021. № 4. С. 11–21.

Soldatov A.S., Koronkov S.O. Technology for controlling attention reserves of the pilot in preparation for piloting a helicopter using night vision goggles // *Modern education*. 2021, no. 4, pp. 11–21. (In Russ.)

 44. *Воробьёв К.П., Паламарчук Е.А.* Результаты независимого тестирования трёх программ вычисления показателей вариабельности сердечного ритма // *Український медичний часопис*. 2007. № 59. С. 45–51.

Vorobyov K.P., Palamarchuk E.A. The results of independent testing of three programs for calculating heart rate variability indicators // *Ukrainian Medical Journal*. 2007, no. 59, pp. 45–51. (In Russ.)

 45. *Schiefer L.M., Treff G., Treff F. et al.* Validity of peripheral oxygen saturation measurements with the Garmin Fenix® 5X Plus wearable device at 4559 m // *Sensors*. 2021, no. 21 (19), 6363.

DIGITAL PREVENTIVE MEDICINE**I.B. Ushakov^{a,*}, A.V. Bogomolov^{a,**}***^aState Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Biological Agency, Moscow, Russia***E-mail: iushakov@fmbcfmba.ru****E-mail: a.v.bogomolov@gmail.com*

In order to increase the healthy life expectancy and reduce the total temporary disability of the working population, special attention should be paid to the prevention of diseases. The modern level of scientific and technical progress allows to increase the efficiency of solving the problems of preventive medicine through the application of digital technologies. Digital preventive medicine must become an independent research field. The article characterizes the status and prospects of digitalization of key areas of preventive medicine with an emphasis on technologies to preserve the health of the working population. The current issues of digitalization of preventive medicine and priorities of its further development are identified.

Keywords: preventive medicine, digital medicine, digital preventive medicine, digitalization of medicine, digital transformation of healthcare, medical informatics.