

<https://doi.org/10.52420/usmumb.10.2.e00160>

<https://elibrary.ru/INHAUU>

Обзор

Внедрение биочипов в современную медицинскую диагностику: проблемы и пути их решения

Шамиль Факилович Мустафин , Олег Александрович Баваров

Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

 vmeda-nio@mil.ru

Аннотация. В эпоху стремительного развития медицины биочипы становятся одним из самых важных инструментов для диагностики и лечения заболеваний. Эти миниатюрные устройства позволяют анализировать биологические образцы на молекулярном уровне, что открывает новые горизонты в ранней диагностике и персонализированной медицине. Однако внедрение биочипов в клиническую практику сопряжено с рядом технологических, экономических, регуляторных и этических вызовов. Цель обзора — проанализировать текущее состояние внедрения биочипов в медицинскую диагностику, выявить основные проблемы и предложить пути их решения. В работе рассматриваются технологические, экономические, регуляторные и этические аспекты использования устройств, а также их возможное влияние на будущее медицины. В обзор включены научные публикации, посвященные разработке и применению биочипов в медицине. Особое внимание уделено современным исследованиям, опубликованным за последние 5 лет, что обеспечивает актуальность представленных данных. Выявлены следующие ключевые результаты: современные биочипы, такие как Lab-on-a-Chip и Organ-on-a-Chip, демонстрируют высокую эффективность в диагностике и моделировании биологических процессов; биочипы активно применяются для ранней диагностики рака и персонализированного лечения, а также идентификации патогенных микроорганизмов; интеграция искусственного интеллекта расширяет диагностические возможности биочипов; однако внедрение этой технологии сталкивается с экономическими и регуляторными барьерами, такими как высокая стоимость и строгие требования, а также этическими и социальными вопросами, включая конфиденциальность данных; кроме того, недостаток квалифицированных специалистов, обладающих необходимыми знаниями и навыками для работы с биочипами, создает дополнительные трудности для их широкого применения. Биочипы — это революционная технология, которая способна улучшить качество медицинской диагно-

стики. Однако для ее успешного внедрения необходимо решить несколько ключевых проблем: снизить стоимость, улучшить технологии, упростить регуляторные процедуры, обучить специалистов, сформировать четкую правовую базу. Дальнейшие работы должны быть направлены на совершенствование технологий, разработку стандартов и проведение масштабных клинических испытаний, чтобы сделать биочипы еще более эффективными и доступными для широкого применения.

Ключевые слова: биочипы, биосенсоры, молекулярная диагностика, автоматизация диагностики, проблемы внедрения биочипов

Для цитирования: Мустафин ШФ, Баваров ОА. Внедрение биочипов в современную медицинскую диагностику: проблемы и пути их решения. *Вестник УГМУ*. 2025;10(2):e00160. DOI: <https://doi.org/10.52420/usmumb.10.2.e00160>. EDN: <https://elibrary.ru/INHAUU>.

Introduction of Biochips in Modern Medical Diagnostics: Challenges and Solutions

Shamil F. Mustafin ✉, Oleg A. Bavarov

Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

✉ vmeda-nio@mil.ru

Abstract. In today's rapidly evolving medical landscape, biochips have become one of the most significant tools for diagnosing and treating diseases. These tiny devices allow us to analyze biological samples at the molecular level, opening up new possibilities for early detection and personalized medicine. However, integrating biochips into clinical practice presents a number of challenges, including technological, economic, regulatory, and ethical considerations. The aim of this review is to examine the current state of biochip integration in medical diagnostics, identify key challenges, and propose solutions. We will explore the technological, economic, regulatory, and ethical aspects of biochip use, as well as potential solutions to address these challenges. The potential impact of biochips on the future of medicine was explored in this review. Scientific publications, reports, and reviews on the development and use of biochips in medicine were consulted during the writing process. Special attention was paid to recent research published within the last five years, ensuring the relevance of presented data. The review revealed several key findings: modern biochips like Lab-on-a-Chip and Organ-on-a-Chip demonstrate high efficacy in diagnosing and modeling biological processes. Biochips have been actively used for early detection of cancer and personalized treatment as well as identifying pathogenic microorganisms. The integration of artificial intelligence enhances the diagnostic capabilities of biochips. However, the implementation of this technology is hindered by economic and regulatory chal-

lenges such as high costs, strict regulations, ethical concerns, and privacy issues. In addition, the lack of qualified specialists with the necessary knowledge and skills to work with biochips presents additional challenges for their widespread adoption. Biochips represent a revolutionary technology with the potential to significantly enhance the quality of medical diagnostics. However, in order to successfully implement this technology, several key issues must be addressed. These include reducing costs, improving technology, simplifying regulatory procedures, training specialists, and establishing a clear legal framework. Further work should focus on improving technologies, establishing standards, and conducting large-scale clinical trials in order to make biochips more effective and accessible for a wider range of applications.

