Поступила в редакцию: 23 июля 2026 г.
Принята к публикации: 29 августа 2026 г.
Опубликована online: 30 сентября 2026 г.
УДК: 616-002.5:614.2:620.3
DOI: 10.26212/2227-1937.2026.48.58.012

***Тип статьи**: концептуальная статья*

КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА И ТЕРАПИИ ТУБЕРКУЛЕЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Сатмурзаев С.А., Каушева А.А., Бекишева А.Н., Махнева А.Ф.
Национальный научный центр фтизиопульмонологии МЗ РК,
Алматы, Казахстан

Введение. Лекарственно-устойчивый туберкулез остается одной из наиболее сложных проблем современной фтизиопульмонологии. Развитие нанобиосенсоров, систем адресной доставки лекарственных средств и цифрового мониторинга создает предпосылки для объединения диагностических и терапевтических решений в единую персонализированную платформу.
Цель. Разработать концептуальную архитектуру интегрированной платформы FS 8/1 SSA для диагностики, сопровождения терапии и мониторинга пациентов с туберкулезом, включая множественно лекарственно-устойчивые и широко лекарственно-устойчивые формы.
Материалы и методы. Работа носит концептуальный характер. Архитектура платформы сформирована на основе анализа и синтеза научных данных, приведенных в литературных источниках статьи, по нанобиосенсорам, нанотранспортным системам, наноэнзимам, иммуномодуляции и цифровому мониторингу. Предложена функциональная интеграция трех модулей: диагностического, терапевтического и мониторингового.
Результаты. Сформирована трехмодульная модель FS 8/1 SSA. Диагностический модуль предусматривает регистрацию биологических сигналов, связанных с активностью Mycobacterium tuberculosis, и их визуальную интерпретацию; терапевтический модуль - применение наноэнзимного воздействия, адресной доставки противотуберкулезных препаратов и локальной иммуномодуляции; мониторинговый модуль - динамическое наблюдение и передачу данных для клинической оценки. Для визуализации предложена трехуровневая система сигнального оповещения SSA.
Обсуждение. Научная литература подтверждает перспективность отдельных компонентов предлагаемой платформы, однако их совместная эффективность и безопасность в рамках FS 8/1 SSA экспериментально и клинически не изучались. Концепция требует последовательной валидации биомаркеров и сенсоров, оценки биосовместимости и токсичности наноматериалов, фармакокинетики систем доставки, безопасности иммуномодуляции и надежности цифрового контура.
Заключение. FS 8/1 SSA представляет собой концептуальную модель интеграции нанотехнологий и цифрового мониторинга для персонализированного сопровождения терапии туберкулеза. На данном этапе платформа не является готовой клинической технологией; ее потенциальные преимущества должны быть подтверждены в лабораторных, доклинических и последующих клинических исследованиях.
Ключевые слова. туберкулез, МЛУ-ТБ, ШЛУ-ТБ, нанотехнологии, нанобиосенсоры, наноэнзимы, таргетная доставка, цифровой мониторинг, персонализированная медицина, FS 8/1 SSA.

НАНОТЕХНОЛОГИЯНЫ ҚОЛДАНЫП, ТҮБЕРКУЛЕЗДІ КЕШЕНДІ БАҚЫЛАУ МЕН ЕМДЕУ КОНЦЕПЦИЯСЫ

Сатмурзаев С.А., Каушева А.А., Бекишева А.Н., Махнева А.Ф.
ҚР Денсаулық сақтау министрлігінің Қазақстан Республикасы Ұлттық фтизиатрия ғылыми орталығы,
Алматы, Қазақстан

Кіріспе. Дәріге төзімді туберкулез қазіргі фтизиопульмонологияның күрделі мәселелерінің бірі болып қала береді. Нанобиосенсорлар, дәрілік заттарды нысаналы жеткізу жүйелері және цифрлық мониторингтің дамуы диагностикалық және терапиялық шешімдерді бірыңғай дербестендірілген платформаға біріктіруге мүмкіндік береді.
Мақсаты. Туберкулезбен, оның ішінде көп дәріге төзімді және кең ауқымды дәріге төзімді түрлерімен ауыратын пациенттерді диагностикалау, емді сүйемелдеу және мониторинг жүргізуге арналған FS 8/1 SSA интеграцияланған платформасының тұжырымдамалық архитектурасын әзірлеу.
Материалдар мен әдістер. Жұмыс тұжырымдамалық сипатта. Платформа архитектурасы мақалада келтірілген ғылыми әдебиеттердегі нанобиосенсорлар, нанотасымалдаушы жүйелер, наноферменттер, иммуномодуляция

