



Автоматизированное рабочее место врача-диагноста для работы с медицинскими данными и элементами мультимодальной визуализации

Виталий Петрович Фраленко

Институт программных систем им. А. К. Айламазяна РАН, Вescьково, Россия

Аннотация. В работе исследованы два направления, касающиеся создания автоматизированного рабочего места врача-диагноста: современные электронные системы для работы с пациентами и визуализация мультимодальных данных. Выполнен аналитический обзор, цель которого – выявить актуальные тенденции в этих областях. Первая часть – работы, посвященные заполнению и сопровождению электронных медицинских карт, поддержанию информационного взаимодействия между различными участниками лечебно-диагностического процесса. Вторая часть – исследования на тему автоматизации и поддержки клинических исследований. Особое внимание уделяется решениям для мультимодальной визуализации.

Описана модель универсального драйвера для работы с разнородным оборудованием. Идея в том, чтобы заставить некоторую диагностическую систему обучаться протоколам различных приборов. Предложена концепция рабочего места, позволяющего автоматизировать процессы диагностики, распознавания медицинских записей и визуализации медицинских данных, обеспечить безопасность данных. Концепция основывается на разумном использовании последних достижений в области искусственного интеллекта. Такое рабочее место может существенно повысить эффективность труда врачей-диагностов, снизить число ошибок.

Ключевые слова и фразы: автоматизированное рабочее место, медицинские данные, мультимодальные данные, визуализация, врач-диагност, аналитический обзор, концепция

Благодарности: Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ИПС им. А.К. Айламазяна РАН № 125021302067-9 (срок выполнения: 2025–2027 гг.)

Для цитирования: Фраленко В.П. Автоматизированное рабочее место врача-диагноста для работы с медицинскими данными и элементами мультимодальной визуализации // Программные системы: теория и приложения. 2025. Т. 16. № 4(67). С. 81–117. https://psta.psiras.ru/read/psta2025_4_81-117.pdf

Введение

Опираясь на отечественный и зарубежный опыт, предлагается разработать автоматизированное рабочее место (АРМ) врача-диагноста, которое позволит осуществлять заполнение и сопровождение электронных медицинских карт (ЭМК), поддержание информационного взаимодействия между различными участниками лечебно-диагностического процесса; автоматизацию и поддержку клинических исследований, в том числе на основе средств мультимодальной визуализации.

Разрабатываемое АРМ призвано решить актуальные проблемы отрасли и ориентировано на следующее:

- значительное уменьшение числа рутинных операций по оформлению медицинской документации;
- повышение информативности и качества медицинской документации;
- увеличение времени, уделяемого непосредственно общению с пациентом и оказанию медицинской помощи;
- оперативное выполнение анализа данных исследований с помощью методов мультимодальной визуализации.

Далее представлены актуальные материалы, на основе которых и будут сделаны предложения по тому, как следует организовать АРМ врача-диагноста, какие функции туда нужно заложить. Настоящее исследование опирается на опыт автора при построении медицинских систем различного назначения и на его видение проблем. Рассмотренные публикации точно отражают общие тенденции в этой области. В том числе однозначный вывод – нужно активно использовать современные наработки в области искусственного интеллекта (ИИ).

1. Электронные медицинские карты, поддержание информационного взаимодействия между различными участниками лечебно-диагностического процесса

Электронные медицинские карты позволяют выполнять отслеживание протекания заболевания на протяжении всей жизни пациентов, они содержат не только непосредственно медицинскую информацию о пациентах, но и персональные данные. Задача любой системы медицинского назначения – обеспечение защиты этой информации, хранение и поддержка. Использование ИИ для работы с этими данными способно обеспечить лучшую, чем врачебную, диагностику различных заболеваний. Например, Система Microsoft AI Diagnostic Orchestrator (MAI-DxO) показала 85.5%

точности диагностики сложных медицинских случаев, тогда как группа из 21 опытного врача достигла лишь 20% точности при анализе тех же случаев [1]. Это означает, что ИИ превосходит врачей более чем в четыре раза по точности диагностики наиболее сложных клинических ситуаций. Аналогичные результаты показывает исследование с участием ChatGPT-4, где ИИ достиг 90% точности диагностики, в то время как врачи без использования ИИ показали лишь 74% точности, а врачи с поддержкой ИИ – 76% [2].

Отметим, что врачи-диагносты сталкиваются с множественными проблемами в повседневной работе. Временные ограничения создают серьезное давление: на прием одного пациента отводится от 15 до 22 минут, за которые необходимо провести диагностику, определить диагноз, назначить лечение и заполнить медицинскую документацию¹. При этом до 50% времени приема врача тратится на заполнение медицинской документации, что значительно сокращает время, отводимое непосредственно на пациента, ИИ способен помочь в этом².

Интеграция ИИ-технологий непосредственно в рабочее место врача-диагноста и систему электронных медицинских карт, с которой работает врач, создает синергетический эффект, превосходящий возможности отдельных компонентов, такой подход обеспечивает следующее:

- мгновенный доступ к интеллектуальной аналитике, например, ИИ-системы могут анализировать данные электронной медицинской карты в режиме реального времени, предоставляя врачу наиболее вероятные предварительные диагнозы на основе жалоб пациента, анамнеза и результатов исследований за последнее время, при этом точность таких систем достигает 87.7–95%^{3,4};
- автоматизацию рутинных процессов, например, ИИ способен автоматически заполнять медицинскую документацию на основе голосовых тезисов врача, сокращая время на документооборот до двух минут; системы автоматической расшифровки ЭКГ, анализа медицинских

¹ИИ научился ставить диагнозы на основе синхронизации данных ЭМК и дистанционного мониторинга, 2023.^[URL]

²Искусственный интеллект теперь заполняет медицинские карты пациентов вместо врача, 2024.^[URL]

³Как AI-сервисы помогают терапевтам ставить диагнозы. СберМедИИ, 2024.^[URL]

⁴Цифровой ассистент врача: как ИИ помогает ставить диагнозы. СберМедИИ, 2024.^[URL]

изображений и обработки лабораторных результатов освобождают врача от рутинной работы^{5,6};

- поддержку принятия клинических решений: интегрированные ИИ-системы предоставляют клинические рекомендации в режиме реального времени, анализируют взаимодействие лекарственных препаратов, предупреждают об аллергических реакциях и помогают в выборе оптимальных планов лечения⁷.

Использование систем автоматической классификации и сверки информации может помочь связать информацию, находящуюся в различных формах в том числе в разрозненных подсистемах; системы анализа и предсказания событий могут помочь в предсказании развития болезни, выполнить оценку потребности упреждающей доставки в медучреждение медицинских препаратов [3]. ИИ может позволить повысить точность оценки качества медицинской помощи за счет анализа больших массивов данных и выявления скрытых закономерностей; способствовать сокращению времени ожидания и улучшению доступности медицинской помощи за счет оптимизации процессов в поликлиниках, в том числе – управления очередями и потоками; ИИ-системы способны автоматизировать рутинные задачи, такие как ведение отчетности, организация собраний, внесение данных лабораторных анализов и др. результатов обследований в электронные медицинские карты [4]. Отметим, что перечисленное иногда интегрируется в том или ином виде в современные медицинские информационные системы.

Отметим систему Rosmed.info [5], ориентированную на агрегацию, хранение и анализ данных, полученных при мониторинге здоровья пациентов. Система имеет функционал для общения медицинских специалистов с пациентами. В результате обеспечивается оптимизация терапевтических процедур, сокращение временных затрат на подтверждение диагнозов и повышение качества взаимодействия между лечащими врачами и пациентами, а также между учреждениями государственной и частной медицины.

Программный комплекс Nuance⁸ дает возможность врачам диктовать данные о пациенте непосредственно в систему электронной медицинской документации. Комплекс позволяет автономно расшифровывать устно

⁵Собянин С. С. Точная диагностика и правильное лечение. Как искусственный интеллект заботится о здоровье пациентов, 2023.^{[URL](#)}

⁶Собянин С. С. Цифровое здравоохранение, 2024.^{[URL](#)}

⁷Как электронные медицинские карты улучшают диагностику, 2024.^{[URL](#)}

⁸Artificial intelligence in healthcare, 2025.^{[URL](#)}

сообщаемые врачами результаты лабораторных анализов в режиме реального времени. Аналогично, Suki Assistant⁹ поддерживает создание текстовой части истории болезни, прослушивая разговор врача и пациента во время сбора анамнеза, обследования пациента. Модель Corti¹⁰ использует генеративный ИИ для расшифровки диалогов между врачами и пациентами в режиме реального времени, она позволяет извлекать важные детали из записанных диалогов, включая конкретные симптомы, упомянутые лекарства и др. важные вопросы, упрощает анализ основных моментов беседы врача с пациентом. Используя полученную информацию, Corti предоставляет рекомендации по оптимальному ведению пациентов и дальнейшей лечебно-диагностической тактике. Модель Ellen AI¹¹ опирается на возможности ChatGPT – врачи могут выполнять преобразование письменных инструкций для пациентов в голосовые сообщения. Программный комплекс Kahun¹² предназначен для проверки симптомов различных заболеваний. Kahun оснащен диалоговым чат-ботом, интегрированным с электронной медицинской документацией. Он помогает более точно определить лечебно-диагностическую тактику на основе данных пациента из медицинской карты, другой электронной медицинской документации. Программа Gridspace¹³ автоматизирует работу с пациентами, обрабатывая телефонные звонки, отвечая на их вопросы и выполняя различные административные задачи. Модель Abridge¹⁴ ориентирована на документирование медицинских диалогов, она позволяет получить полную текстовую запись разговора с врачом, чтобы пациент мог просмотреть ее позже. Модель умеет выделять важную информацию из диалога и упрощать сложные медицинские термины до более понятного языка [6].

Voa, инструмент на основе искусственного интеллекта, адаптированный под специфические нужды бразильского здравоохранения [7], преобразует аудиозаписи медицинских консультаций в структурированные клинические документы, сокращая время на документирование. Интегрируя такие технологии, как Whisper (система распознавания речи) и генеративный ИИ для структурирования текста, Voa стремится минимизировать ошибки, связанные с «копированием и вставкой», сократить время, затрачиваемое на создание анамнеза, и улучшить взаимодействие между

⁹Technology — Suki AI, 2025. [URL](#)

¹⁰Corti | AI infrastructure for healthcare developers, 2025. [URL](#)

¹¹Ellen AI, 2025. [URL](#)

¹²Kahun, 2024. [URL](#)

¹³Gridspace Blog | Gridspace Resources, 2022. [URL](#)

¹⁴Transforming Clinical Documentation with Advanced AI | Abridge AI, 2025. [URL](#)

врачом и пациентом. 84% пользователей Voа оценили свой опыт как 4 или 5 по пятибалльной шкале CSAT, при этом отзывы подчеркивали положительное влияние платформы на клинические рабочие процессы и давали предложения по дальнейшим улучшениям.