Keywords: biochips, biosensors, molecular diagnostics, diagnostic automation, problems of implementing biochips

For citation: Mustafin ShF, Bavarov OA. Introduction of biochips in modern medical diagnostics: Challenges and solutions. *USMU Medical Bulletin*. 2025;10(2):e00160. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52420/usmumb.10.2.e00160>. EDN: <https://elibrary.ru/INHAUU>.

© Мустафин Ш. Ф., Баваров О. А., 2025 | © Mustafin Sh. F., Bavarov O. A., 2025

Введение

Современная медицина стремительно развивается, и технологии становятся все более важными в диагностике и лечении различных заболеваний. Одним из самых многообещающих направлений является использование биочипов — миниатюрных устройств, способных анализировать биологические образцы на молекулярном уровне [1]. Биочипы открывают новые горизонты в одновременном исследовании тысяч биомолекул, включая дезоксирибонуклеиновую (ДНК) и рибонуклеиновую кислоты, белки и другие маркеры болезней [2]. Это делает устройства мощным инструментом в областях ранней диагностики и персонализированной медицины [3, 4]. Однако внедрение этой технологии в клиническую практику сопряжено с рядом трудностей, которые необходимо преодолеть. В этой работе мы подробно рассмотрим основные проблемы, возникающие при использовании биочипов, и предложим возможные пути их решения.

Цель обзора — анализ текущего состояния внедрения биочипов в медицинскую диагностику, выявление основных проблем и предложение стратегий для их решения. В работе рассматриваются технологические, экономические, регуляторные и этические аспекты использования биочипов, а также их потенциальное влияние на будущее медицины.

Материалы и методы

Для подготовки настоящего обзора проанализирован 31 источник: оригинальные исследования, обзорные статьи, патенты и материалы конферен-

ций, освещающие различные аспекты разработки и применения биочипов в медицинской диагностике. Ниже приведены основные этапы и критерии отбора этих публикаций.

Источники данных и период охвата

В процессе поиска и отбора источников информации использованы следующие платформы (базы данных):

- 1) PubMed/MEDLINE и Scopus — поиск англоязычных статей по биочипам, их технологическим характеристикам и клиническому применению;
- 2) Web of Science — перекрестная валидация ключевых публикаций и поиск дополнительных данных по внедрению биочипов;
- 3) IEEE Xplore — получение материалов конференций и докладов по инженерным аспектам и интеграции искусственного интеллекта (ИИ) в биочипы;
- 4) eLibrary.ru и «КиберЛенинка» — поиск русскоязычных исследований и обзоров отечественных авторов;
- 5) патентные базы Роспатента — учет ключевых патентов в области биочипов.

Период охвата литературы — 2015–2025 гг. Это позволило включить в обзор как классические работы середины 2010-х гг., так и самые свежие публикации, вышедшие до мая 2025 г.

Критерии включения и исключения

Критерии включения:

- 1) тематическая релевантность: работы, посвященные разработке, тестированию или анализу биочипов в медицинском (биомедицинском) контексте;
- 2) тип публикации: оригинальные исследования, систематические и критические обзоры, отчеты, материалы конференций и патенты;
- 3) период публикации: 1 января 2015 г. — 31 апреля 2025 г. (обеспечило актуальность данных, особенно в быстро развивающихся областях);
- 4) языковые ограничения: публикации на русском и английском языках (позволило охватить как зарубежные, так и отечественные исследования).

Критерии исключения:

- 1) тезисы конференций без полного текста и описания методологии;
- 2) работы, не связанные с медицинской компонентой (например, инженерные исследования биочипов без биомедицинского применения);
- 3) популярные обзоры без ссылок на первичные источники и описания экспериментальных или технических методов, а также работы, не содержащие критический анализ или научную новизну;

- 4) публикации без доступа к полному тексту (в исключительных случаях аннотация могла быть использована для уточнения основного контекста).

Процесс отбора и анализ источников

Первичный отбор

С использованием комбинации ключевых слов («биочип», «лаборатория-на-чипе», «медицинская диагностика», «внедрение», «интеграция», biochip, Lab-on-a-Chip, medical diagnosis, implementation, integration) на указанных платформах обнаружено порядка 250–300 записей. Среди них около 120 — из зарубежных баз данных (PubMed, Scopus, Web of Science, IEEE Xplore); около 130 — отечественных (eLibrary.ru, «КиберЛенинка»).