және цифрлық мониторинг жөніндегі деректерді талдау және жинақтау негізінде құрылды. Диагностикалық, терапиялық және мониторингтік үш функционалдық модульді біріктіру ұсынылды.
Нәтижелер. FS 8/1 SSA үш модульді моделі қалыптастырылды. Диагностикалық модуль Mycobacterium tuberculosis белсенділігімен байланысты биологиялық сигналдарды тіркеуді және оларды визуалды түсіндіруді; терапиялық модуль наноэнзимдік әсерді, туберкулезге қарсы препараттарды нысаналы жеткізуді және жергілікті иммуномодуляцияны; мониторингтік модуль динамикалық бақылау мен клиникалық бағалау үшін деректерді беруді қарастырады. Нәтижелерді көрсету үшін SSA үш деңгейлі сигналдық жүйесі ұсынылды.
Талқылау. Ғылыми әдебиеттер ұсынылған платформаның жекелеген компоненттерінің перспективалылығын көрсетеді, алайда FS 8/1 SSA құрамындағы олардың бірлескен тиімділігі мен қауіпсіздігі эксперименттік және клиникалық тұрғыдан бағаланбаған. Тұжырымдама биомаркерлер мен сенсорларды валидациялауды, наноматериалдардың биоүйлесімділігі мен уыттылығын, жеткізу жүйелерінің фармакокинетикасын, иммуномодуляция қауіпсіздігін және цифрлық контурдың сенімділігін кезең-кезеңімен бағалауды талап етеді.
Қорытынды. FS 8/1 SSA - туберкулез терапиясын дербестендіріп сүйемелдеу үшін нанотехнологиялар мен цифрлық мониторингті біріктіретін тұжырымдамалық модель. Қазіргі кезеңде платформа дайын клиникалық технология болып табылмайды; оның ықтимал артықшылықтары зертханалық, клиникаға дейінгі және кейінгі клиникалық зерттеулерде расталуы тиіс.
Түйінді сөздер: туберкулез, көп дәріге төзімді, кең ауқымды дәріге төзімді, нанотехнологиялар, нанобиосенсорлар, наноферменттер, мақсатты жеткізу, цифрлық мониторинг, жекелендірілген медицина, FS 8/1 SSA.

CONCEPT OF COMPREHENSIVE MONITORING AND THERAPY OF TUBERCULOSIS USING NANOTECHNOLOGY

Satmurzaev S.A., Kausheva A.A., Bekisheva A.N., Makhneva A.F.
National Scientific Center of Phthisiopulmonology of the Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

Introduction. Drug-resistant tuberculosis remains a major challenge in modern phthisiopulmonology. Advances in nanobiosensors, targeted drug-delivery systems, and digital monitoring provide a rationale for integrating diagnostic and therapeutic technologies within a personalized platform.
Objective. To develop the conceptual architecture of the integrated FS 8/1 SSA platform for diagnosis, treatment support, and monitoring of patients with tuberculosis, including multidrug-resistant and extensively drug-resistant forms.
Materials and Methods. This is a conceptual study. The platform architecture was developed through analysis and synthesis of the scientific literature cited in the manuscript on nanobiosensors, nanocarrier systems, nanozymes, immunomodulation, and digital monitoring. Three functional modules - diagnostic, therapeutic, and monitoring - were integrated into a single model.
Results. A three-module FS 8/1 SSA model was formulated. The diagnostic module is designed to register biological signals associated with Mycobacterium tuberculosis activity and provide visual interpretation; the therapeutic module combines nanozyme-mediated effects, targeted delivery of anti-tuberculosis drugs, and local immunomodulation; and the monitoring module provides dynamic observation and data transfer for clinical assessment. A three-level SSA color-alert system is proposed for visualization.
Discussion. Published evidence supports the potential of the individual technologies incorporated into the model; however, their combined efficacy and safety within FS 8/1 SSA have not been experimentally or clinically validated. The concept therefore requires stepwise validation of biomarkers and sensors, assessment of nanomaterial biocompatibility and toxicity, evaluation of drug-delivery pharmacokinetics, immunomodulation safety, and reliability of the digital monitoring pathway.
Conclusion. FS 8/1 SSA is a conceptual model integrating nanotechnology and digital monitoring for personalized tuberculosis treatment support. At present, it should not be regarded as a clinically validated technology; its potential benefits require confirmation in laboratory, preclinical, and subsequent clinical studies.
Keywords: tuberculosis, MDR-TB, XDR-TB, nanotechnologies, nano-biosensors, nanozymes, targeted delivery, digital monitoring, personalized medicine, FS 8/1 SSA.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день актуальность проблемы множественной лекарственной устойчивости туберкулеза (МЛУ-ТБ) и широкой лекарственной устойчивости туберкулеза (ШЛУ-ТБ) остается крайне высокой, являясь одной из главных задач здравоохранения. Микобактерии туберкулеза, благодаря богатой липидами клеточной мембране, могут долго жить внутри альвеолярных макрофагов и труднодоступной некротической ткани в центрах гранулем. Традиционная терапия требует длительного применения высоких доз нескольких препаратов, что нередко вызывает тяжелые побочные эффекты с возможным развитием МЛУ-ТБ и ШЛУ-ТБ. К тому же ряд препаратов являются плохо растворимыми соединениями с ограниченной биодоступностью. МЛУ-ТБ и ШЛУ-ТБ требуют смены препаратов, длительного лечения, затратных с точки зрения финансовых расходов, приводя к ухудшению психоэмоционального статуса пациента [1].