Медицинская информационная система RuPatient [8] представляет собой компьютерную программу, состоящую из веб-интерфейса пользователя «врач-пациент», который включает алгоритмы распознавания текста медицинской документации и занесения распознанного текста в соответствующие поля системы. В настоящее время RuPatient – прототип веб-сервиса для медицинских учреждений с модулем аналитики на базе ИИ и продвинутым современным интерфейсом. Разработан аналитический модуль печатной медицинской документации с использованием нейросетевых технологий. С его помощью автоматизирован процесс работы врача с документами. Преимущество RuPatient заключается в автоматизации заполнения электронных форм истории болезни на основе предоставленных пациентом медицинских заключений и выписных эпикризов. Внешний вид карточки в системе RuPatient приведен на рисунке 1.

Novel Patient

Назад Сохранить Печать

Новый пациент

Общая информация

ФИО:

Дата рождения:

Серия:

Номер:

Выдан:

Дата выдачи:

Код подразделения:

Место рождения:

Адрес прописки:

Полис:

СНИЛС:

Номер карточки:

Измерения

Рост: см

Вес: кг

Температура: °C

Пульс: уд./мин.

Давление: мм рт.ст.

Дата госпитализации:

Дата выписки:

Диагноз:

Диагноз:

Жалобы:

Жалобы:

Анамнез:

Анамнез:

Состояние:

Состояние:

Назначение:

Назначение:

Рекомендации:

Рекомендации:

Комментарий:

Комментарий:

Консультации специалистов:

Консультации специалистов:

Лабораторно-инструментальные исследования:

Лабораторно-инструментальные исследования:

Рисунок 1. Внешний вид карточки для добавления нового пациента в системе RuPatient

Выделяется отечественное программное обеспечение «Система для

поддержки принятия врачебных решений Webiomed»¹⁵, включающее пакеты для:

- автоматического извлечения первичных данных из электронных медицинских карт и формирования ежедневной управленческой аналитики по самым разнообразным направлениям и показателям;
- детекции и удаления персональных идентификаторов пациентов и медицинских работников в медицинских записях электронных медкарт;
- защищенного обмена обезличенными медицинскими данными между операторами персональных медицинских данных и платформой Webiomed;
- сбора, анализа и использования данных состояния здоровья и процессов оказания медицинской помощи, полученных из обезличенных электронных медицинских карт;
- автоматического извлечения данных из неструктурированных медицинских записей, включая протоколы врачебных осмотров, выписные эпикризы, результаты инструментальных и лабораторных исследований;
- автоматического формирования единого цифрового профиля пациента на основе объединения информации из различных электронных карт подключенных медицинских организаций и эпизодов обращения пациента за медицинской помощью;
- автоматической интерпретации медицинских данных для выявления заболеваний и получения прогнозов возможного ухудшения здоровья пациентов в будущем.

В качестве примера успешного внедрения Webiomed можно привести Кировскую область, где к платформе были подключены все государственные медицинские организации, которые осуществили прием и обработку обезличенных данных всего взрослого населения региона; все без исключения взрослое население и львиная доля детей Кировской области были оценены с помощью ИИ по трем тысячам самых различных признаков, включая данные анамнеза, симптомы заболеваний, объективные данные и результаты инструментального и лабораторного обследования; был успешно внедрен цифровой помощник врача [9].

В исследовании [10] описаны процессы по разработке и внедрению функционального модуля «Электронная медицинская карта» в составе медицинской информационной системы «Медицина», предназначенной для

¹⁵Webiomed. Продукты, 2025.[URL](#)

санаторно-курортных учреждений здравоохранения. Модуль разработан на платформе «1С: Предприятие 8» с использованием комплекса «КИНТ. Управление санаторием» и интеграцией технологии распознавания голоса. Подробно рассматриваются архитектура модуля, алгоритмы распознавания голоса, процесс интеграции модуля в существующую систему. Выделены преимущества использования распознавания голоса для автоматизации ввода данных: значительное сокращение времени заполнения медицинских документов, повышение точности и снижение вероятности ошибок. Обеспечена возможность создания, хранения и распечатки требуемых документов, ускорены процессы заполнения медицинской документации, улучшено качество работы с пациентами за счет интеграции данных в единую информационную базу. Пример форм для регистрации результатов обследования приведен на рисунке 2.

№	Наименование	Дата	Автор
1	06_КТ_позво...	12.10.20...	GBSoft
2	01_Рентген з...	12.10.20...	GBSoft

Рисунок 2. Формы для регистрации результатов обследования в системе «Медицина»

В работе [11] представлена модель ИИ, предсказывающая риск возникновения сердечно-сосудистых, легочных, тромбозмембральных или септических осложнений после плановой, некардиохирургической и неотложной операции. Авторы объединили структурированные и неструктурированные данные электронных медицинских записей из 3.5 миллионов хирургических случаев из 25 медицинских центров США в период с 2009

по 2017 год. Модель нейронной сети предсказывает послеоперационные сопутствующие заболевания до 80 раз быстрее, чем классические модели.

В исследовании [12] выполнена оценка влияния алгоритма на основе ИИ в практике многопрофильной радиологии на увеличение операционной эффективности за счет предсказания и заполнения неиспользуемых больничных ресурсов, что сокращает время ожидания пациентов. Исследование проводилось в течение 31 недели и продемонстрировало сокращение времени ожидания пациентов на 71%, а также 6% увеличение загрузки КТ-и МРТ-аппаратов без увеличения числа рабочих часов операционного персонала. Аналогично, в работе [13] предлагается многоступенчатая структура на основе ИИ для прогнозирования продолжительности пребывания пациентов в стационаре. Разработанное решение ориентировано на поддержку лиц, принимающих решения в медицинских учреждениях, предоставляющих стационарное обслуживание, в принятии более обоснованных оперативных решений, таких как планирование ресурсов и составление расписаний.

В работе [14] представлена система SEMRAchain, интегрирующая управление доступом на основе ролей, управление доступом на основе атрибутов и смарт-контракты. Эта комбинация позволяет реализовать децентрализованное, детализированное и динамичное управление доступом для систем электронных медицинских записей. Используя технологии блокчейн в качестве безопасного распределенного реестра, SEMRAchain предоставляет заинтересованным сторонам надежность, достоверность и неизменность данных. Аналогично, целью исследования [15] является разработка SENFUAIBC – безопасной структуры электронной медицины с использованием искусственного интеллекта и технологий блокчейн. SENFUAIBC состоит из семи компонентов: передовые алгоритмы шифрования, контроль доступа, многофакторная аутентификация, обнаружение угроз на базе ИИ, обмен данными на основе блокчейна, защита конфиденциальности и аудиторский уровень. Комбинация ИИ и блокчейна в предложенной структуре привела к созданию гибридных методов безопасности, которые позволяют защитить записи электронной медицины от несанкционированного доступа. В статье рассматриваются различные способы использования технологии блокчейн в качестве открытой сети для обмена информацией и ее авторизации, что дает возможность создавать надежные модели ИИ для приложений в области электронной медицины.

Авторы исследования [16] разработали систему диагностики, использующую поисковые запросы по ключевым словам к электронным медицинским записям; автоматический анализ DICOM-изображений

эхокардиографии на основе ИИ-методов; анализ биомаркеров образцов плазмы пациентов. Эхокардиографический анализ на основе ИИ-методов обеспечил высокую точность и подробные данные о функции сердца, показывая значительные различия в параметрах, таких как диаметр левого желудочка, фракция выброса и деформация миокарда (среди групп здоровых и больных). Результаты экспериментов показали, что с помощью разработанной системы можно идентифицировать пациентов с сердечной недостаточностью.

2. Подсистема мультимодальной визуализации при диагностике заболеваний

Мультимодальная визуализация – современный способ представления данных, позволяющий получить наиболее полное и точное представление о состоянии исследуемого объекта. Она объединяет различные типы информации – от медицинских изображений (рентгенография, КТ, МРТ, УЗИ) до текстовых записей и результатов лабораторных исследований. Эта технология становится краеугольным камнем современных автоматизированных диагностических систем, обеспечивая более точную и всестороннюю оценку состояния пациентов. Мультимодальный подход является одним из ключевых инструментов в диагностике заболеваний человека. Сочетание анатомической детализации, функциональной оценки и интраоперационной навигации делает мультимодальную визуализацию особенно ценной в урологии, кардиологии и нейрохирургии. Гибрид «анатомия+функция» в урологии минимизирует ненужные биопсии и повышает точность стадирования; в кардиологии он связывает коронарную морфологию с ишемией, рационализируя реваскуляризации; в нейрохирургии позволяет безопаснее удалять опухоли. Всем трем дисциплинам принадлежит ключевая роль в формировании клинических стандартов будущего, где мультислойные данные, ИИ-радиомика и смешанная реальность станут повседневным инструментом.

Отметим, что обработка естественного языка играет критическую роль в мультимодальных ИИ-системах, позволяя им обрабатывать, интерпретировать и генерировать текст в сочетании с другими типами данных. В медицинском контексте методы обработки естественного языка извлекают необходимые данные, в том числе из неструктурированных медицинских документов, речевых записей врачей. В частности, это не только симптомы, но и их характеристики – степень выраженности, локализация, временные характеристики и т.д., кроме этого – данные анамнеза, аллергии и противопоказания и т.д., в то время как модели

обработки изображений анализируют медицинские снимки. Сочетание обеих модальностей улучшает точность диагностики. ЭМК становятся центральным элементом мультимодальных систем, они обеспечивают быстрый доступ к медицинской истории пациента, включая результаты лабораторных исследований, медицинские снимки, рецепты и другую важную информацию. ИИ-агенты уже способны аккумулировать из всего объема данных, хранящихся в электронной карте каждого пациента, ту информацию, которая необходима врачу в каждый конкретный прием¹⁶.

Мультимодальная визуализация представляет собой передовой подход к автоматизации, который революционизирует способы анализа и интерпретации медицинских данных. Врачи-диагносты ежедневно сталкиваются с множественными технологическими утилитами и несовершенной автоматизацией. Они тратят значительное время на работу с различными системами, подбор параметров и комбинирование результатов из разрозненных источников. Основные проблемы:

- различные медицинские подразделения используют отдельные системы архивирования и коммуникации изображений (PACS), что создает затрудняет доступ к данным, в том числе из-за отсутствия стандартизированных форматов и протоколов обмена данными;
- врачи-диагносты должны как ментально, так и физически (с помощью специализированного программного обеспечения) интегрировать различные контрасты между разными изображениями (делать их вклад в итоговое мультимодальное изображение более заметным и выразительным), что становится все более сложным с ростом количества модальностей;
- различия в размерности, цветовом пространстве и архитектурах используемых ИИ-моделей, решения включают, например, специализированные энкодеры и трансформеры для данных разных модальностей¹⁷.