Скрининг по заголовкам и аннотациям

Из общего числа первично отобранных записей (~250) после удаления дубликатов осталось ~220 уникальных названий. Далее проверялись заголовки и аннотации с упором на присутствие ключевых понятий: «биомедицинское применение», «клиническая валидация», «микрофлюидическая платформа», «генотипирование», «биосенсор», biomedical application, clinical validation, microfluidic platform, genotyping, biosensor. На этом этапе исключено ~150 работ, не соответствующих задачам обзора (например, инженерные отчеты без клинической части).

Анализ полного текста

Оставшиеся ~70 публикаций изучены полностью. На этапе полнотекстового анализа проверялись следующие сведения:

- 1) наличие описания медицинской направленности (например, биочипы для диагностики рака, идентификации инфекций, передающихся половым путем (ИППП));
- 2) технические характеристики и результаты валидации (чувствительность, специфичность, предел обнаружения);
- 3) регуляторный статус и экономические аспекты;
- 4) этические и социальные вопросы.

В результате полного анализа отобрана 31 публикация, удовлетворяющая всем вышеописанным критериям.

Результаты и их обсуждение

Биочипы и их развитие (включая применение информационных технологий для оптимизации процесса интерпретации результатов гибридного анализа на биочипах)

Современные биочипы представляют собой миниатюрные платформы, объединяющие несколько лабораторных процессов на единой пластине (лаборатория на чипе (*англ.* Lab-on-a-Chip), орган на чипе (*англ.* Organ-on-a-

Chip)). Они позволяют уменьшить объем реагентов и расходных материалов для проведения анализа (например, объем анализируемой пробы (кровь, сыворотка), реагентов для амплификации, веществ-меток для регистрации результата гибридизации, а также дорогостоящих моноклональных антител либо синтетических олигонуклеотидов). Также метод биочипов за счет мультиплексности позволяет ускорить анализ (например, геномные исследования, протеомное профилирование, а также иммуноанализ) и повысить его точность [1, 5]. В основе таких устройств часто лежат микро- и нанотехнологии, а также микрофлюидика, что обеспечивает высокую степень автоматизации и параллелизма при работе с биологическими образцами (например, биологическими жидкостями, тканевыми и клеточными образцами, генетическими материалами).

Одним из ключевых векторов развития биочипов стало включение в них CRISPR/Cas-систем*. Устройства на основе CRISPR/Cas12a продемонстрировали высокую специфичность и чувствительность при выявлении однонуклеотидных полиморфизмов [2]. Появились новые типы клеточных чипов, позволяющие культивировать живые клетки прямо на сенсорной поверхности и отслеживать их реакцию на лекарственные препараты в режиме реального времени. Это открывает путь к более точному моделированию *in vitro*, сводя к минимуму разрыв между лабораторными экспериментами и клиническими результатами.

Параллельно с этим активно развивается направление Organ-on-a-Chip: имитирующие фрагменты органов (печени, легких, почек и пр.) платформы позволяют воспроизводить физиологические процессы и взаимодействие клеток в условиях, близких к реальным. Это дает возможность тестировать фармакологические соединения, прогнозировать токсичность и эффективность еще на доклиническом этапе.

Важным моментом стала интеграция ИИ и алгоритмов машинного обучения в работу биочипов. Анализ больших объемов данных, генерируемых сенсорами в режиме реального времени, требует высокой вычислительной мощности и продвинутых методов обработки. Алгоритмы ИИ помогают автоматически выделять значимые сигналы, т. е. имеющие статистически достоверную интенсивность, специфичность и воспроизводимость, от незначимых (фоновый шум, артефакты или неспецифического связывания), прогнозировать траекторию развития патологического процесса и повышать точность диагностики [13, 14]. Например, комбинированные платформы «биочип + ИИ» уже успешно используются для раннего выявления нейродегенеративных заболеваний, в частности болезни Паркинсона [15]. Таким

* CRISPR — короткие палиндромные повторы, регулярно расположенные группами (*англ.* Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats). Cas — CRISPR-ассоциированный белок (*англ.* CRISPR Associated Protein).

образом, современные биочипы представляют собой миниатюрные устройства, способные не только фиксировать, но и анализировать биохимические параметры с помощью встроенных моделей машинного обучения.

Применение биочипов в медицине

Онкология

В онкологии биочипы находят широкое применение — могут использоваться как для ранней диагностики, так и персонализированного подбора терапии. Биосенсорные чипы позволяют обнаруживать онкомаркеры на самых ранних стадиях заболевания, тогда как классические методы еще не дают надежных результатов [3]. Экспрессионные микрочипы анализируют профиль экспрессии генов, ассоциированных с раковыми процессами, что помогает выявлять генетические мутации, характерные для опухолей молочной железы, легких, предстательной железы и других локализаций [4]. Кроме того, мультиплексные ДНК-чипы позволяют одновременно тестировать сотни биомаркеров сразу нескольких типов рака, что ускоряет постановку диагноза и позволяет врачам точнее прогнозировать реакцию опухоли на тот или иной препарат. Белковые чипы используются для анализа уровня экспрессии онкомаркеров и контроля эффективности терапии в динамике.