Нанотехнологии в борьбе с туберкулезом открывают новые возможности для преодоления кризиса лекарственной устойчивости и повышают эффективность терапии. В публикациях последних лет отмечено, что применение нанопрепаратов, таких как липосомы, мицеллы, твердые липидные и полимерные наночастицы, обеспечивает адресную доставку препаратов в альвеолярные макрофаги, что повышает их биодоступность, снижает системную токсичность и улучшает приверженность пациентов к лечению [2, 3, 4, 5, 11]. Дополнительно разрабатываются наноэнзимы, искусственные ферменты, разрушающие защитные биопленки микроорганизмов, и иммуномодулирующие препараты, способствующие сокращению сроков выздоровления [6, 12, 13, 14].

Параллельно нанотехнологии внедряются в области диагностики туберкулеза, взамен относительно медленным классическим методам. Высокочувствительные устройства, работающие на принципах преобразования биологических сигналов в оптические, позволяют реализовать концепцию экспресс-диагностики «у постели больного» (Point-of-Care Testing) [7, 8, 9, 10].

Авторская концепция интегрированной интеллектуальной платформы FS 8/1 SSA, предназначена для диагностики, мониторинга и сопровождения терапии туберкулезной инфекции, включая лекарственно-чувствительные, МЛУ-ТБ и ШЛУ-ТБ. Концепция основана на объединении в единый блок нанобиосенсорных технологий, систем таргетной доставки противотуберкулезных препаратов, наноэнзимов, иммуномодулирующих компонентов и цифровых средств мониторинга состояния пациента.

Предлагаемая концепция предусматривает последовательную реализацию нескольких этапов: выявление активности инфекционного процесса, применение наноэнзимов для повышения проницаемости защитных структур микобактерий, адресную доставку лекарственных средств, локальную иммуномодуляцию и последующий мониторинг результатов терапии в режиме, приближенном к реальному времени.

Разработка авторов может служить концептуальной основой для создания перспективных лечебно-диагностических систем нового поколения, ориентированных на персонализированное ведение пациентов с туберкулезом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнена в формате концептуального исследования. Для обоснования архитектуры FS 8/1 SSA использованы научные публикации, включенные авторами в список литературы, посвященные нанотехнологиям в терапии туберкулеза, системам доставки лекарственных средств, строению клеточной стенки Mycobacterium tuberculosis, нанобиосенсорам, наноэнзимам и иммуномодуляции. На основе качественного синтеза этих данных сформирована функциональная модель, включающая диагностический, терапевтический и мониторинговый модули. Систематический поиск литературы и

метаанализ не проводились; экспериментальная и клиническая валидация платформы в рамках данной работы не выполнялась.

ОБЛАСТЬ РАЗРАБОТКИ

Разработка относится к области медицины, фтизиатрии, молекулярной биологии, нанотехнологий, биоинженерии и цифрового здравоохранения. Она может быть использована в качестве основы для разработки новых подходов к ведению пациентов с лекарственно-чувствительными и лекарственно-устойчивыми формами туберкулеза.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАЗРАБОТКИ

В отличие от существующих подходов, ориентированных преимущественно на решение отдельных диагностических либо терапевтических задач, платформа FS 8/1 SSA предусматривает объединение нескольких взаимосвязанных функциональных модулей в рамках единой лечебно-диагностической стратегии. Предлагаемая концепция формирует основу для развития персонализированных подходов к ведению пациентов с лекарственно-чувствительными и лекарственно-устойчивыми формами туберкулеза и может служить моделью для разработки перспективных лечебно-диагностических систем нового поколения.

ОПИСАНИЕ ПЛАТФОРМЫ FS 8/1 SSA

Концепция платформы предполагает непрерывное сопровождение пациента от этапа выявления активности инфекционного процесса до оценки эффективности проводимой терапии и последующей корректировки лечебной тактики.