По оценке агентства Research Nester¹⁸, объем рынка мультимодальной визуализации в 2024 году составил 3.42 млрд. долларов США, в 2025 году ориентировочно 3.59 млрд., а к 2037 году превысит 7.57 млрд. Внедрение мультимодальной визуализации повсеместно поддерживается различными

¹⁶ИИ-агент теперь заранее готовит для врачей поликлиник данные медицинской карты под конкретный прием, 2025.^[URL]

¹⁷Schouten D., Nicoletti G., Dille B., Chia C., Vendittelli P., Schuurmans M., Litjens G., Khalili N. Navigating the landscape of multimodal AI in medicine: a scoping review on technical challenges and clinical applications, 2024.^[URL]

¹⁸Размер и доля рынка мультимодальной визуализации | Тенденции роста в 2037 году, 2024.^[URL]

исследовательскими грантами. Развитие соответствующего программного обеспечения позволит улучшить процессы лечения и наблюдения за состоянием пациентов. К проблемам мультимодальной визуализации можно отнести высокую стоимость таких систем, нехватка квалифицированных специалистов, ограниченность правил и положений на местах. Среди лидеров мультимодальной визуализации можно отметить ООО «Медисо», «Инфраредкс», «United Imaging Healthcare Co., Ltd.», General Electric, Siemens Healthcare GmbH, Spectrum Dynamic Medical, Koninklijke Philips N.V., Canon Medical Systems и Topcon.

В основе любой мультимодальной визуализации специфические алгоритмы, осуществляющие совмещение данных разной модальности. Пример такого кода для системы Matlab и данных магнитно-резонансной томографии (МРТ) приведен в [17]. Существуют и целевые библиотеки для обучения масштабных мультимодальных многозадачных нейросетевых моделей, например, TorchMultimodal¹⁹, возможности которой не ограничены только визуализацией. Можно обучить искусственную нейронную сеть, принимающую на вход данные, полученные в разных режимах работы томографа, и текстовые записи врачей, а на выходе будет некий диагноз или программа лечения. Существуют и специализированные пакеты для мультимодальной работы с данными о клетках организма, например, это библиотеки Seurat²⁰, ScanPy²¹ и SquidPy²²; см. демонстрационный код²³ с использованием Seurat [18]. Ведется активное патентование методов совмещения изображений, например, в патенте [19] описан способ физической организации сбора мультимодальных данных, в котором используются специальные маркеры.

В исследовании [20] в связи с ограниченной доступностью гибридных сканеров выполнена оценка возможности получения мультимодальных данных от раздельно стоящих приборов с последующим геометрическим сопоставлением изображений. С помощью трехмодального доклинического томографа «VECTor 6» (MILabs, Нидерланды) были получены данные позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ), однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) и компьютерной томографии (КТ); с помощью томографа «nanoScan® 3T» (Mediso, Венгрия) – МРТ. Сопоставление ПЭТ и МРТ, ОФЭКТ и МРТ-изображений

¹⁹TorchMultimodal. Github, 2025.^{URL}

²⁰Seurat. Github, 2025.^{URL}

²¹ScanPy. Github, 2025.^{URL}

²²SquidPy. Github, 2025.^{URL}

²³Using Seurat with multimodal data^{URL}

проведено в программе InterView FUSION через промежуточную стадию сопоставления с КТ. Получены мультимодальные ПЭТ/КТ-/ МРТ-и ПЭТ/ОФЭКТ/КТ/МРТ-изображения мышей с опухолью. Установлено, что по данным ПЭТ/МРТ можно подтвердить развитие опухоли с размерами $6 \times 4 \times 4$ мм и более. С помощью ПЭТ/ОФЭКТ/КТ/МРТ удалось визуализировать внутренние органы с высоким уровнем накопления радионуклидных трейсеров. На рисунке 3 показано сравнение обычной визуализации и мультимодальной.

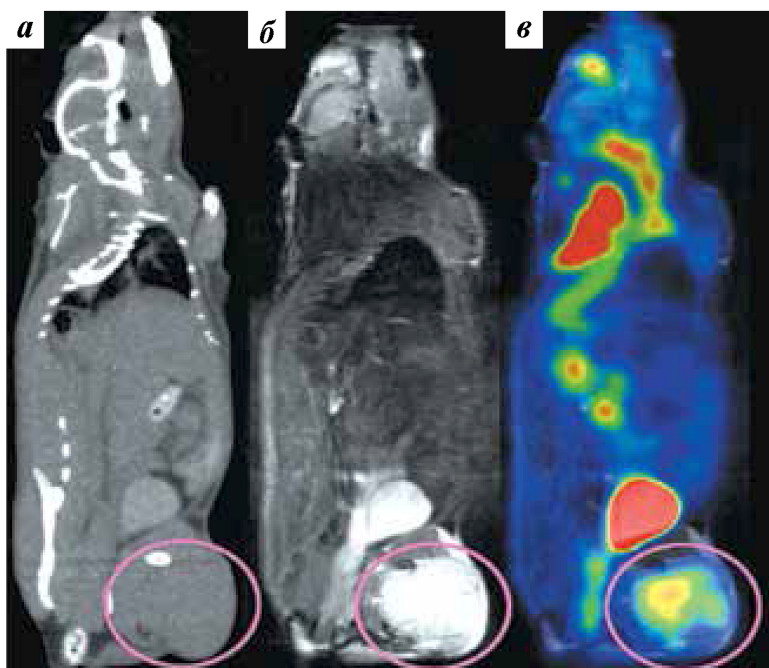


Рисунок 3. Томограммы мыши с модельной меланомой B16F10: а) компьютерная томограмма; б) магнитно-резонансная томография (в режиме inversion recovery fast spin echo); в) совмещенное изображение позитронной эмиссионной томографии / магнитно-резонансной томографии с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой. Овалом выделена опухоль

В диссертационной работе [21] создан уникальный лазерный комплекс, объединяющий четыре источника фемтосекундных импульсов для решения задач двух-и трехфотонной спектроскопии флуоресцентных меток и мультимодальной нелинейно-оптической микроскопии глубоких слоев

биологических тканей в широком спектральном диапазоне (650–1700 нм). Эксперименты по многофотонной визуализации на таких модельных биологических объектах, как нейрональные культуры и культуры клеток HeLa, демонстрируют высокую чувствительность и большой динамический диапазон ратиометрического отклика изучаемых сенсоров в многофотонном формате. В свою очередь глубокая визуализация нейронов в свежевывнутых срезах мозга мыши апробирует метод двух- и трехфотонной микроскопии в применении к изучению окислительно-восстановительных процессов на уровне отдельных клеток in-vivo. Наконец, динамические записи многофотонного ратиометрического сигнала от сенсоров, экспрессирующийся в нейронах коры головного мозга мыши, гепатоцитов печени мыши и нейтрофилах малька рыбы *danio rerio*, дают уникальную информацию о динамиках концентраций основных медиаторов редокс статуса клетки в процессе развития различных патологий.

Приложение Integrated Registration²⁴ позволяет оптимизировать рабочий процесс за счет объединения и отображения изображений, полученных любыми двумя из пяти основных методов визуализации (КТ, МРТ, ПЭТ, ОФЭКТ и рентгеновская ангиография). Оно позволяет совмещать и регистрировать два объемных изображения, полученных от одной или разных систем. С помощью программы можно быстро сравнить трехмерные изображения анатомических структур, полученные методом КТ, МРТ с ПЭТ, ОФЭКТ и рентгеновской ангиографии, для целей более комплексного анализа. Приложение Volume Viewer²⁵ позволяет визуализировать и интерпретировать данные визуализации разных модальностей; реализован широкий спектр высокоэффективных аналитических инструментов, автоматизирующих рутинные задачи и существенно облегчающих обработку трехмерных изображений, в том числе инструменты сегментирования AutoSelect, обеспечивающие сегментацию одним щелчком мыши по исследуемым структурам, инструменты для мультимодального оконтуривания.

Приложение MMVT²⁶ позволяет осуществлять визуализацию и анализ данных из нескольких модальностей. MMVT построен как два отдельных модуля. Первый реализован в виде дополнения к Blender – открытому программному обеспечению для 3D-визуализации, это дополнение представляет собой интерактивный графический интерфейс, который позволяет визуализировать функциональные и статистические данные (MEG, fMRI).

²⁴Integrated Registration, 2025. [URL](#)

²⁵Volume Viewer, 2025. [URL](#)

²⁶Multi-Modality Visualization Tool (MMVT). Github, 2022. [URL](#)

Второй модуль является автономным программным обеспечением для импорта и предобработки данных. Примеры использования доступны на сайте проекта²⁷.

Рассеянный склероз — заболевание мозга, которое широко диагностируется и мониторится с помощью МРТ-сканирования. В исследовании [22] предложено решение, которое поддерживает анализ с использованием нескольких методов визуализации. В качестве примера для расширения аналитических возможностей продемонстрированы преимущества проекции поражений с использованием как диффузионно-тензорной томографии, так и градиентных методов. Такой подход позволяет пользователям оценивать структуры мозга пациента, анализ с использованием атласа предоставляет 3D-привязку и маркировку областей в серии мозговых сканирований. Проекция на поверхность мозга позволяет исследователям проводить детальные исследования взаимоотношений между когнитивными нарушениями и расположением поражений. Это дает возможность связывать поражения с областями Бродмана и связанными с ними функциями мозга. В целом, основная цель инструмента — получить детальное понимание заболевания, поддерживая принятие решений, связанных с выбором медикаментов. Оценка медицинских экспертов из различных областей, связанных с нейровизуализацией, показывает, что разработанное приложение имеет потенциал как для исследований, так и для клинического применения.

В работе [23] исследуются эффекты оптического просветления кожи лабораторных животных *ex vivo* и *in vivo* с помощью низкомолекулярных парамагнитных магнитно-резонансных контрастных агентов, используемых в МРТ, и рентгеноконтрастного агента, используемого в КТ, для повышения глубины зондирования и контраста изображения в методах флуоресцентной лазерной визуализации и оптической когерентной томографии. Обнаружено, что контрастные МРТ-агенты на основе гадолиния способствуют не только увеличению контраста МРТ-изображений тканей и органов, но также эффективно уменьшают рассеяние оптического излучения биологическими тканями, что приводит к увеличению контраста и глубины зондирования оптических методов и, в конечном итоге, открывает перспективность использования мультимодальной диагностики с единым агентом. Кроме того, такие агенты способны усиливать интенсивность флуоресценции молекулярных маркеров, экспрессируемых в опухолях *in vivo*.