Диагностика инфекционных заболеваний

Биочипы зарекомендовали себя как высокоточные инструменты для идентификации патогенных микроорганизмов. Микрофлюидные платформы с интегрированными биосенсорами способны обнаруживать бактерии с точностью, сравнимой с культивированием, но в гораздо более короткие сроки (около 2–4 ч. против 2–5 дней) и в объемах, имитирующих образцы крови [6, 7]. ДНК-биочипы для параллельной детекции бактериальных возбудителей внебольничной пневмонии и туберкулеза доказали свою эффективность при комбинированном анализе образцов пациентов [8, 9].

Важным направлением стало применение биочипов для скрининга ИППП. Традиционные методы (полимеразная цепная реакция, серология) нередко уступают по скорости и чувствительности новейшим чип-платформам [10, 11]. Особенно актуален такой скрининг среди молодого населения (14–30 лет), которое входит в группу повышенного риска возникновения заболеваний, связанных с ИППП [12].

Генетическая идентификация и фенотипирование

В генетической диагностике биочипы используются для определения пола, группы крови (AB0-система) и других фенотипических характеристик с высокой точностью [16]. Помимо стандартных приложений применения биочипов в медицинской диагностике (генотипирования, скрининга онкогенных маркеров и выявления наследственных заболеваний) появились чипы, способные читать полиморфизмы, отвечающие за цвет волос, глаз,

кожи, а также определять Y-хромосомные гаплогруппы — ценные данные для популяционных исследований.

В криминалистике ДНК-чипы уже используются для ДНК-фенотипирования, позволяя по минимальным биологическим следам восстанавливать внешний облик подозреваемых, что облегчает работу следственным органам [17]. Однако эта технология порождает этические дискуссии: в профессиональном сообществе обсуждаются риски потенциального использования генетических данных без надлежащего согласия граждан и вопросы защиты персональной информации.

Гибкие и носимые биочипы

Среди последних инноваций особого внимания заслуживают биочипы, встроенные в гибкие подложки, которые впервые были представлены в 2021 г. [19]. Эти носимые устройства (включая смарт-пластыри и биосенсорные контактные линзы) обеспечивают непрерывный мониторинг физиологических показателей и анализ биологических жидкостей (пота, слезной и межклеточной жидкостей) в режиме реального времени [19].

Интеллектуальные биосенсоры на гибких подложках способны контролировать уровень глюкозы, артериальное давление и другие жизненно важные показатели, автоматически сигнализируя или даже вводя лекарственные препараты при критических отклонениях [20]. Разработки последних лет включают в себя интеграцию таких устройств с телемедицинскими системами, что позволяет удаленно наблюдать за состоянием пациентов из групп риска [21].

Перспективным является создание биочипов, способных анализировать маркеры физической нагрузки (лактат, креатинкиназа и др.) во время спортивных тренировок [22].

Текущие риски и барьеры

Экономические и регуляторные ограничения

Высокая стоимость разработки и производства биочипов остается серьезным препятствием для их широкого внедрения в рутинную лабораторную практику. По оценкам экспертов, создание одного диагностического биочипа может обойтись в сотни тысяч долларов с учетом расходов на исследования, клинические испытания и сертификацию [24]. Для многих медицинских учреждений, особенно в развивающихся странах и региональных больницах, такие затраты непосильны.

Регистрация и сертификация новых биочипов часто занимают от 3 до 5 лет, что задерживает их появление в клинической практике [25]. Необходимость специального оборудования для считывания данных и дефицит квалифицированных специалистов усугубляют ситуацию: многие медучреждения стоят перед выбором — инвестировать в дорогостоящее оборудование или продолжать использование традиционных методов диагностики, пусть и менее точных [24, 25].

Этические и социальные вопросы

Применение биочипов, особенно тех, что обрабатывают генетическую информацию, создает риски утечки персональных данных. Эти сведения могут быть использованы для дискриминации со стороны страховых компаний или работодателей, а также слежения и формирования биометрических баз данных без согласия граждан [17, 21].

Недостаток информированности как среди медицинских работников, так и пациентов усугубляет недоверие. Многие врачи, особенно в регионах, не обладают достаточной квалификацией для интерпретации сложных данных, получаемых с биочипов [23]. Пациенты нередко не понимают, как используются их биологические образцы, что приводит к опасениям относительно сохранности конфиденциальных данных и отказам от участия в диагностических программах [25].