Основными функциональными направлениями платформы являются:

- биосенсорная идентификация активности *Mycobacterium tuberculosis*;
- обработка и передача диагностических сигналов;
- визуализированный мониторинг результатов;
- таргетная доставка терапевтических агентов;
- наноэнзимное воздействие на защитные структуры микобактерий;
- локальная иммуномодуляция;
- динамический контроль эффективности терапии.

Платформа включает три взаимосвязанных функциональных модуля:

1. Модуль диагностики и идентификации процесса.
2. Модуль таргетной нанотерапии.
3. Модуль мониторинга и коррекции терапии.

Взаимодействие модулей обеспечивает последовательное сопровождение пациента на всех этапах лечебного процесса - от выявления признаков активности инфекционного процесса до оценки эффективности лечения и принятия решений по его дальнейшей коррекции.

ПЕРВЫЙ МОДУЛЬ: ДИАГНОСТИКА И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА

Первый модуль платформы предназначен для выявления признаков активности *Mycobacterium tuberculosis*, регистрации биологических сигналов и передачи полученной информации в систему мониторинга. В основе работы модуля лежит использование нанобиосенсорных технологий, способных регистрировать изменения, связанные с активностью возбудителя туберкулеза. Полученные данные подвергаются обработке и преобразуются в визуально интерпретируемую форму. Интеграция нанобиосенсоров с биочиповыми технологиями, интеллектуальными устройствами и цифровыми средствами передачи данных позволяет реализовать экспресс-мониторинг состояния пациента с последующей визуализацией результатов [7, 8, 9, 10].

Для интерпретации результатов в платформе авторы предлагают предусмотреть трехуровневую сигнальную архитектуру SSA, основанную на принципе цветовой индикации:

Красный уровень - наличие признаков активности инфекционного процесса либо выявление целевого биомаркера.

Желтый уровень - промежуточная стадия терапевтического воздействия, сопровождающаяся изменением

функционального состояния возбудителя и разрушением его защитных структур.

Зеленый уровень - снижение активности или нейтрализация инфекционного процесса.

Предлагаемая система потенциально может:

– упростить интерпретацию диагностической информации;

– повысить оперативность оценки состояния пациента;

– обеспечить непрерывный контроль динамики лечебного процесса;

– упростить представление результатов для последующей клинической оценки.

Полученная информация может передаваться как на персональное устройство пациента (смарт-браслет), так и на мобильное устройство медицинского работника для последующего наблюдения и анализа.

Рисунок 1 - Иллюстрация авторской схемы функционирования первого модуля платформы FS 8/1 SSA

ВТОРОЙ МОДУЛЬ. ТАРГЕТНАЯ НАНОТЕРАПИЯ

Второй модуль платформы FS 8/1 SSA предназначен для повышения эффективности противотуберкулезной терапии посредством применения современных нанотехнологических решений, обеспечивающих адресную доставку лекарственных средств, преодоление защитных барьеров *Mycobacterium tuberculosis* и усиление локального иммунного ответа.

Концепция модуля основана на последовательном использовании нескольких функциональных компонентов, выполняющих взаимодополняющие задачи.

Основными направлениями терапевтического воздействия являются:

– применение наноэнзимов;

– использование таргетных нанотранспортных систем;

– локальная иммуномодуляция;

– доставка противотуберкулезных препаратов непосредственно в очаг инфекционного процесса.

1. Наноэнзимное воздействие.

Одним из факторов устойчивости *Mycobacterium tuberculosis* является сложная многослойная структура клеточной стенки, содержащая большое количество липидов, арабиногалактана и миколовых кислот. Данная структура существенно ограничивает проникновение

лекарственных средств и способствует сохранению жизнеспособности возбудителя внутри макрофагов [12,13].

В рамках платформы FS 8/1 SSA в качестве подготовительного этапа терапии предлагается применение наноэнзимов, обладающих способностью воздействовать на защитные структуры микобактерий.

Предполагается, что использование наноэнзимов позволит:

– повысить проницаемость клеточной стенки микобактерий;

– ослабить барьерные свойства биопленок;

– облегчить проникновение терапевтических агентов в очаг инфекции;

– повысить эффективность последующих этапов терапии.

В качестве потенциальных компонентов могут рассматриваться наноэнзимы на основе оксидов металлов и других материалов, обладающих ферментоподобной активностью [12,13].

2. Таргетная доставка противотуберкулезных препаратов

После этапа наноэнзимной подготовки предусматривается применение нанотранспортных систем, обеспечивающих адресную доставку лекарственных средств непосредственно к клеткам-мишеням.

Эффективность доставки во многом определяется размерами, формой и поверхностными характеристиками наночастиц. Наиболее перспективными считаются наноструктуры размером до 200 нм, способные проникать в клетки посредством рецептор-опосредованного эндоцитоза.