В исследовании [24] предлагается новая высокоскоростная мультимодальная оптическая микроскопическая система, которая одновременно

²⁷MMVT — Multi-Modality Visualization Tool | Gallery, 2025, 

визуализирует пять различных микроскопических контрастов, а именно: двухфотонное возбуждение, генерацию второй гармоники, обратный рассеянный свет, ближнюю инфракрасную флуоресценцию и срок жизни флуоресценции, используя один фемтосекундный импульсный лазер. Предложенная система может визуализировать пять модальных изображений с частотой 3.7 кадра в секунду, предоставляя тем самым дополнительные оптические данные, которые усиливают как структурные, так и функциональные контрасты. Предложенная система позволяет оценивать различные свойства биологических тканей.

В работе [25] предложен интегрированный диффузионный метод для комбинирования мультимодальных данных, собранных с помощью различных сенсоров. Поскольку реальные данные страдают как от локального, так и от глобального шума, авторы добавили механизмы для оптимального расчета оператора диффузии, который отражает объединенную информацию в данных, сохраняя при этом низкочастотные собственные векторы каждой модальности как глобально, так и локально. Продемонстрирована полезность этого интегрированного оператора в задачах удаления зашумлений и визуализации мультимодальных данных.

В исследовании [26] решается задача автоматической диагностики и прогнозирования болезни Альцгеймера с помощью методов машинного обучения. Представлен механизм визуализации с цветовым кодированием, основанный на интегрированной модели машинного обучения для прогнозирования траектории заболевания в рамках двухлетнего лонгитюдного исследования. Основная цель этого исследования – помочь визуально запечатлеть диагноз и прогноз болезни в 2D-и 3D-изображениях. Новая сверточная нейронная сеть принимает базовые измерения на вход для генерации полноцветного изображения, отражающего прогресс заболевания в разные моменты времени. Мультимодальные входные данные включают нейровизуализационные данные (MPT, PET), результаты невропсихологических тестов (исключая MMSE, CDR-SB и ADAS, чтобы избежать искажения данных), биомаркеры спинномозговой жидкости с измерениями бета-амилоида, фосфорилированного тау-белка, общего тау-белка, а также факторы риска, включающие возраст, пол, количество лет обучения и ген ApoE4. Полученный подход позволяет визуализировать множество нюансов, ведущих к конкретной классификации или прогнозу в траектории заболевания. Нейронная сеть может использоваться как модель многоклассовой классификации и предсказания, усиливая возможности диагностики и прогнозирования.

В исследовании [27] представлен мультимодальный процесс, который позволяет моделировать молекулярные концентрации с учетом гетерогенности тканей. Он позволяет визуализировать данные в более высоком разрешении и в 3D, основывается на распределительных коэффициентах, оцененных в клинических исследованиях. Такое комплексное мультимодальное визуализирование позволяет лучше понять подлежащие физиологические процессы, улучшить распознавание степени глиом и повысить качество планирования лечения, предоставляя более полную картину состояния пациента.

В статье [28] представили MAIDR – многомодальную систему, разработанную для обеспечения доступности статистических визуализаций для слепых людей. Исследование с участием 11 слепых участников показало, что MAIDR не только облегчает точную интерпретацию различных статистических графиков, но и позволяет пользователям применять разнообразные стратегии для комбинирования нескольких модальностей. Результаты подтверждают потенциал использования обновляемых брайль-экранов в области доступных визуализаций данных, что позволяет выйти за пределы существующих веб-технологий, преимущественно основанных на тексте и звуке. Программные коды доступны на страничке проекта²⁸.

Визуальный анализ высокоразмерных транскриптомных, протеомных, геномных и имиджевых данных одновременно остается сложной задачей. В работе [29] представлен Vitessce – интерактивный веб-сервис для визуализации, предназначенный для исследования мультимодальных и пространственно разрешенных данных на уровне отдельных клеток. Продемонстрирована интегративная визуализация миллионов точек с данными, включая аннотации типов клеток, экспрессии генов, пространственно разрешенные транскрипты и данные сегментации. Программное обеспечение с открытым исходным кодом доступно на сайте проекта²⁹.

3. Предложения по созданию нового автоматизированного рабочего места врача-диагноста

3.1. Модель универсального драйвера

Программно-инструментальные комплексы обработки и визуализации изображений медицины предназначены, в том числе, для решения задач автоматизированного контроля с целью поиска новообразований, дефектов

²⁸[maidr: Multimodal Access and Interactive Data Representation. Github, 2025.](#)^[URL]

²⁹[Vitessce, 2025.](#)^[URL]

и поддержки принятия решений. Такие комплексы обычно узко специализированы и обеспечивают работу лишь с одним видом данных, например, с рентгеновскими, ультразвуковыми снимками, данными магнитной томографии и пр. Интегрированный комплекс – более предпочтительный вариант, имеющий в основе набор унифицированных функций, среди которых в первую очередь следует отметить следующие: получение изображения из различных источников, хранение и предобработка данных. АРМ врача-диагноста, оснащенное такими средствами, имеет существенные преимущества.

Медицинские изображения, получаемые при рентгеновской, ультразвуковой и др. видах диагностики, различны по виду заложенной в них информации, определяемой, прежде всего, способом взаимодействия используемого вида излучения с органами и тканями. Сканирование поверхности тела человека зачастую происходит пучком рентгеновских лучей, ультразвуковых эхо-сигналов, другими способами. Полученные данные далее используются для получения изображения на устройстве визуализации с целью обнаружения скрытых объектов: опухолей, трещин в костях и т.д.

Прибор, замерив данные, посылает их в соответствующую часть диагностической системы, которая должна своевременно их обработать и предоставить потребителю. Для этого необходимо знать протокол передачи, используемый данным прибором. Надо также отметить, что различные приборы используют различные протоколы передачи, это означает, что для этих приборов должны быть написаны различные программы-обработчики. Обычно обработчик поставляется сам производитель прибора, однако часто бывает, что производитель не комплектует прибор такой программой, а лишь оставляет возможность подключения своего прибора к некоторой диагностической системе. В этом случае программу-обработчик приходится писать самим сотрудникам. Написание такого обработчика является очень трудоемким. Конечно, при наличии открытых исходных кодов можно произвести оптимизацию самой программы-обработчика, а именно выделить из нее ту часть, которая работает непосредственно с прибором, и встроить ее в отдельный динамически подключаемый модуль. Такой модуль способен понимать и разбирать входные данные, преобразовывая их к некому промежуточному формату – внутреннему представлению данных. Затем программа производит обработку данных и преобразование данных из промежуточного формата в какой-либо другой, требующийся в конкретном случае. Таким образом, обработчик является универсальным и при подключении нового прибора достаточно лишь заменить модуль, работающий непосредственно с протоколом прибора.

Один из самых простейших способов сделать универсальный драйвер заключается в снабжении самого драйвера некими инструкциями, описывающими протокол прибора. Эти инструкции разрабатывают программисты совместно с разработчиками аппаратуры и, при необходимости, врачи-исследователи. Такие инструкции могут храниться в отдельном файле, из которого драйвер может их подгрузить и начать обработку данных согласно полученным инструкциям. Наличие таких инструкций само по себе подразумевает и наличие специального языка, на котором будут эти инструкции изложены. Разумеется, при этом сложность этого языка не должна превышать сложности языка программирования, который может быть использован для написания обычного драйвера. В противном случае использование такого универсального драйвера становится сравнимым с написанием обычного драйвера, т.е. будет настолько же сложным. С другой стороны, простота языка инструкций накладывает ограничения на возможности универсального драйвера. Таким образом, построение подобного универсального драйвера будет заключаться в оптимизации языка инструкций, а именно такой язык инструкций должен содержать все необходимые компоненты для возможности описать любой протокол прибора (не должен быть излишне простым) и не должен содержать никаких лишних инструкций (не должен быть излишне сложным).

Другой способ универсализации заключается в том, чтобы заставить саму диагностическую систему обучаться протоколу прибора. Для этого в нее добавляют специальное программное обеспечение, способное автоматически моделировать необходимое преобразование по начальному и конечному виду преобразуемых данных. Затем в процессе обучения выполняется поиск скрытых зависимостей между первоначальными данными и конечным результатом (преобразованными данными). Данный принцип может быть реализован искусственной нейронной сетью (ИНС), которая является универсальным механизмом преобразования вида $A \rightarrow B$. В нашем случае множество A будет совпадать со множеством входных данных, а B будет являться множеством уже преобразованных данных. Процесс поиска необходимой модели преобразования называют обучением ИНС. Тогда построение универсального драйвера будет заключаться в построении ИНС, способной обучиться всем видам преобразований. Современные генеративные нейронные сети успешно справляются с такими задачами.

Ввиду того, что данное предложение – лишь концепция и первый шаг к экспериментам, предлагается сначала проверить его на данных, передаваемых по протоколу DICOM (наиболее часто используемому для

медицинских изображений), в том числе по той причине, что современные искусственные сети доказали свою эффективность при работе с такими данными.

3.2. Общая концепция АРМ врача-диагноста

Предлагается разработать автоматизированное рабочее место врача-диагноста, опираясь на раннее исследование [30] автора настоящей работы, и с учетом современных направлений развития медицинских технологий в области обработки и визуализации мультимодальных данных, в том числе следует опираться на следующие принципы:

- стандартизации форматов представления данных (в том числе стандарта DICOM) и создание библиотек методов их обработки;
- универсализации драйверов различных приборов и устройств в том числе с задействованием идеи универсального драйвера;
- интеллектуализации автоматизированной и автоматической обработки слабоструктурированных данных;
- визуализации, в том числе мультимодальной, многомерной и разнородной информации;
- поддержки принятия решений пользователя АРМ;
- модульности и наращиваемости программного обеспечения;
- параллельной обработки на многопроцессорных вычислительных системах и графических процессорах.

