



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: 10.21045/1811-0185-2025-12-101-120
УДК 519.876.5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ГЛУБОКОЙ МЕДИЦИНЫ В СОСТАВЕ УМНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ. ЧАСТЬ 1: ВЫЗОВЫ СОВРЕМЕННОГО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ И ЦЕЛЕВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

А.Е. Михеев ✉

ФГБУН «Институт программных систем им. А.К. Айламазяна»
Российской академии наук, г. Переславль Залесский, Россия.
<https://orcid.org/0000-0002-4777-2732>

✉ Автор для корреспонденции: Михеев А.Е.

АННОТАЦИЯ

Современное здравоохранение сталкивается с беспрецедентными вызовами: рост затрат, нехватка кадров, фрагментация данных и инфраструктуры, а также увеличение бремени хронических заболеваний. Это обуславливает необходимость перехода от реактивной, «лечебной» модели к проактивной, профилактической. Настоящая работа представляет собой первую часть исследования, посвященного технологическим основам «глубокой медицины», суть которой состоит в использовании искусственного интеллекта для улучшения человеческих аспектов медицинской практики, а не для их замены.

Цель: провести критический анализ существующей парадигмы медицинской помощи и обосновать стратегическую необходимость перехода к проактивной, профилактической модели. Дать детальное введение и терминологическое уточнение ключевых концепций, составляющих основу для проектируемого решения: «глубокая медицина», цифровая медицинская экосистема и технология цифровых двойников.

Материалы и методы. Проведен анализ современных вызовов и критических мест в системе здравоохранения. Детально рассмотрены концепция глубокой медицины и технология цифровых двойников, в том числе применительно к особенностям ее реализации в цифровой медицинской экосистеме.

Результаты. Показано, что реализация принципов глубокой медицины возможна лишь при сочетании двух факторов: 1) единой платформенной экосистемы, преодолевающей разрозненность данных, и 2) технологии цифровых двойников, преобразующей большие данные в персонализированное знание. Уточнена терминология («цифровая модель», «цифровая тень», «цифровой двойник») и обосновано, что в медицине применительно к пациенту корректен термин «цифровая тень», обеспечивающий односторонний поток данных и обратную связь в виде рекомендаций. Выявлен и систематизирован комплекс ключевых проблем внедрения, включая вопросы качества данных, конфиденциальности, интеграции, этики и вычислительных мощностей.

Заключение и перспективы. В первой части исследования обоснована неизбежность смены парадигмы и сформирован концептуально-терминологический фундамент. Выявленные барьеры демонстрируют, что их преодоление требует не точечных улучшений, а целостного системного подхода. Разработке конкретного архитектурного решения – технологической структуры умной медицинской экосистемы, призванной реализовать анонсированную профилактическую модель, – будет посвящена вторая часть данного исследования.

Ключевые слова: глубокая медицина, цифровая экосистема, цифровой двойник, цифровая тень, профилактическая медицина, персонализированная медицина, вызовы здравоохранения.

Для цитирования: Михеев А.Е. Технологическая структура глубокой медицины в составе умной медицинской экосистемы. Часть 1: Вызовы современного здравоохранения и целевая концепция профилактической модели на основе цифровых двойников. Менеджер здравоохранения. 2025; 12:101–120. DOI: 10.21045/1811-0185-2025-12-101-120

Введение

Сегодня индустрия здравоохранения во всём мире испытывает беспрецедентное давление, вынуждающее ее соответствовать постоянно растущим ожиданиям общества и экономики: возрастает спрос на медицинские услуги; пациенты хотят контролировать медицинские

решения о своем здоровье и лечении; растущие расходы на здравоохранение беспокоят не только потребителей (пациентов), но и плательщиков, которыми могут быть как государство (ОМС), так и страховые компании (ДМС); все хотят иметь прозрачную систему качественного медицинского обслуживания при доступной стоимости; государство



© Михеев А.Е., 2025 г.



и другие плательщики за медицинскую помощь из всех сил стараются снизить свои расходы. При этом медицина сталкивается с трудностями из-за нехватки специалистов [1], разрозненных данных о пациентах, ограничений инфраструктуры, а также от проблемы согласованности внутри МО и между специальностями вследствие сужения специализации клинической практики, в то время, как наилучшая клиническая помощь оказывается в рамках междисциплинарного подхода, при котором участникам доступна вся необходимая информация [2].

С наибольшим количеством проблем, связанных с качеством медицинской помощи и высокими расходами на нее вследствие ограниченных ресурсов отдельных медицинских организаций (МО) и разрозненной инфраструктуры здравоохранения в целом, сталкиваются пациенты со сложными медицинскими проблемами (с хроническими заболеваниями, противоречивыми диагнозами, осложненными и/или редкими заболеваниями) и ухаживающие за ними члены их семей. Люди со сложными медицинскими проблемами часто имеют неудовлетворительные показатели здоровья, а затраты на их лечение составляют значительную часть расходов на здравоохранение [3, 4]. Кроме того, эта группа населения растёт во всём мире по мере увеличения числа хронических заболеваний, требующих длительного лечения [5]: мультиморбидность является приоритетным направлением исследований в области глобального здравоохранения. Такие пациенты (и, на самом деле, не только они) особенно нуждаются в многогранной и комплексной поддержке для улучшения показателей здоровья и качества жизни путём интеграции медицинских и социальных услуг.