В качестве перспективных транспортных систем рассматриваются: PLGA-PEG наночастицы, представляющие собой биосовместимую полимерную систему типа «ядро–оболочка», в которой лекарственное вещество инкапсулируется внутри полимерного ядра, а внешняя оболочка обеспечивает защиту наночастицы от преждевременного распознавания иммунной системой. Для повышения селективности доставки могут использоваться маннозосодержащие лиганды, обеспечивающие взаимодействие с рецепторами макрофагов.

Дополнительным вариантом доставки являются наноструктурированные липидные носители (NLC), позволяющие транспортировать увеличенное количество лекарственного вещества и обеспечивать его постепенное высвобождение.

Преимуществами NLC являются:

– высокая загрузочная способность;

– стабильность лекарственной формы;

– возможность ингаляционного применения;

– совместимость с различными терапевтическими компонентами.

3. Локальная иммуномодуляция

Следующим этапом является активация механизмов иммунной защиты организма в области инфекционного процесса. В рамках платформы FS 8/1 SSA рассматривается возможность применения иммуномодулирующих компонентов, направленных на усиление активности макрофагов и Т-клеточного иммунного ответа.

Предполагаемыми эффектами иммуномодуляции являются:

– повышение эффективности фагоцитоза;

– усиление антигенной презентации;

– стимуляция локального цитокинового ответа;

– ограничение распространения инфекционного процесса;

– снижение риска персистенции возбудителя.

В качестве потенциальных компонентов могут использоваться интерлейкин-2 (IL-2), интерферон-гамма (IFN-γ), CpG-олигонуклеотиды и другие иммуномодулирующие агенты [14].

Таким образом, терапевтический модуль платформы предусматривает последовательное применение наноэнзимного воздействия, таргетной доставки лекарственных средств и локальной иммуномодуляции, что формирует комплексный подход к сопровождению противотуберкулезной терапии.

ТРЕТИЙ МОДУЛЬ. МОНИТОРИНГ И КОРРЕКЦИЯ ТЕРАПИИ

Третий модуль платформы FS 8/1 SSA предназначен для динамического контроля эффективности проводимой терапии и своевременной корректировки лечебной тактики на основании данных, получаемых в процессе мониторинга состояния пациента.

Концепция модуля как в первом модуле основана на анализе биологических сигналов, регистрируемых нанобиосенсорами, с последующей передачей и визуализацией информации посредством цифровых устройств сопровождения.

В отличие от традиционного подхода, при котором оценка эффективности лечения осуществляется периодически на основании лабораторных и инструментальных исследований, предлагаемый модуль предусматривает возможность наблюдения за динамикой терапевтического процесса после окончания терапии с использованием единой системы мониторинга.

1. Нанобиосенсорный мониторинг

После проведения терапевтического воздействия продолжается регистрация показателей, ассоциированных с активностью *Mycobacterium tuberculosis* и состоянием инфекционного процесса.

Нанобиосенсоры обеспечивают:

– регистрацию биологических сигналов;
– обработку полученной информации;
– передачу данных в систему мониторинга;
– формирование визуального сигнала для пользователя.

Полученные сведения могут использоваться для оценки динамики лечения и определения необходимости дальнейшей коррекции терапевтических мероприятий.

2. Система сигнального оповещения SSA

Для визуальной интерпретации результатов мониторинга в платформе используется трехуровневая система сигнального оповещения SSA.

Система предусматривает цветовую индикацию состояния инфекционного процесса:

– красный уровень - наличие признаков активности инфекционного процесса либо сохранение высокой активности возбудителя.
– желтый уровень - промежуточный этап терапевтического воздействия, сопровождающийся изменением активности возбудителя и динамикой лечебного процесса.
– зеленый уровень - выраженное снижение активности либо нейтрализация инфекционного процесса.

Использование цветовой индикации обеспечивает быстрое восприятие информации как медицинским работником, так и самим пациентом, упрощая контроль динамики лечения и интерпретацию результатов наблюдения.

3. Цифровое сопровождение пациента

Одним из элементов платформы является интеграция системы мониторинга со смарт-устройствами.

Передача информации может осуществляться на:

– смарт-браслет пациента;
– мобильное приложение;
– планшетные устройства;
– рабочее место медицинского работника.

Цифровое сопровождение позволяет обеспечить постоянный доступ к информации о ходе лечения и повысить вовлеченность пациента в процесс терапии.

Дополнительным преимуществом является возможность дистанционного наблюдения за динамикой лечебного процесса и оперативного реагирования на изменения клинической ситуации.

4. Коррекция терапевтической тактики

Результаты мониторинга могут использоваться в качестве информационной основы для принятия решений о дальнейшем ведении пациента.