Новизна предлагаемого решения заключается в комплексной интеграции всех компонентов медицинского рабочего места врача-диагноста в единую интеллектуальную экосистему. В отличие от существующих фрагментарных решений, интегрированный подход обеспечивает следующее:

- непрерывный цикл обучения: ИИ-система постоянно обучается на новых данных из ЭМК, совершенствуя точность диагностики и качество рекомендаций;
- персонализированный подход: интеграция ИИ с ЭМК позволяет создавать индивидуальные диагностические процедуры, учитывающие в том числе генетические данные, анамнез пациента, опыт других врачей-диагностов;
- мультимодальный анализ: одновременный анализ текстовых данных ЭМК, медицинских изображений и результатов лабораторных исследований.

3.3. Функции для внедрения

Опираясь, на выполненный аналитический обзор, можно отметить следующие функции, которые потенциально следует заложить в новое автоматизированное рабочее место врача-диагноста:

- возможность диктовать данные о пациенте непосредственно в систему электронной медицинской документации, в том числе средства автономной расшифровки речи врача в процессе исследования им органов пациента с помощью компьютерной томографии, ультразвука, магнитно-резонансной томографии и пр.; средства для извлечения важных деталей из записанных диалогов, включая конкретные симптомы, упомянутые лекарства;
- средства совмещения и визуализации мультимодальных данных, инструменты для автоматического выделения областей интереса; специальные нейронные сети, принимающие на вход данные, полученные в разных режимах работы оборудования, данные от различных приборов, данные из ЭМК, в том числе текстовые записи врачей, на выходе – некий диагноз;
- средства интеграции с современными медицинскими системами на блокчейн-основе (см. работы [14, 15]), которые обеспечат возможности децентрализованной обработки электронных медицинских записей с защитой от подмены информации, в первую очередь – для защиты от попыток медицинского персонала скрыть собственные ошибки путем исправления ранее сделанных записей.

3.4. Функциональное наполнение уровней АРМ, цикл диагностического процесса

Предлагаемая архитектура АРМ врача-диагноста представляет собой интегрированную многоуровневую систему (см. рисунок 4), включающую следующие ключевые компоненты:

(1) Уровень пользовательского интерфейса:

- мультимодальная панель визуализации;
- голосовой интерфейс для диктовки и речевого управления;
- сенсорные панели для интерактивного взаимодействия с медицинскими изображениями и данными.

(2) Уровень обработки данных:

- модуль автоматического распознавания и транскрипции речи;
- ИИ-движок для анализа неструктурированных медицинских данных;
- система обработки естественного языка для извлечения клинической информации;

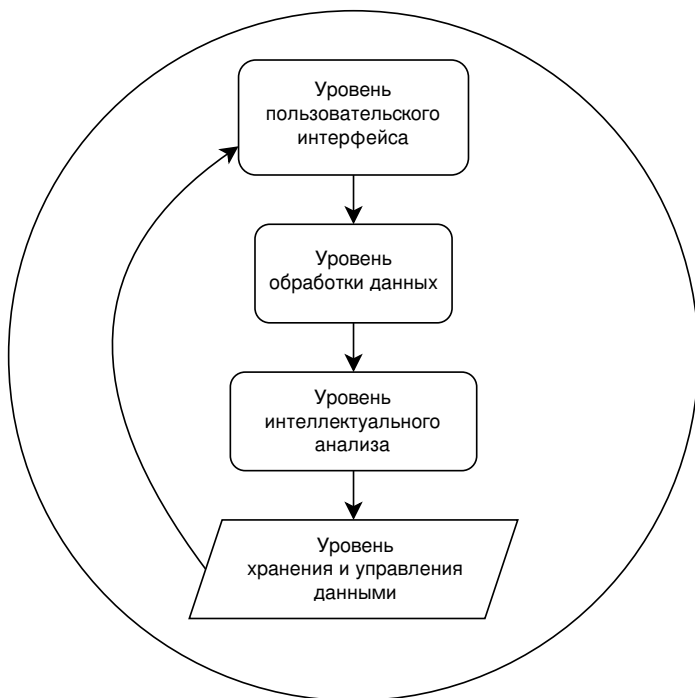


Рисунок 4. Функциональное наполнение уровней АРМ

- мультимодальные трансформеры для интеграции текстовых и визуальных данных;
- универсальный драйвер с поддержкой DICOM-данных.

(3) Уровень интеллектуального анализа:

- диагностический оркестратор (средство управления рабочими процессами) на базе множественных ИИ-агентов;
- модуль машинного обучения для поддержки различных ИИ-алгоритмов;
- система поддержки принятия решений с учетом клинических рекомендаций;
- модуль прогнозирования развития заболеваний.

(4) Уровень хранения и управления данными:

- интегрированная система для работы с ЭМК с блокчейн-защитой от подмены данных;
- PACS-интеграция для работы с медицинскими данными;
- модуль синхронизации с ЕГИСЗ и федеральными системами;
- система контроля версий и аудита медицинских записей.

Цикл диагностического процесса можно описать следующими шагами:

- сбор данных – автоматическое получение информации от медицинских устройств, голосовой диктовки врача и импорта данных из различных источников;
- предобработка – ИИ-система структурирует разнородные данные, применяет фильтрацию шумов и нормализацию;
- мультимодальный анализ – одновременная обработка текстовых записей, медицинских изображений и лабораторных данных;
- интеллектуальная диагностика – генерация дифференциального диагноза с указанием вероятности каждого варианта;
- верификация и валидация – сопоставление с клиническими протоколами и предыдущим опытом;
- представление результатов – визуализация выводов в удобном для врача формате.

3.5. Об интеграции искусственного интеллекта в лабораторную медицину, современное видение перспектив организации клинических данных, связь с предлагаемым АРМ

Современное развитие медицинских технологий характеризуется конвергенцией искусственного интеллекта, автоматизации лабораторных процессов и мультимодальной визуализации медицинских данных. Научные исследования последних лет убедительно демонстрируют, что применение передовых моделей искусственного интеллекта в клинических лабораториях является неизбежным этапом развития лабораторной медицины, поскольку в будущем диагностические и прогностические панели для конкретных заболеваний будут создаваться на основе больших объемов лабораторных данных. Рассмотрим эти работы более подробно.

Исследование [31] подчеркивает фундаментальную трансформацию лабораторной медицины: благодаря машинному обучению становится возможным анализировать большие объемы как структурированных числовых данных, так и неструктурированных оцифрованных изображений в области гематологии, цитологии и гистопатологии. Предлагаемая система мультимодального анализа (в составе АРМ врача-диагноста) позволяет одновременно обрабатывать текстовые записи ЭМК, медицинские изображения и лабораторные данные, что соответствует выявленной потребности в интеграции разнородных типов данных. Развитие так называемых ИИ-агентов становится центральным элементом специализированных ИИ-сервисов [32]. Эти агенты специально обучены для выполнения конкретных задач и способны интегрироваться с системами

электронных медицинских карт, лабораторными информационными системами или любыми другими медицинскими приложениями. Диагностический оркестратор на базе множественных ИИ-агентов в предлагаемой архитектуре АРМ прямо отвечает этим требованиям, обеспечивая генерацию дифференциального диагноза с указанием вероятности каждого варианта. Машинное обучение и глубокое обучение выполняют важные функции в преаналитической, аналитической и постаналитической фазах тестирования в клинической лаборатории. В преаналитической фазе ИИ обеспечивает сокращение ошибок путем автоматизации рутинных задач и мониторинга в реальном времени, повышение эффективности и скорости процессов, оптимизированное использование ресурсов. Предлагаемое АРМ включает модуль автоматического распознавания и транскрипции речи, ИИ-движок для анализа неструктурированных медицинских данных и систему обработки естественного языка для извлечения клинической информации, что полностью соответствует выявленным потребностям автоматизации преаналитического этапа. В аналитической фазе ИИ-усиленная диагностика быстро и точно анализирует большие объемы сложных лабораторных данных, выявляя закономерности и аномалии, которые могут быть упущены при ручном анализе. Алгоритмы машинного и глубокого обучения превосходно распознают паттерны в данных, что может указывать на изменения в состоянии здоровья пациента. АРМ включает модуль машинного обучения для поддержки различных ИИ-алгоритмов и систему поддержки принятия решений с учетом клинических рекомендаций, которые напрямую реализуют эти возможности. Мультимодальные трансформеры для интеграции текстовых и визуальных данных соответствуют потребности в обработке разнородной информации. Отметим также, что проблема эффективного использования ИИ связана с отсутствием стандартизации, сомнительным качеством вводимых данных и их интерпретируемостью, потенциальной чрезмерной зависимостью от технологий, новыми финансовыми инвестициями, проблемами конфиденциальности, этическими и правовыми аспектами. Интегрированная в АРМ система для работы с ЭМК с блокчейн-защитой от подмены данных обеспечивает необходимый уровень безопасности и подотчетности.

Исследование [33] выявляет критические вызовы интеграции данных для машинного обучения в прецизионной медицине. Исследование показывает необходимость интеграции разнородных источников данных, включая лабораторные результаты, визуализацию, геномику, текущие симптомы, лекарственные средства и, что наиболее важно, клиническую историю и представление индивидуального пациента. Биомедицинские и клинические данные характеризуются широким разнообразием размеров,

форм и форматов; они часто сложны, гетерогенны, плохо аннотированы и неструктурированы. Дальнейшая интеграция передового ИИ будет постепенно происходить на основе знаний специалистов лабораторной и клинической медицины, экспертов по информационным технологиям и биостатистике, а также на основе доказательной лабораторной медицины. В предлагаемом АРМ принципы стандартизации форматов представления данных (включая стандарт DICOM) и создание библиотек методов их обработки прямо адресуют эти проблемы. Предлагаемый универсальный драйвер с поддержкой DICOM-данных и PACS-интеграция для работы с медицинскими данными обеспечивают соответствие международным стандартам медицинской визуализации. Другой проблемой является так называемое «проклятие размерности» – ситуация, при которой количество переменных или признаков намного превышает количество экспериментальных образцов, что вызывает очень быстрый рост сложности моделей ИИ и машинного обучения (МО). В АРМ предлагается использовать параллельную обработку на многопроцессорных вычислительных системах и графических процессорах, что позволяет эффективно работать с высоко-размерными данными. Разнообразие и неоднородность данных также создают проблемы для реализации моделирования ИИ/МО в прецизионной медицине. Неоднородность возникает из-за существенно разных типов переменных в различных наборах данных, несовпадающих распределений или масштабирования, различных модальностей данных и форматов. Интеграция в предлагаемой системе: универсальный драйвер с поддержкой DICOM-данных и мультимодальная панель визуализации обеспечивают унифицированную обработку разнородных типов данных.