Одновременно медицина все больше основывается на данных, качество и полнота которых напрямую влияют на обоснованность принимаемых решений и на результаты лечения. Медицинские данные также обеспечивают основу для улучшения качества медицинской помощи и развития медицинских исследований. С появлением носимых устройств и готовностью потребителей использовать их количество данных растёт в геометрической прогрессии. Растущая доступность мультимодальных данных (геномных, экономических, демографических, клинических и фенотипических) в сочетании с технологическими инновациями в области мобильных устройств, Интернета вещей (IoT), Интернета медицинских вещей (IoMT), а также с ростом вычислительных мощностей позволяют собирать огромное количество

персональных медицинских данных о здоровье. Поэтому очередной прорыв в отрасли, с точки зрения технологий, происходит (как мы надеемся) сегодня именно в сфере управления данными.

Но эти же данные являются источником проблем: значительная часть времени, необходимого для лечения, уходит на такие действия, как сбор анамнеза и клинических данных, предварительная оценка собранных данных и оформление медицинских записей – порой в ущерб общению с пациентами. Конечно и тут на помощь врачу сегодня приходят современные медицинские информационные системы и прорывные технологии (облачные вычисления, аналитика больших данных, технологии искусственного интеллекта и пр.), но их эффективному использованию также препятствует разрозненная инфраструктура здравоохранения.

Глубокая медицина как концепция

Подход в медицине, который использует возможности ИИ и анализа больших данных для улучшения диагностики, лечения и мониторинга заболеваний, некоторыми исследователями сегодня называется глубокой медициной (англ. Deep Medicine). Это концепция, описанная одним из широко известных исследователей в области применения ИИ в медицине Эриком Тополем в работе [6]. Суть глубокой медицины – использование ИИ для улучшения человеческих аспектов медицинской практики, а не для их замены. Подход предполагает более глубокое понимание биологических и медицинских данных с помощью технологий, что должно привести к более точным и персонализированным медицинским решениям, и включает четыре аспекта [7, 8, 9]:

1. Понимание человека на самом детальном уровне и взаимодействие с пациентом, основанное на всех доступных данных: не только медицинских, но и социальных, поведенческих, окружающей среды и истории жизни, поскольку здоровье, а точнее здоровьесбережение человека – комплексное явление.
2. Сбор всех необходимых данных о здоровье в больнице и дома, их обработка как для врачей, так и для пациентов за счет глубокого машинного обучения. Данный аспект также связан с обучением пациентов умению использовать возможности ИИ с помощью различных носимых устройств.
3. Повышение эффективности работы врача, сосредоточение врача на каждом конкретном пациенте за счет постоянной поддержки



пациента, способность врача и пациента проявлять эмпатию друг к другу на фоне «передачи на аутсорсинг» МИС и другим системам (в том числе ИИ) многих рутинных задач.

4. Контроль персональных медицинских данных пациентами. По мнению автора концепции глубокой медицины, безопасность и конфиденциальность данных пациентов будут намного выше, если контролировать их будут они сами, а не разные врачи или МО, которые пациенты посещали на протяжении многих лет.

Реализация принципов глубокой медицины становится возможной лишь при одновременном действии двух взаимодополняющих факторов. С одной стороны, необходима единая платформа для взаимодействия всех участников системы медицинской помощи, решающая проблему разрозненности данных и инфраструктуры. С другой стороны, требуется технология, способная превратить большие агрегированные данные в персонализированное знание. Таким образом, концепция глубокой медицины, провозглашающая возврат к человеко-ориентированному взаимодействию в практике врача за счет делегирования рутинных задач технологиям, находит свое практическое воплощение в синергии двух преобразующих сил: цифровые медицинские экосистемы создают бесшовное и связанное информационное пространство, в то время как технология цифровых двойников пациента выступает в роли квинтэссенции и основного инструмента для работы с данными внутри этой экосистемы.

Исследования перспектив комплексной и преемственной медицинской помощи уже достаточно давно ведутся в направлении разработки технологий и сервисов, которые способны обеспечить пациентам многогранную и комплексную поддержку, опираясь на концепцию платформенных экосистем в медицине [3, 10]. Эта концепция, обладая большим преобразующим потенциалом, по сути, предлагает подход к реализации всех аспектов концепции глубокой медицины, ориентированный на континуум медицинской помощи [11].

Медицинские экосистемы рассматриваются как системы, фокусирующиеся на данных, из которых генерируются новые знания о здоровьесбережении. Основной эффект от создания медицинских экосистем заключается в том, что возможное ранее только для ВИП-пациентов сопровождение по системе медицинской помощи становится доступным на массовом рынке. Такие экосистемы нацелены

на интеграцию работы разных поставщиков и потребителей медицинской помощи, обмен между ними данными и информацией для оказания комплексной медицинской помощи пациентам некоторого объединения МО.