Недостаток квалифицированных специалистов и технические риски

Для работы с передовыми биочипами требуются узкоспециализированные знания в областях микрофлюидики, молекулярной биологии, биоинформатики и ИИ. Нехватка специалистов, обладающих такими компетенциями, создает дополнительные трудности при внедрении технологий [9].

К тому же интеграция алгоритмов ИИ несет в себе риски ошибок при интерпретации данных: неверно обученная модель способна дать ложноотрицательный или ложноположительный результат, что в диагностике заболеваний недопустимо [14]. Подобные риски требуют постоянного контроля качества алгоритмов, тестирования на репрезентативных клинических выборках и строгого протокола валидации.

Перспективные направления

Гибкие умные носимые устройства

В будущем ожидается дальнейшее развитие носимых биочипов. Перспективны интеллектуальные пластыри, способные не только фиксировать биохимические параметры, но и автоматически доставлять лекарственные вещества при необходимости [20]. Аналогичные исследования ведутся в области контактных линз с сенсорами для постоянного контроля внутриглазного давления, что позволит пациентам с глаукомой получать данные в режиме реального времени без необходимости посещения офтальмолога [18].

Расширение применения в сельском хозяйстве и генетике животных

Биочипы для генетической паспортизации сельскохозяйственных животных могут стать стандартом для племенных хозяйств: быстрый и точный анализ породных маркеров поможет улучшать качество поголовья [26]. Также разрабатываются гидрогелевые микрочипы для оперативного определения устойчивости патогенных микроорганизмов к антимикробным препаратам, что важно для контроля инфекций в животноводческих комплексах и предотвращения распространения резистентных штаммов [6].

Эпидемиологический и биозащитный контроль

Биочипы обладают огромным потенциалом для оперативного выявления патогенов при угрозе эпидемий и биотерроризма. Существующие платформы, такие как BioFire FilmArray (bioMérieux, Франция), TaqMan Array Cards (Thermo Fisher, США), AxBio ThreatDetect (Axiom BioSciences, США), способны одновременно детектировать сотни возбудителей, включая особо опасные инфекции категории а (сибирская язва, чума, туляремия, геморрагические лихорадки), обеспечивая результаты менее чем за несколько часов [29]. Портативность и мультиплексность этих устройств делают возможным их использование в полевых условиях — на местах вспышек инфекций или в пунктах пропуска транспорта [30].

Во время пандемии коронавирусной инфекции 2019 г. биочипы применялись для дифференциальной диагностики тяжелого острого респираторного синдрома, вызываемого коронавирусом 2, а разработанные в России ДНК-биочипы продемонстрировали высокую эффективность при выявлении возбудителей внебольничных пневмоний [8, 31]. В дальнейшем интеграция таких систем в национальную систему эпиднадзора повысит готовность к биологическим угрозам.

Новые технологические подходы:

3D-печать, наноматериалы и стандартизация

Для снижения стоимости и ускорения разработки биочипов перспективно использование 3D-печати и нанотехнологий. Печать микро- и наноканалами из биосовместимых материалов позволит быстро прототипировать и тиражировать сенсорные платформы, снижая затраты на производство [3].

Параллельно необходимо разрабатывать международные стандарты производства и применения биочипов. Единые протоколы верификации, валидации и сертификации обеспечат совместимость приборов и программного обеспечения, а также упростят прохождение клинических испытаний [25].

Образование, нормативно-правовая база и этические рамки

Для успешного внедрения инновационных биочипов потребуются междисциплинарные образовательные программы для врачей, биологов и инженеров. Курсы повышения квалификации, семинары и онлайн-обучение помогут преодолеть дефицит специалистов и повысить доверие к новым диагностическим платформам.

Разработка четких этических и правовых норм, регулирующих сбор, хранение и обработку генетических данных, будет способствовать защите прав пациентов и предотвращению злоупотреблений [17, 21]. Общественные кампании по информированию граждан о пользе и рисках биочипов помогут снизить уровень тревожности и увеличить число добровольцев, участвующих в клинических исследованиях.

Клиническая апробация и масштабные исследования

Многие передовые биочипы пока находятся на стадии лабораторных испытаний и требуют масштабной клинической апробации для подтверждения их безопасности и эффективности в условиях реальной медицины, особенно при сложных заболеваниях (раке, нейродегенеративных патологиях) [27]. Только после успешных клинических исследований и получения регистрационных документов биочипы смогут стать массовым инструментом диагностики и мониторинга пациентов.