Исследование [34] представляет концепцию интеграции искусственного интеллекта, автоматизации и человеческой экспертизы в контексте так называемой «Индустрии 5.0». В отличие от «Индустрии 4.0», которая фокусировалась на автоматизации, «Индустрия 5.0» создает симбиотические отношения между человеком и машинами, направленные на создание более сбалансированной и устойчивой промышленной экосистемы. Предлагаемая в составе АРМ система голосового интерфейса для диктовки и речевого управления, а также сенсорные панели для интерактивного взаимодействия с медицинскими изображениями, воплощают именно эти принципы человеко-машинного взаимодействия. Мультимодальная панель визуализации и средства совмещения и визуализации мультимодальных данных, включая инструменты для автоматического выделения областей интереса, прямо соответствуют этим современным требованиям. АРМ не заменяет врача, а расширяет его возможности. Возвращаясь к исследованию [31], в нем представлен структурированный план внедрения ИИ, включающий оценку

потребностей и целей, подготовку и управление данными (обеспечение высококачественных, комплексных наборов данных для обучения или интеграции моделей ИИ), образование и обучение персонала, развертывание и непрерывный мониторинг. В составе предлагаемого АРМ – система контроля версий и аудита медицинских записей, модуль синхронизации с ЕГИСЗ и федеральными системами, что обеспечивает необходимую инфраструктуру для такого поэтапного внедрения.

Большинство руководителей диагностических лабораторий рассматривают цифровую патологию и ИИ как ключевые для развития прецизионной медицины. 59% респондентов считают, что цифровая патология и ИИ окажут высокое или чрезвычайно большое влияние на реализацию прецизионной медицины³⁰. Согласно работе [35], ограниченная гибкость ИИ в интерпретации лабораторных данных остается основной проблемой, поскольку в отличие от человеческого познания, использующего интуитивное суждение, ИИ-системы в настоящее время лишены адаптивной способности интерпретировать данные с эквивалентным контекстуальным пониманием. В качестве другого примера рассмотрим исследование [36], в котором предполагается трехэтапный подход к интеграции, гармонизации и совместному использованию структурированных, неструктурированных и омиксных данных, а также изображений из клинических и исследовательских сред. Сначала данные импортируются и технически гармонизируются с использованием общих стандартов данных и интерфейсов, включая различные профили IHE, DICOM и HL7 FHIR. Затем данные предварительно обрабатываются, трансформируются, гармонизируются и обогащаются в промежуточной рабочей среде. Наконец, данные импортируются в общие аналитические платформы и модели данных и становятся доступными в форме, совместимой с требованиями интероперабельности, определенными на национальном уровне. Предлагаемая в АРМ новизна комплексной интеграции всех компонентов медицинского рабочего места врача-диагноста в единую интеллектуальную экосистему обеспечивает непрерывный цикл обучения, при котором ИИ-система постоянно обучается на новых данных из ЭМК, совершенствуя точность диагностики и качество рекомендаций. Интеграция ИИ с ЭМК позволяет создавать индивидуальные диагностические процедуры, учитывающие генетические данные, анамнез пациента и опыт других врачей-диагностов, что частично компенсирует текущие ограничения систем ИИ.

³⁰ *Majority of Diagnostic Laboratory Leaders Bet Big on Digital Pathology and AI, 2025.* 

Обобщая, приведенные сведения свидетельствуют о том, что АРМ соответствует современным тенденциям и направлениям развития ИИ-систем.

3.6. Анализ концепции и потенциальные риски, конкурентные преимущества предлагаемого АРМ

Можно выделить следующие преимущества предлагаемого решения:

- одновременная обработка текстовых данных, медицинских изображений и результатов исследований в едином контексте;
- использование нейросетей для автоматического обучения протоколам различных медицинских устройств;
- ИИ-система постоянно совершенствуется на основе новых клинических данных;
- сокращение времени документооборота;
- повышение точности диагностики благодаря анализу больших объемов данных и выявлению скрытых закономерностей.

Критические риски и ограничения:

- различия в архитектурах ИИ-моделей и стандартах данных могут затруднить интеграцию;
- недостаток качественных размеченных данных может снизить точность алгоритмов;
- ИИ-системы могут наследовать и усиливать существующие предрассудки в медицинских данных;
- при возникновении ошибок сложно определить ответственность между врачом и ИИ-системой;
- обработка персональных медицинских данных требует строгого соблюдения ФЗ-152 и международных стандартов;
- врачи могут проявлять недоверие к ИИ-рекомендациям и предпочитать традиционные методы работы;
- требуются значительные инвестиции в оборудование, обучение персонала и техническую поддержку.

Среди конкурирующих решений можно выделить а) «MONAI Multimodal» – открытая платформа Nvidia для медицинского ИИ с поддержкой агентных архитектур³¹; б) MAIA Platform – исследовательская платформа

³¹Zephyr M., Zarrouk M. *MONAI Integrates Advanced Agentic Architectures to Establish Multimodal Medical AI Ecosystem*, 2025.^[URL]

для совместной разработки медицинского ИИ [37]. Конкурентные преимущества предлагаемого АРМ – интеграция всех компонентов в единую экосистему; адаптация под российские стандарты и требования ЕГИСЗ; дополнительный уровень безопасности медицинских данных на основе блокчейн-защиты. Детальный разбор возможностей указанных платформ предлагается сделать вне данной работы.

Заключение

Реализация ряда рассмотренных решений при работе с ЭМК позволит осуществить оптимизацию рабочих процессов за счет внедрения электронного документооборота. Интеграция ИИ-технологий и ЭМК в рабочее место врача-диагноста позволят обеспечить мгновенный доступ к интеллектуальной аналитике, предоставляя врачу-диагносту наиболее вероятные предварительные диагнозы на основе жалоб пациента, анамнеза и результатов исследований; будут автоматизированы процессы заполнения медицинской документации.

Очевидна необходимость подсистемы мультимодальной визуализации при организации современного рабочего места врача-диагноста, так как такая подсистема позволяет осуществлять анализ медицинских данных быстро, без случайных ошибок, с учетом всех накопленных знаний. Мультимодальная визуализация является фундаментальной составляющей современных автоматизированных систем врача-диагноста, поскольку обеспечивает комплексный анализ разнородных медицинских данных. Интеграция компьютерного зрения, обработки естественного языка и анализа лабораторных данных создает синергетический эффект, значительно превосходящий возможности отдельных модальностей. Реализация и интеграция рассмотренных решений позволят существенно повысить эффективность работы врача-диагноста.

Предложенная концепция передового АРМ врача-диагноста опирается на актуальные достижения последних лет в области автоматизации, интеллектуализации и повышения эффективности работы медицинских систем. Предполагается активное использование ИНС, в том числе для диагностики, распознавания медицинских записей и в визуализации. Таким образом, создание интегрированного рабочего места врача-диагноста с функционалом ЭМК и ИИ-технологиями представляет собой стратегически важное и экономически обоснованное решение, способное кардинально повысить качество и эффективность медицинской диагностики, оптимизировать рабочие процессы и улучшить результаты лечения пациентов.

Концепция АРМ врача-диагноста представляет собой амбициозный, но реализуемый проект, который может существенно повысить качество и эффективность медицинской помощи. Однако, успешная реализация потребует тщательного планирования, значительных инвестиций и системного подхода к управлению рисками.

Список использованных источников

- [1] Park A. *Microsoft's AI is better than doctors at diagnosing disease*, Time Magazine.– 2025.  ^{↑83}
- [2] Kessler B. *ChatGPT beat doctors at diagnosing medical conditions, study says*, QUARTZ Daily Brief.– 2024.  ^{↑83}
- [3] Гусев А. В., Добридюк С. Л. *Искусственный интеллект в медицине и здравоохранении* // Информационное общество.– 2017.– № 4–5.– С. 78–93.  ^{↑84}
- [4] Овасапян Э. Д. *Искусственный интеллект в современной медицине: возможности, преимущества и риски внедрения в амбулаторное звено* // Вестник науки.– 2024.– Т. 3.– № 8(77).– С. 111–116.  ^{↑84}
- [5] Купатенко Я. Г., Мирук А. К., Ломоносова А. В., Козлова А. А. *Искусственный интеллект в медицине: обзор текущей ситуации и тенденции* // Cifra. Медико-биологические науки.– 2024.– № 2(2).– 13 с.  ^{↑84}
- [6] Литвин А. А., Стома И. О., Шаршакова Т. М., Румовская С. Б., Ковалев А. А. *Новые возможности искусственного интеллекта в медицине: описательный обзор* // Проблемы здоровья и экологии.– 2024.– Т. 21.– № 1.– С. 7–17.  ^{↑85}
- [7] de Paula P. A. B., Berger M. N., Severino J. V. B., Ribeiro K. D. P., Loures F. S., Todeschini S. A., Roeder E. A., Marques G. L. *Improving documentation quality and patient interaction with AI: a tool for transforming medical records — an experience report* // Journal of Medical Artificial Intelligence.– 2025.– Vol. 8.– 16 pp.  ^{↑85}
- [8] Комков А. А., Мазаев В. П., Рязанова С. В., Самочатов Д. Н., Кошкина Е. В., Бушуева Е. В., Драпкина О. М. *Первое исследование медицинской информационной системы RuPatient по автоматическому распознаванию медицинской документации на основе «машинного обучения»* // Кардиоваскулярная терапия и профилактика.– 2021.– Т. 20.– № 8.– С. 91–96.– ид. 3080.  ^{↑86}
- [9] Курдюмов Д. А., Капшин А. В., Рябов Н. Ю., Новицкий Р. Э., Гусев А. В. *Опыт применения технологий искусственного интеллекта для развития профилактического здравоохранения на примере Кировской области* // Менеджер здравоохранения.– 2023.– № 6.– С. 62–69.  ^{↑87}
- [10] Пономарев В. А., Назаренко А. Б., Потягова Т. М. *МИС. Функциональный модуль «Электронная медицинская карта» с применением технологии «Распознавание голоса»* // Труды XIV международной научно-технической конференции «Медэлектроника – 2024». Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии (Минск, Беларусь, 5–6 декабря 2024 г.), Минск: БГУИР.– 2024.– ISBN 978-985-543-790-2.– С. 358–364.  ^{↑87}