Полученные данные могут использоваться как дополнительный источник информации для врача. Изменение лечебной тактики должно осуществляться только после клинической и лабораторной оценки в соответствии с действующими рекомендациями; в рамках концепции рассматриваются следующие направления:

– уточнение тактики лечения;
– обсуждение необходимости изменения дозирования лекарственных препаратов;

– оценка необходимости изменения интенсивности терапевтического воздействия;
– оценка необходимости корректировки состава терапевтических компонентов;
– переход к следующему этапу лечения.

Таким образом, мониторинговый модуль выполняет функцию обратной связи между диагностическим и терапевтическим компонентами платформы, обеспечивая непрерывность лечебного процесса.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПЛАТФОРМЫ FS 8/1 SSA

Комплексное взаимодействие функциональных модулей платформы позволяет рассматривать ее как перспективную основу для создания лечебно-диагностических систем нового поколения в области фтизиатрии. К основным преимуществам относятся: возможность непрерывного наблюдения за динамикой инфекционного процесса; применение принципов персонализированного сопровождения пациента; использование технологий таргетной доставки лекарственных средств;

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАЗРАБОТКИ

Практическая значимость платформы FS 8/1 SSA заключается в разработке концептуальной модели, объединяющей современные достижения наномедицины, биоинженерии и цифрового здравоохранения в рамках единой системы сопровождения пациентов с туберкулезом.

Предложенная архитектура может быть использована при разработке новых диагностических платформ для выявления активности *Mycobacterium tuberculosis*; при создании систем адресной доставки противотуберкулезных препаратов; в научно-исследовательских работах, посвященных персонализированной медицине и нанотехнологиям в здравоохранении;

ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемая платформа объединяет технологии, которые в современной литературе в основном рассматриваются раздельно: нанобиосенсорную диагностику, нанотранспорт лекарственных средств, наноэнзимные подходы, иммуномодуляцию и цифровое наблюдение. Потенциальным преимуществом такой архитектуры является возможность связать получение диагностического сигнала, терапевтическое воздействие и последующий мониторинг в единую последовательность. Вместе с тем наличие доказательной базы для отдельных технологий не означает доказанную эффективность их интеграции в одну систему.

Наиболее критичными этапами дальнейшей разработки являются выбор валидированных биомаркеров активности Mycobacterium tuberculosis, определение аналитической чувствительности и специфичности сенсорного модуля, оценка стабильности и биосовместимости наноматериалов, исследование фармакокинетики и тканевого распределения нанотранспортных систем, а также оценка безопасности наноэнзимов и иммуномодулирующих компонентов. Отдельной задачей является защита и клиническая интерпретация цифровых данных.

Трехуровневая цветовая система SSA может рассматриваться только как способ визуального представления валидированного показателя, а не как самостоятельный диагностический критерий. Аналогично данные цифрового мониторинга не должны автоматически определять изменение схемы лечения; клинические решения должны приниматься врачом на основании совокупности клинических, микробиологических и инструментальных данных и действующих рекомендаций.

Ограничением настоящей работы является ее концептуальный характер. Платформа FS 8/1 SSA не проходила лабораторную, доклиническую или клиническую проверку как единая система, а поиск литературы не проводился по протоколу систематического обзора. Поэтому заявленные преимущества следует рассматривать как проверяемые гипотезы. Следующим этапом должна стать

поэтапная экспериментальная валидация отдельных модулей с последующей оценкой их совместимости, безопасности и клинической применимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана концептуальная архитектура интегрированной платформы FS 8/1 SSA, объединяющей диагностический, терапевтический и мониторинговый модули для персонализированного сопровождения пациентов с туберкулезом.

Модель предусматривает сочетание нанобиосенсорных технологий, наноэнзимного воздействия, систем адресной доставки противотуберкулезных препаратов, локальной иммуномодуляции и цифрового мониторинга. Ее отличительной особенностью является не отдельная технология, а функциональная интеграция этих направлений в единую последовательность наблюдения и терапевтического сопровождения.

На данном этапе FS 8/1 SSA является теоретической моделью. До возможного клинического применения необходимы лабораторная и доклиническая валидация компонентов, оценка их совместимости и безопасности, а затем клинические исследования эффективности и практической применимости.

Интеллектуальная собственность: авторы указывают, что патенты на описанную концептуальную модель платформы FS 8/1 SSA на момент подготовки рукописи не оформлены. Правовая охрана отдельных модулей и компонентов может рассматриваться на последующих этапах разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1 Nasiruddin M, Neyaz MK, Das S. Nanotechnology-based approach in tuberculosis treatment. Tuberc Res Treat. 2017;2017:4920209. doi:10.1155/2017/4920209.

2 Griffiths G, Nyström B, Sable SB, Khuller GK. Nanobead-based interventions for the treatment and prevention of tuberculosis. Nat Rev Microbiol. 2010;8(11):827-834. doi:10.1038/nrmicro2437.