Заключение

Биочипы представляют собой революционную технологию, способную повысить качество медицинской диагностики. Однако их широкое использование сопряжено с рядом проблем, таких как высокая стоимость, технологические ограничения, регуляторные барьеры и этические вопросы. Для преодоления этих трудностей необходимо постоянно совершенствовать технологии, снижать затраты, обучать специалистов и формировать четкую правовую базу. Это позволит биочипам стать неотъемлемой частью современной медицины и обеспечить более точную диагностику, персонализированное лечение и улучшение качества жизни пациентов.

Список источников | References

1. Azizipour N, Avazpour R, Rosenzweig DH, Sawan M, Aji A. Evolution of biochip technology: A review from lab-on-a-chip to organ-on-a-chip. *Micromachines*. 2020;11(6):599. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi11060599>.
2. Chen Y, Mei Y, Jiang X. Universal and high-fidelity DNA single nucleotide polymorphism detection based on a CRISPR/Cas12a biochip. *Chemical Science*. 2021;12(12):4455–4462. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0sc05717g>.
3. Iqbal MJ, Javed Z, Sadia H, Sadia H, Anum F, Raza S, et al. Biosensing chips for cancer diagnosis and treatment: A new wave towards clinical innovation. *Cancer Cell International*. 2022;22(1):354. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12935-022-02777-7>.
4. Куликов ЕП, Мерцалов СА, Шумская ЕИ, и др. Экспрессионные микрочипы: возможности применения в клинической онкологии. *Наука молодых — Eruditio Juvenium*. 2023;11(2):229–240. [Kulikov EP, Mertsalov SA, Shumskaya EI, Piskunov RO. Expression microarrays: Possibilities of application in clinical oncology. *Science of the Young (Eruditio Juvenium)*. 2023;11(2):229–240. (In Russ., Eng.).] DOI: <https://doi.org/10.23888/HMJ2023112229-240>.
5. Kockum I, Huang J, Stridh P. Overview of genotyping technologies and methods. *Current Protocols*. 2023;3(4):e727. DOI: <https://doi.org/10.1002/cpz1.727>.

6. Zhang Y, Wang L, Li J, Zhang Yi. Recent advances in microchip-based methods for the detection of pathogenic bacteria. *Chinese Chemical Letters*. 2022;33(6):2817–2831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2021.11.033>.
7. Templier V, Roupioz Y, Livache T, Maurin M, Slimani S, Mathey R, et al. Biochips for direct detection and identification of bacteria in blood culture-like conditions. *Scientific Reports*. 2017;7(1):9457. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10072-z>.
8. Сахарнов НА, Филатова ЕН, Попкова МИ, Славин СЛ, Уткин ОВ. Разработка ДНК-биочипа для параллельной детекции бактериальных возбудителей внебольничной пневмонии. *Современные технологии в медицине*. 2024;16(2):16–28. [Sakharnov NA, Filatova EN, Popkova MI, Slavin SL, Utkin OV. Development of DNA microarray for parallel detection of community-acquired pneumonia bacterial pathogens. *Sovremennye tehnologii v medicine*. 2024;16(2):16–28. (In Russ., Eng.)]. DOI: <https://doi.org/10.17691/stm2024.16.2.02>.
9. Митько ТВ, Шакуров РИ, Ширшиков ФВ, Сизова СВ, Алиева ЕВ, Конопский ВН, и др. Создание микрофлюидного биосенсора для диагностики и типирования *Mycobacterium tuberculosis*. *Клиническая практика*. 2021;12(2):14–20. [Mitko TV, Shakurov RI, Shirshikov FV, Sizova SV, Alieva EV, Konopsky VN, et al. Development of a microfluidic biosensor for the diagnostics and typing of *Mycobacterium tuberculosis*. *Journal of Clinical Practice*. 2021;12(2):14–20. (In Russ., Eng.)]. DOI: <https://doi.org/10.17816/clinpract71815>.
10. Shaskolskiy B, Kandinov I, Kravtsov D, Vinokurova A, Gorshkova S, Filippova M, et al. Hydrogel droplet microarray for genotyping antimicrobial resistance determinants in *Neisseria gonorrhoeae* isolates. *Polymers*. 2021;13(22):3889. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13223889>.
11. Сафонова ЕИ, Запруднова ЕА. Разработка методов диагностики и лечения сифилиса на основе молекулярных механизмов. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2024;(1-1):94–97. [Safonova EI, Zaprudnova EA. Development of methods for the diagnosis and treatment of syphilis based on molecular mechanisms. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;(1-1):94–97. (In Russ., Eng.)]. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-1-1-94-97>.
12. Cao B, Wang S, Tian Z, Hu P, Feng L, Wang L. DNA microarray characterization of pathogens associated with sexually transmitted diseases. *PLoS One*. 2015;10(7):e0133927. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133927>.
13. Gupta S, Tawde P. Artificial intelligence integration in biochips: Enhancing diagnostics and precision medicine. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. 2024;12(XI):968–973. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.65255>.