- [11] Polineni T. N. S., Pandugula Ch., Ganti V. K. A. T. *AI-driven automation in monitoring post-operative complications across health systems* // Global Journal of Medical Case Reports.– 2022.– Vol. **2**.– No. 1.– id. 1225.– 15 pp.  [↑88](#)
- [12] Ambay R. S., Jabbari K. M., Goel P., Patel Sh. V., Kedar R. P. *Improving operational efficiency in radiology using artificial intelligence* // Journal of Healthcare Management Standards.– 2022.– Vol. **2**.– No. 1.– 9 pp.  [↑89](#)
- [13] Alnsour Y., Johnson M., Albizri A., Harfouche A. *Predicting patient length of stay using artificial intelligence to assist healthcare professionals in resource planning and scheduling decisions* // Journal of Global Information Management.– 2023.– Vol. **31**.– No. 1.– 14 pp.  [↑89](#)
- [14] Bindushree K. P., Rashmi C. R., Shantala C. P. *Automated medical record authentication and verification with blockchain technology: a study* // International Journal for Multidisciplinary Research.– 2024.– Vol. **6**.– No. 4.– id. IJFMR240425980.– 5 pp.  [↑89, 101](#)
- [15] Almukhlifi R., Al-Khasawneh M. A., Bukhari A. A., Harasis A. A. A. *Secure e-health framework using artificial intelligence and blockchain technology* // International Journal of Advanced and Applied Sciences.– 2025.– Vol. **12**.– No. 2.– Pp. 52–61.  [↑89, 101](#)
- [16] Oo M. M., Gao Ch., Cole Ch., Hummel Y., Guignard-Duff M., Jefferson E., Hare J., Voors A. A., de Boer R. A., Lam C. S. P., Mordi I. R., Tromp J., Lang C. C. *Artificial intelligence-assisted automated heart failure detection and classification from electronic health records* // ESC Heart Failure.– 2024.– Vol. **11**.– No. 5.– Pp. 2769–2777.  [↑89](#)
- [17] *Регистрация мультимодальных изображений MPT*, Документация MATLAB.– Сообщество Экспонента.– 2021,  [Register Multimodal MRI Images](#), Matlab Documentation.  [↑92](#)
- [18] Hao Y., Stuart T., Kowalski M. H., Choudhary S., Hoffman P., Hartman A., Srivastava A., Molla G., Madad S., Fernandez-Granda C., Satija R. *Dictionary learning for integrative, multimodal and scalable single-cell analysis* // Nature Biotechnology.– 2024.– Vol. **42**.– Pp. 293–304.  [↑92](#)
- [19] Полонский Ю. З., Богдан А. А., Орлов И. С. *Патент RU2607958C1. Способ совмещения мультимодальных изображений головного мозга*.– 2015.– 2 с.  [↑92](#)
- [20] Скрибицкий В. А., Финогенова Ю. А., Шпакова К. Е., Липенгольц А. А., Смирнова А. В., Скрипачев И. А., Невзоров Д. И., Пронин А. И., Григорьева Е. Ю. *Первый опыт применения мультимодальной in vivo ПЭТ / ОФЭКТ / КТ и МРТ-визуализации лабораторных мышей с меланомой B16F10 (краткое сообщение)* // Российский биотерапевтический журнал.– 2024.– № 3.– С. 86–90.  [↑92](#)
- [21] Чеботарев А. С. *Мультимодальная нелинейно-оптическая микроскопия на основе использования раттиометрических флуоресцентных белковых сенсоров*, Дисс. ... к.т.н. М.– 2024.– 149 с. [↑93](#)

- [22] Sugathan S., Bartsch H., Riemer F., Grüner E. R., Lawonn K., Smit N. N. *Interactive multimodal imaging visualization for multiple sclerosis lesion analysis // Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine* (Paris, France, September 22–24, 2021).– The Eurographics Association.– 2021.– ISBN 978-3-03868-140-3.– Pp. 65–77.  [↑95](#)
- [23] Tuchina D. K., Meerovich I. G., Sindeeva O. A., Zherdeva V. V., Kazachkina N. I., Solov'ev I. D., Savitsky A. P., Bogdanov A. A. Jr., Tuchin V. V. *Prospects for multimodal visualization of biological tissues using fluorescence imaging // Quantum Electronics*.– 2021.– Vol. **51**.– No. 2.– Pp. 104–117.  [↑95](#)
- [24] Ryu J., Kang U., Song J. W., Kim J., Kim J. W., Yoo H., Gweon B. *Multimodal microscopy for the simultaneous visualization of five different imaging modalities using a single light source // Biomedical Optics Express*.– 2021.– Vol. **12**.– No. 9.– Pp. 5452–5469.  [↑95](#)
- [25] Kuchroo M., Godavarthi A., Tong A., Wolf G., Krishnaswamy S. *Multimodal data visualization and denoising with integrated diffusion // 2021 IEEE 31st International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)* (Gold Coast, Australia, 25–28 October 2021).– IEEE.– 2022.– ISBN 9781665411844.– Pp. 1–6.  [arXiv:2102.06757 \[cs.LG\]](#)  [↑96](#)
- [26] Eslami M., Tabarestani S., Adjouadi M. *A unique color-coded visualization system with multimodal information fusion and deep learning in a longitudinal study of Alzheimer's disease // Artificial Intelligence in Medicine*.– 2023.– Vol. **140**.– id. 102543.– 26 pp.  [↑96](#)
- [27] Obeid H. A. A., Zrour R., Mercier B., Horna S., Guillemin C., Kahlil M. *3D modeling for multimodal visualization of medical data // Proceedings of CAD'23* (Mexico City, Mexico, 10–12 July, 2023).– 2023.– Pp. 195–199.  [↑97](#)
- [28] Seo J. Y., Xia Y., Lee B., McCurry S., Yam Y. J. *MAIDR: making statistical visualizations accessible with multimodal data representation // CHI '24: Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Honolulu, HI, USA, May 11–16, 2024), New York: ACM.– 2024.– ISBN 979-8-4007-0330-0.– id. 211.– 22 pp.  [↑97](#)
- [29] Keller M. S., Gold I., McCallum C., Manz T., Kharchenko P. V., Gehlenborg N. *Vitesse: integrative visualization of multimodal and spatially resolved single-cell data // Nature Methods*.– 2025.– Vol. **22**.– No. 1.– Pp. 63–67.  [↑97](#)
- [30] Талалаев А. А., Фраленко В. П., Хачумов М. В. *Исследовательский программно-аппаратный комплекс высокопроизводительной обработки и визуализации медицинских данных // Современные наукоемкие технологии*.– 2016.– № 7.– С. 67–73.  [↑100](#)
- [31] Carobene A., Cabitza F., Bernardini S., Gopalan R., Lennerz J. K., Weir C., Cadamuro J. *Where is laboratory medicine headed in the next decade? Partnership model for efficient integration and adoption of artificial intelligence into medical laboratories // Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*.– 2023.– Vol. **61**.– No. 4.– Pp. 535–543.  [↑103, 105](#)

- [32] Dodig S., Čepelak I., Dodig M. *Are we ready to integrate advanced artificial intelligence models in clinical laboratory?* // Biochem Med (Zagreb).– 2025.– Vol. **35**.– No. 1.– id. 010501.– 14 pp.  ^{↑103}
- [33] Martínez-García M., Hernández-Lemus E. *Data integration challenges for machine learning in precision medicine* // Frontiers in Medicine.– 2022.– Vol. **8**.– id. 784455.– 21 pp.  ^{↑104}
- [34] Giesriegl F., Mrazek C., Cadamuro J. *How laboratory medicine will change in the near future: integrating artificial intelligence, automation, and human expertise in the era of Industry 5.0* // Journal of Laboratory and Precision Medicine.– 2025.– Vol. **10**.– id. 12.– 16 pp.  ^{↑105}
- [35] Lippi G., Plebani M. *Lights and shadows of artificial intelligence in laboratory medicine* // Advances in Laboratory Medicine.– 2025.– Vol. **6**.– No. 1.– 3 pp.  ^{↑106}
- [36] Prasser F., Kohlbacher O., Mansmann U., Bauer B., Kuhn K. A. *Data Integration for Future Medicine (DIFUTURE)* // Methods of Information in Medicine.– 2018.– Vol. **57**.– No. S 01.– Pp. e57–e65.  ^{↑106}
- [37] Bendazzoli S., Persson S., Astaraki M., Pettersson S., Grozman V., Moreno R. *MAIA: a collaborative medical AI platform for integrated healthcare innovation.*– 2025.– 26 pp. arXiv:  2507.19489 [cs.AI]  ^{↑108}

Поступила в редакцию	20.05.2025;
одобрена после рецензирования	12.08.2025;
принята к публикации	13.09.2025;
опубликована онлайн	17.09.2025.

Рекомендовал к публикации

к.т.н. Я. И. Гулиев

Информация об авторе:



Виталий Петрович Фраленко

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИЦМС ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Область научных интересов: интеллектуальный анализ данных и распознавание образов, искусственный интеллект и принятие решений, параллельно-конвейерные вычисления, сетевая безопасность, диагностика сложных технических систем, графические интерфейсы.



0000-0003-0123-3773

e-mail: alarmod@pereslavl.ru

Декларация об отсутствии личной заинтересованности: *благополучие автора не зависит от результатов исследования.*



Diagnostician automated workstation for working with medical data and elements of multimodal visualization

Vitaly Petrovich **Fralenko**

Ailamazyan Program Systems Institute of RAS, Ves'kovo, Russia

Abstract. The study explores two main directions related to the creation of an automated workplace for a diagnostic physician: modern electronic systems for working with patients and the visualization of multimodal data. An analytical review was carried out with the aim of identifying current trends in these areas. The first part focuses on research dedicated to the filling and maintenance of electronic medical records, as well as ensuring information exchange between different participants in the medical and diagnostic process. The second part covers studies on the automation and support of clinical research, with special attention given to solutions for multimodal visualization.

A model of a universal driver for working with heterogeneous equipment is described. The idea is to enable a diagnostic system to learn the protocols of various devices. The proposed concept envisions a workplace that automates processes of diagnostics, recognition of medical records, and visualization of medical data, while also ensuring data security. This concept is based on the intelligent application of the latest advances in artificial intelligence. Such a workplace could significantly increase the efficiency of diagnostic physicians and reduce the number of errors. (*In Russian*).

Key words and phrases: automated workstation, medical data, multimodal data, visualization, diagnostician, analytical review, concept

2020 *Mathematics Subject Classification:* 68-02; 68T45

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the State Budget Theme of the Ailamazyan Program Systems Institute of the Russian Academy of Sciences No. 125021302067-9 (completion deadline: 2025–2027).