3 Sosnik A, Carcaboso AM, Glisoni RJ, Moretton MA, Chiappetta DA. New old challenges in tuberculosis: potentially effective nanotechnologies in drug delivery. Adv Drug Deliv Rev. 2010;62(4-5):547-559. doi:10.1016/j.addr.2009.11.023.

4 Wissing SA, Kayser O, Müller RH. Solid lipid nanoparticles for parenteral drug delivery. Adv Drug Deliv Rev. 2004;56(9):1257-1272. doi:10.1016/j.addr.2003.12.002.

5 Kumar M, Virmani T, Kumar G, Fonte P. Nanocarriers in tuberculosis treatment: challenges and delivery strategies. Pharmaceuticals (Basel). 2023;16(10):1360. doi:10.3390/ph16101360.

6 Abrahams KA, Besra GS. Mycobacterial cell wall biosynthesis: a multifaceted antibiotic target. Parasitology. 2018;145:116-133. doi:10.1017/S0031182016002377.

7 Ma J, Du M, Wang C, Xie X, Wang H, Zhang Q. Advances in airborne microorganisms detection using biosensors: a critical review. Front Environ Sci Eng. 2021;15(3):47. doi:10.1007/s11783-021-1420-8.

8 Gupta S, Kakkar V. Recent technological advancements in tuberculosis diagnostics - a review. Biosens Bioelectron. 2018;115:14-29. doi:10.1016/j.bios.2018.05.017.

9 Yang X, Fan S, Ma Y, Chen H, Xu JF, Pi J, et al. Current progress of functional nanobiosensors for potential tuberculosis diagnosis: the novel way for TB control? Front Bioeng Biotechnol. 2022;10:1036678. doi:10.3389/fbioe.2022.1036678.

10 Li M, Shen C, Lv M, Luo Y. Nanobiosensors enable high-efficiency detection of tuberculosis nucleic acid. JACS Au. 2025;5(2):536-549. doi:10.1021/jacsau.4c01206.

11 Medrano-Bosch M, Moreno-Lanceta A, Melgar-Lesmes P. Nanoparticles to target and treat macrophages: the Ockham's concept? Pharmaceutics. 2021;13(9):1340. doi:10.3390/pharmaceutics13091340.

12 Zhou C, Wang Q, Jiang J, Gao L. Nanozybiotics: nanozyme-based antibacterials against bacterial resistance. Antibiotics (Basel). 2022;11(3):390. doi:10.3390/antibiotics11030390.

13 Mehta D, Singh S. Nanozymes and their biomolecular conjugates as next-generation antibacterial agents: a comprehensive review. Int J Biol Macromol. 2024;278(Pt 1):134582. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.134582.

14 Fatima S, Bhaskar A, Dwivedi VP. Repurposing immunomodulatory drugs to combat tuberculosis. Front Immunol. 2021;12:645485. doi:10.3389/fimmu.2021.645485.

ДЕКЛАРАЦИИ

Вклад авторов. Концептуализация - Сатмурзаев С.А.; подготовка первоначального текста - Бекишева А.Н.; рецензирование и редактирование - Каушева А.А.; поиск и отбор литературных источников - Махнева А.Ф.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Внешнее финансирование при выполнении данной работы не предоставлялось.

Этическое одобрение. Не требуется, поскольку работа носит концептуальный характер и не включает исследования с участием людей, животных или использование индивидуальных медицинских данных.

Информированное согласие. Не применимо.

Доступность данных. В рамках работы новые наборы данных не создавались и не анализировались.

Заявление об оригинальности. Рукопись ранее не публиковалась и, по заявлению авторов, не находится на рассмотрении в другом издании.

ДЕКЛАРАЦИЯЛАР

Авторлардың үлесі. Тұжырымдаманы әзірлеу - Сатмурзаев С.А.; бастапқы мәтінді дайындау - Бекишева А.Н.; рецензиялау және редакциялау - Каушева А.А.; әдеби дереккөздерді іздеу және іріктеу - Махнева А.Ф.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

Қаржыландыру. Осы жұмысты орындау барысында сыртқы қаржыландыру алынған жоқ.

Этикалық мақұлдау. Талап етілмейді, өйткені жұмыс тұжырымдамалық сипатта және адамдардың немесе жануарлардың қатысуымен зерттеулерді, сондай-ақ жеке медициналық деректерді пайдалануды қамтымайды.

Ақпараттандырылған келісім. Қолданылмайды.

Деректердің қолжетімділігі. Жұмыс шеңберінде жаңа деректер жиынтығы жасалмады және талданбады.

Түпнұсқалық туралы мәлімдеме. Авторлардың мәлімдеуінше, қолжазба бұрын жарияланбаған және басқа басылымда қаралып жатқан жоқ.