14. Rodoplu Solovchuk D. Advances in AI-assisted biochip technology for biomedicine. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2024;177:116997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2024.116997>.
15. Tzouvelekis C, Ntritsos G, Manolakos E, Vlamos P. Development of a protein biochip platform for Parkinson's disease. In: Vlamos P (ed.). *GeNeDis 2020. Vol. 1338*. Cham: Springer International Publishing; 2021. P. 175–179. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-78775-2_20.
16. Фесенко ДО, Ивановский ИД, Иванов ПЛ, Земскова ЕЮ, Агапитова АС, Поляков СА, и др. Биочип для генотипирования полиморфизмов, ассоциированных с цветом глаз, волос, кожи, группой крови, половой принадлежностью, основной гаплогруппой Y-хромосомы, и его использование для исследования славянской популяции. *Молекулярная биология*. 2022;56(5):860–880. [Fesenko DO, Ivanova AV, Glotov AS, Zemskova EYu, Agapitova AS, Polyakov SA, et al. Biochip for genotyping polymorphisms associated with eye, hair, skin color, AB0 blood group, sex, Y-chromosome core haplogroup, and its application to study the Slavic population. *Molecular Biology*. 2022;56(5):860–880. (In Russ.)]. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0026898422050056>.
17. Чемерис АВ, Халиуллина АФ, Макаренко ИА, Галютдинов РР, Аминев ФГ. Использование ДНК-фенотипирования при расследовании преступлений: криминалистический и этический аспекты. *Всероссийский криминологический журнал*. 2024;18(5):522–532. [Chemeris AV, Khaliuliiina AF, Makarenko IA, Galyautdinov RR, Aminev FG. The use of DNA phenotyping in crime investigation: Forensic and ethical aspects. *Russian Journal of Criminology*. 2024;18(5):522–532. (In Russ.)]. DOI: [https://doi.org/10.17150/2500-4255.2024.18\(5\).522-532](https://doi.org/10.17150/2500-4255.2024.18(5).522-532).
18. Криворучко АЮ, Скокова АВ, Яцык ОА, Каниболоцкая АА. Современные подходы генетической идентификации породной принадлежности сельскохозяйственных животных (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(3):317–328. [Krivoruchko AY, Skokova AV, Yatsyk OA, Kanibolotskaya AA Modern approaches to the genetic identification of farm animal breeds (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(3):317–328. (In Russ.)]. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.3.317-328>.
19. Nam D, Cha JM, Park K. Next-generation wearable biosensors developed with flexible bio-chips. *Micromachines*. 2021;12(1):64. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12010064>.
20. Maigoro GM. Recent insight on biochip and its applications. *IJAEM*. 2025;7(2):673–680. DOI: <https://doi.org/10.35629/5252-0702673680>.
21. Разумов АС. Медицина XXI века: биочипы. *Медицина в Кузбассе*. 2009;(2):3–11. [Razumov AS. Medicine of the 21st century: Biochips. *Med-*

- icine in Kuzbass*. 2009;(2):3–11. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/HFIZIL>.
22. Sukumaran C, Kumar A, Sharma P, Ambilwade RP, Sunthari PM, Natrayan L. The role of AI in biochips for early disease detection. In: *2023 3rd international conference on technological advancements in computational sciences (ICTACS), Tashkent, Uzbekistan*. IEEE; 2023. P. 1323–1328. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTACS59847.2023.10390419>.
 23. Галета АА. ДНК-микрочип как эффективный молекулярный инструмент для выявления мутаций-полиморфизмов. В: Емельянов НВ, Кетова КВ (ред.). *Инновационные аспекты развития науки и техники*. Саратов: НОО «Цифровая наука»; 2021. С. 12–16. [Galeta AA. DNA microchip as an effective molecular tool for detecting polymorphism mutations. In: Emelyanov NV, Ketova KV (eds.). *Innovatsionnye aspekty razvitiya nauki i tekhniki*. Saratov: NOO “Tsifrovaya nauka”; 2021. P. 12–16. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/BTQJZB>.
 24. Улюкин ИМ, Емельянов ВН, Болехан ВН, Орлова ЕС. Эмпатия как профессионально важное качество в условиях образовательного процесса. В: *Современные научные и образовательные стратегии в общественном здоровье*. Санкт-Петербург: Воен.-мед. акад. им. С. М. Кирова; 2018. С. 176–181. [Ulyukin IM, Emelyanov VN, Bolekhan VN, Orlova ES. Empatia as a composition of dialogical communication in the process of transfer of new information. In: *Sovremennnye nauchnye i obrazovatel'nye strategii v obshchestvennom zdorov'e*. Saint Petersburg: Kirov Military Medical Academy; 2018. P. 176–181. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/EXJUER>.
 25. Улюкин ИМ, Емельянов ВН, Болехан ВН, Орлова ЕС. Эмпатия как составляющая диалогового общения в процессе передачи новой информации. *Известия Российской Военно-медицинской академии*. 2017;36(2):23–30. [Ulyukin IM, Emelyanov VN, Bolekhan VN, Orlova ES. Empathy as a composition of dialogical communication in the process of transfer of new information. *Russian Military Medical Academy Reports*. 2017;36(2):23–30. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/XWPSNF>.
 26. Сеидов А, Дурдыев О, Керимов Г, Мухамметбердиева Б. Развитие биотехнологий: чипы и интеграция технологий в человеческое тело. *Символ науки*. 2024;1(11-1):98–99. [Seyidov A, Durdyev O, Kerimov G, Muhammetberdiyeva B. Biotechnology development: chips and integration of technologies into the human body. *Simvol nauki*. 2024;1(11-1):98–99. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/NQABPW>.
 27. Емельянов ВН, Кузин АА, Панин ИС, Кулемин МЭ. Эпидемиологический мониторинг показателей заболеваемости, смертности и достоверность учета герминогенных опухолей яичка. *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2025;27(1):115–124. [Emelyanov VN,