For citation: Vitaly P. Fralenko. *Diagnostician automated workstation for working with medical data and elements of multimodal visualization*. Program Systems: Theory and Applications, 2025, **16**:4(67), pp. 81–117. (*In Russ.*). https://psta.psir.ru/read/psta2025_4_81-117.pdf

References

- [1] A. Park. *Microsoft's AI is better than doctors at diagnosing disease*, Time Magazine, 2025. [URL](#)
- [2] B. Kessen. *ChatGPT beat doctors at diagnosing medical conditions, study says*, QUARTZ Daily Brief, 2024. [URL](#)
- [3] A. V. Gusev, S. L. Dobridnyuk. "Artificial intelligence in medicine and healthcare", *Informacionnoe obshchestvo*, 2017, no. 4–5, pp. 78–93 (in Russian). [URL](#)
- [4] E. D. Ovasapyan. "Artificial intelligence in modern medicine: opportunities, advantages and risks of implementation in the outpatient unit", *Vestnik nauki*, **3:8(77)** (2024), pp. 111–116 (in Russian).
- [5] Ya. G. Kupatenko, A. K. Miruk, A. V. Lomonosova, A. A. Kozlova. "Artificial intelligence in medicine: an overview of the current situation and tendencies", *Cifra. Mediko-biologicheskie nauki*, 2024, no. 2(2), 13 pp. (in Russian). [doi](#)
- [6] A. A. Litvin, I. O. Stoma, T. M. Sharshakova, S. B. Rumovskaya, A. A. Kovalev. "New possibilities of artificial intelligence in medicine: a narrative review", *Problemy zdorov'ya i ekologii*, **21:1** (2024), pp. 7–17 (in Russian). [doi](#)
- [7] P. A. B. de Paula, M. N. Berger, J. V. B. Severino, K. D. P. Ribeiro, F. S. Loures, S. A. Todeschini, E. A. Roeder, G. L. Marques. "Improving documentation quality and patient interaction with AI: a tool for transforming medical records — an experience report", *Journal of Medical Artificial Intelligence*, **8** (2025), 16 pp. [doi](#)
- [8] A. A. Komkov, V. P. Mazaev, S. V. Ryazanova, D. N. Samochatov, E. V. Koshkina, E. V. Bushueva, O. M. Drapkina. "First study of the RuPatient health information system with optical character recognition of medical records based on machine learning", *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika*, **20:8** (2021), pp. 91–96, id. 3080 (in Russian). [doi](#)
- [9] D. A. Kurdyumov, A. V. Kashin, N. Yu. Ryabov, R. E. Novickij, A. V. Gusev. "Experience in the application of artificial intelligence technologies for the development of preventive health care on the example of the Kirov region", *Menedzher zdravooxraneniya*, 2023, no. 6, pp. 62–69 (in Russian). [doi](#)
- [10] V. A. Ponomarev, A. B. Nazarenko, T. M. Potyagova. "MIS. Functional module "electronic medical record" with the use of "voice recognition" technology", *Trudy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Medelektronika — 2024". Sredstva medicinskoj elektroniki i novye medicinskie tekhnologii* (Minsk, Belarus', 5–6 dekabrya 2024 g.), BGUIR, Minsk, 2024, ISBN 978-985-543-790-2, pp. 358–364 (in Russian). [URL](#)
- [11] T. N. S. Polineni, Ch. Pandugula, V. K. A. T. Ganti. "AI-driven automation in monitoring post-operative complications across health systems", *Global Journal of Medical Case Reports*, **2:1** (2022), id. 1225, 15 pp. [doi](#)
- [12] R. S. Ambay, K. M. Jabbari, P. Goel, Sh. V. Patel, R. P. Kedar. "Improving operational efficiency in radiology using artificial intelligence", *Journal of Healthcare Management Standards*, **2:1** (2022), 9 pp. [doi](#)

- [13] Y. Alnsour, M. Johnson, A. Albizri, A. Harfouche. “Predicting patient length of stay using artificial intelligence to assist healthcare professionals in resource planning and scheduling decisions”, *Journal of Global Information Management*, **31**:1 (2023), 14 pp.
- [14] K. P. Bindushree, C. R. Rashmi, C. P. Shantala. “Automated medical record authentication and verification with blockchain technology: a study”, *International Journal for Multidisciplinary Research*, **6**:4 (2024), id. IJFMR240425980, 5 pp.
- [15] R. Almukhlifi, M. A. Al-Khasawneh, A. A. Bukhari, A. A. A. Harasis. “Secure e-health framework using artificial intelligence and blockchain technology”, *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, **12**:2 (2025), pp. 52–61.
- [16] M. M. Oo, Ch. Gao, Ch. Cole, Y. Hummel, M. Guignard-Duff, E. Jefferson, J. Hare, A. A. Voors, R. A. Boerde, C. S. P. Lam, I. R. Mordi, J. Tromp, C. C. Lang. “Artificial intelligence-assisted automated heart failure detection and classification from electronic health records”, *ESC Heart Failure*, **11**:5 (2024), pp. 2769–2777.
- [17] *Register Multimodal MRI Images*, Matlab Documentation.
- [18] Y. Hao, T. Stuart, M. H. Kowalski, S. Choudhary, P. Hoffman, A. Hartman, A. Srivastava, G. Molla, S. Madad, C. Fernandez-Granda, R. Satija. “Dictionary learning for integrative, multimodal and scalable single-cell analysis”, *Nature Biotechnology*, **42** (2024), pp. 293–304.
- [19] Yu. Z. Polonskij, A. A. Bogdan, I. S. Orlov. *Patent RU2607958C1. Method for combining multimodal images of the brain*, 2015, 2 pp. (in Russian).
- [20] V. A. Skribickij, Yu. A. Finogenova, K. E. Shpakova, A. A. Lipengol’c, A. V. Smirnova, I. A. Skripachev, D. I. Nevzorov, A. I. Pronin, E. Yu. Grigor’eva. “The first experience of multi-modal *in vivo* PET/SPECT/CT and MRI imaging of laboratory mice with melanoma B16F10 (short message)”, *Rossijskij bioterapevticheskij zhurnal*, 2024, no. 3, pp. 86–90 (in Russian).
- [21] A. S. Chebotarev. *Multimodal nonlinear optical microscopy based on the use of ratiometric sensors of fluorescent proteins*, Diss. . . . k.t.n., M., 2024, 149 pp. (in Russian).
- [22] S. Sugathan, H. Bartsch, F. Riemer, E. R. Grüner, K. Lawonn, N. N. Smit. “Interactive multimodal imaging visualization for multiple sclerosis lesion analysis”, *Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine* (Paris, France, September 22–24, 2021), The Eurographics Association, 2021, ISBN 978-3-03868-140-3, pp. 65–77.
- [23] D. K. Tuchina, I. G. Meerovich, O. A. Sindeeva, V. V. Zherdeva, N. I. Kazachkina, I. D. Solov’ev, A. P. Savitsky, A. A. Jr. Bogdanov, V. V. Tuchin. “Prospects for multimodal visualization of biological tissues using fluorescence imaging”, *Quantum Electronics*, **51**:2 (2021), pp. 104–117.

- [24] J. Ryu, U. Kang, J. W. Song, J. Kim, J. W. Kim, H. Yoo, B. Gweon. “Multimodal microscopy for the simultaneous visualization of five different imaging modalities using a single light source”, *Biomedical Optics Express*, **12**:9 (2021), pp. 5452–5469. [doi](#)
- [25] M. Kuchroo, A. Godavarthi, A. Tong, G. Wolf, S. Krishnaswamy. “Multimodal data visualization and denoising with integrated diffusion”, *2021 IEEE 31st International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)* (Gold Coast, Australia, 25–28 October 2021), IEEE, 2022, ISBN 9781665411844, pp. 1–6. [doi](#) [arXiv:2102.06757 \[cs.LG\]](#)
- [26] M. Eslami, S. Tabarestani, M. Adjouadi. “A unique color-coded visualization system with multimodal information fusion and deep learning in a longitudinal study of Alzheimer’s disease”, *Artificial Intelligence in Medicine*, **140** (2023), id. 102543, 26 pp. [doi](#)
- [27] H. A. A. Obeid, R. Zour, B. Mercier, S. Horna, C. Guillevin, M. Kahlil. “3D modeling for multimodal visualization of medical data”, *Proceedings of CAD’23* (Mexico City, Mexico, 10–12 July, 2023), 2023, pp. 195–199. [doi](#)
- [28] J. Y. Seo, Y. Xia, B. Lee, S. McCurry, Y. J. Yam. “MAIDR: making statistical visualizations accessible with multimodal data representation”, *CHI ’24: Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (O’ahu, Hawai’i, USA, 11–16 May 2024), ACM, New York, 2024, ISBN 979-8-4007-0330-0, id. 211, 22 pp. [doi](#)
- [29] M. S. Keller, I. Gold, C. McCallum, T. Manz, P. V. Kharchenko, N. Gehlenborg. “Vitesse: integrative visualization of multimodal and spatially resolved single-cell data”, *Nature Methods*, **22**:1 (2025), pp. 63–67. [doi](#)
- [30] A. A. Talalaev, V. P. Fralenko, M. V. Xachumov. “Research software and hardware complex of high-performance processing and visualization of medical data”, *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, no. 7, pp. 67–73 (in Russian). [doi](#)
- [31] A. Carobene, F. Cabitza, S. Bernardini, R. Gopalan, J. K. Lennerz, C. Weir, J. Cadamuro. “Where is laboratory medicine headed in the next decade? Partnership model for efficient integration and adoption of artificial intelligence into medical laboratories”, *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, **61**:4 (2023), pp. 535–543. [doi](#)
- [32] S. Dodig, I. Čepelak, M. Dodig. Are we ready to integrate advanced artificial intelligence models in clinical laboratory? *Biochem Med (Zagreb)*, **35**:1 (2025), id. 010501, 14 pp. [doi](#)
- [33] M. Martínez-García, E. Hernández-Lemus. “Data integration challenges for machine learning in precision medicine”, *Frontiers in Medicine*, **8** (2022), id. 784455, 21 pp. [doi](#)
- [34] F. Giesriegl, C. Mrazek, J. Cadamuro. “How laboratory medicine will change in the near future: integrating artificial intelligence, automation, and human expertise in the era of Industry 5.0”, *Journal of Laboratory and Precision Medicine*, **10** (2025), id. 12, 16 pp. [doi](#)

- [35] G. Lippi, M. Plebani. “Lights and shadows of artificial intelligence in laboratory medicine”, *Advances in Laboratory Medicine*, **6**:1 (2025), 3 pp. 
- [36] F. Prasser, O. Kohlbacher, U. Mansmann, B. Bauer, K. A. Kuhn. “Data Integration for Future Medicine (DIFUTURE)”, *Methods of Information in Medicine*, **57**:S 01 (2018), pp. e57–e65. 
- [37] S. Bendazzoli, S. Persson, M. Astaraki, S. Pettersson, V. Grozman, R. Moreno. *MAIA: a collaborative medical AI platform for integrated healthcare innovation*, 2025, 26 pp.  2507.19489 [cs.AI] 