DECLARATIONS

Author contributions. Conceptualization - Satmurzaev S.A.; writing - original draft - Bekisheva A.N.; writing - review and editing - Kausheva A.A.; literature search and source selection - Makhneva A.F.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Funding. No external funding was received for this work.

Ethics approval. Not applicable because this is a conceptual study and does not involve human participants, animals, or individual-level medical data.

Informed consent. Not applicable.

Data availability. No new datasets were generated or analyzed in this work.

Originality statement. According to the authors, the manuscript has not been published previously and is not under consideration by another journal.

Сведения об авторах:

Сатмурзаев Сапарбек Адасбекович - заведующий патологоанатомическим отделением, Национальный научный центр фтизиопульмонологии, Республика Казахстан, город Алматы, улица Ботакоз 1/1.
Тел: +77015707059,
Email: ssatmurzaev@mail.ru
ORCID 000-0002-8938-9192

Каушева Алмагуль Амангельдиевна – к.м.н., заместитель директора по стратегическому развитию и научной работе, Национальный научный центр фтизиопульмонологии, Республика Казахстан, город Алматы, улица Ботакоз 1/1.
тел: +77750957755,
Email: aleke.astana@gmail.com
ORCID 0000-0002-5341-3189
Бекишева Айгуль Нурпапаевна - к.м.н., врач-патологоанатом, Национальный научный центр фтизиопульмонологии, Республика Казахстан, город Алматы, улица Ботакоз 1/1.
Корреспондирующий автор
тел: +77715013400,
Email: skorpion_72_27@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3595-5574
Махнева Анна Фридриховна – к.м.н., врач-патологоанатом, Национальный научный центр фтизиопульмонологии, Республика Казахстан, город Алматы, улица Ботакоз 1/1.
тел: +77013227777,
Email: dandelionwine@inbox.ru
ORCID 0000-0003-1298-7116

Авторлар туралы мәліметтер:

Сатмурзаев Сапарбек Адасбекұлы - Патологоанатомиялық бөлімінің меңгерушісі, Фтизиопульмонология ұлттық ғылыми орталығы, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Ботакөз көшесі, 1/1.
Тел: +77015707059,
Электрондық пошта: ssatmurzaev@mail.ru
ORCID 0000-0002-8938-9192
Каушева Алмагуль Амангельдиевна – медицина ғылымдарының кандидаты, Стратегиялық даму және ғылыми жұмысы жөніндегі директордың орынбасары, Фтизиопульмонология ұлттық ғылыми орталығы, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Ботакөз көшесі, 1/1.
Тел.: +77750957755,
Электрондық пошта: aleke.astana@gmail.com
ORCID 0000-0002-5341-3189
Бекишева Айгүл Нұрпапаевна – медицина ғылымдарының кандидаты, дәрігер-патологоанатом, Фтизиопульмонология ұлттық ғылыми орталығы, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Хатшы автор
Ботакөз көшесі, 1/1.
Тел: +77715013400,
Электрондық пошта: skorpion_72_27@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3595-5574
Махнева Анна Фридриховна– медицина ғылымдарының кандидаты, дәрігер-патологоанатом, Фтизиопульмонология ұлттық ғылыми орталығы, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Ботакөз көшесі, 1/1.
Тел.: +770132277777,
Электрондық пошта: dandelionwine@inbox.ru
ORCID 0000-0003-1298-7116

Authors' information:
Satmurzaev Saparbek – Head of the Pathology Department, National Scientific Center for Phthisiopulmonology, Republic of Kazakhstan, Almaty, Botakoz Street 1/1.
Tel: +77015707059,
Email: ssatmurzaev@mail.ru
ORCID 0000-0002-8938-9192
Almagul Amangeldievna Kausheva – MD, PhD, Deputy Director for Strategic Development and Research, National Scientific Center for Phthisiopulmonology, Republic of Kazakhstan, Almaty, Botakoz Street 1/1.
Tel.: +77750957755,
Email: aleke.astana@gmail.com
ORCID 0000-0002-5341-3189
Bekisheva Aigul – Candidate of Medical Sciences, pathologist of the Pathology Department, National Scientific Center for Phthisiopulmonology, Republic of Kazakhstan, Almaty, Botakoz Street 1/1.
Corresponding author Tel: +77715013400,
Email: skorpion_72_27@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3595-5574
Makhneva Anna – Candidate of Medical Sciences, pathologist of the Pathology Department, National Scientific Center for Phthisiopulmonology, Republic of Kazakhstan, Almaty, Botakoz Street 1/1.
Tel.: +77013227777,
Email: dandelionwine@inbox.ru
ORCID 0000-0003-1298-7116