- Kuzin AA, Panin IS, Kulemin ME. Epidemiological monitoring of testicular germ cell tumor incidence, mortality, and registration accuracy. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2025;27(1):115–124. (In Russ.)). DOI: <https://doi.org/10.17816/brmma632060>.
28. Емельянов ВН, Вирко ВА, Огнедьюк АА. Биопленки на изделиях медицинского назначения: механизмы образования и способы профилактики. *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2025;(1):10–15. [Yemelyanov VN, Virko VA, Ognedyuk AA. Biofilms on medical devices: Formation mechanisms and prevention techniques. *Pacific Medical Journal*. 2025;(1):10–15. (In Russ.)). DOI: <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2025-1-10-15>.
 29. Ласточкина ОВ, Горелов ПВ. Биологические микрочипы — новый уровень лабораторных исследований. *Аналитика*. 2017;(5):76–86. [Lastochkina OV, Gorelov PV. Biological microchips — a new level of laboratory research. *Analytics*. 2017;(5):76–86. (In Russ.)). DOI: <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2017.36.5.76.86>.
 30. Морозов АВ, Молодченко АН, Рябчикова АД, Чуркин ИА. ДНК-микрочипы и их применение в медицине и биологии. *Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА»*. 2022;3(2):145–150. [Morozov AV, Molodchenko AN, Ryabchikova AD, Churkin IA. DNK-mikrochipy i ikh primeneniye v meditsine i biologii. *Vestnik Voennogo innovatsionnogo tekhnopolisa “EHRA”*. 2022;3(2):145–150. (In Russ.)). DOI: <https://doi.org/10.56304/S2782375X22020115>.
 31. Валуев-Эллистон ВТ, Грядунов ДА, Иванов АВ, Лейнсоо АТ, Савватеева ЕН, Филиппова МА. Способ выявления антител — иммуноглобулинов класса G в сыворотке крови к возбудителям тяжелых острых респираторных вирусных инфекций, включая SARS-CoV-2, с одновременным прогнозом тяжести протекания коронавирусной инфекции COVID-19, на гидрогелевом биочипе [патент № 2746815 РФ]. 2021. 21 с. [Valuev-Ehlliston VT, Gryadunov DA, Ivanov AV, Leinsoo AT, Savvateeva EN, Filippova MA. *Sposob vyuyavleniya antitel — immunoglobulinov klassa G v syvorotke krovi k vozbuditelyam tyazhelykh ostrykh respiratornykh virusnykh infektsii, vkluyuchaya SARS-CoV-2, s odnovremennym prognozom tyazhesti protekaniya koronavirusnoi infektsii COVID-19, na gidrogelevom biochipe* [patent № 2746815 RF]. 2021. 21 p.]. EDN: <https://www.elibrary.ru/VCVTYB>.

Информация об авторах

Шамиль Факилович Мустафин ✉ — оператор научной роты Главного военно-медицинского управления, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: vmeda-nio@mil.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4139-3045>

Олег Александрович Баваров — оператор научной роты Главного военно-медицинского управления, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: vmeda-nio@mil.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2393-9879>

Information about the authors

Shamil F. Mustafin ✉ — Operator of the Scientific Company of the Main Military Medical Directorate, Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia.

E-mail: vmeda-nio@mil.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4139-3045>

Oleg A. Bavarov — Operator of the Scientific Company of the Main Military Medical Directorate, Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia.

E-mail: vmeda-nio@mil.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2393-9879>