Цифровая медицинская экосистема призвана реализовать системный подход к обработке клинических данных, как основу повышения эффективности медицинской помощи за счет цифровой трансформации сквозных медицинских технологических процессов. Именно преобразующие медицину цифровые экосистемные предложения способны изменить динамику развития отрасли за счет новых подходов к управлению данными, знаменуя собой момент сближения здравоохранения и технологий, которые могут кардинально изменить модели оказания медицинской помощи посредством систем ИИ, дополняя и расширяя возможности МО для улучшения способов оказания персонализированной медицинской помощи, в том числе оживляя отношения между пациентами и врачами в эпоху цифровых технологий.

Еще одной преобразующей систему здравоохранения силой сегодня становится технология цифровых двойников, меняющая подход к лечению пациентов. В условиях активного развития технологий нового поколения (облачные вычисления, аналитика больших данных, глубокое машинное обучение, блокчейн и пр.) концепция цифровых двойников в медицине становится все более популярной среди исследователей, благодаря эффективности ее применения в промышленности, а также за счет совершенствования сопутствующих технологий, помогающих ее внедрять. Технология цифровых двойников рассматривается медициной как многообещающий подход, цель которого усовершенствовать клинические результаты и сами процессы оказания медицинской помощи [12].

В реальности технология цифровых двойников в цифровой экосистеме медицинской помощи – основа, на которой может быть реализована система идей глубокой медицины: когда технологии позволяют общаться и работать дистанционно, но одновременно позволяют врачам быть «рядом» с пациентом, проявляя всю возможную заботу, поддерживая в непростые минуты боли и страха, помня, что на врача последняя надежда. Цифровой двойник, освобождая время и силы врачей, дает им шанс стать человечнее [7]. Именно цифровой двойник, аккумулируя всю совокупность информации о пациенте, позволяет реализовать на





практике все четыре аспекта глубокой медицины – от детального понимания человека до обеспечения его контроля над персональными данными.

Экосистемный подход и технология цифровых двойников вместе формируют технологический фундамент глубокой медицины, переводя её из разряда теоретических постулатов в плоскость практической реализации. Объединение цифровых и медицинских услуг на основе цифровых двойников в медицинской экосистеме может обеспечить долгожданный персонализированный подход к медицине, который позволит врачам и пациентам принимать обоснованные решения. Эти изменения приведут к повышению качества медицинской помощи, удовлетворённости потребителей и экономической эффективности, несмотря на проблемы, с которыми сталкивается любая отрасль в период трансформации, такие как вопросы конфиденциальности, технологические барьеры и проблемы с регулированием.

Цифровые двойники в медицинской экосистеме

Подходы к интеграции экосистемных технологий и цифровых двойников воплощены в стратегическом направлении в области цифровой трансформации здравоохранения¹ Российской Федерации, реализацию требований которого предполагается осуществлять в соответствии с рядом факторов: применение «сквозных» цифровых технологий, включая ИИ; осуществление информационного обмена на базе «цифровых двойников», цифровых платформ, приложений и сервисов; внедрение дистанционного мониторинга состояния здоровья с использованием персональных медицинских помощников и др.

Мы неоднократно обращались к теме медицинских экосистем ранее [10], в том числе анализировали перспективы создания цифровых медицинских экосистем в России, сопутствующие проблемы, недостатки централизованного подхода, пути решения и план по созданию такой экосистемы. Поэтому для простоты в настоящей работе мы определяем цифровую экосистему комплексной медицинской помощи как совокупность информационных технологий и цифровых сервисов, используемых для удовлетворения медицинских потребностей пациентов

и координации медицинской помощи с учётом личных, структурных, медицинских и социальных факторов. Рассматривая цифровые экосистемы медицинской помощи, мы выступаем за разработку взаимосвязанных сервисов для удовлетворения многогранных потребностей поставщиков и потребителей медицинской помощи, а не за создание отдельных инструментов, ориентированных на отдельные МО или отдельные заболевания, когда многие необходимые данные просто не будут доступными, и когда могут не учитываться противоречивые симптомы и осложнения, связанные с другими заболеваниями. Сосредоточенность на медицинских потребностях в ущерб социальным также может привести к аналогичным результатам [3]. Изолированные и узкоспециализированные технологии, как правило, плохо сочетаются друг с другом.

Так, например, данные о состоянии здоровьясбережения пациентов между посещениями МО редко интегрируются в электронные медицинские карты. Сталкиваясь с разрозненностью технологий и услуг, людям часто приходится создавать и поддерживать свои собственные «экосистемы» здоровья за счет мобильных технологий (журналы для отслеживания симптомов, умные часы, приложения для обмена сообщениями и т.п.), предлагаемых технологическими гигантами: Google, Apple, LG, Xiaomi и пр. Несмотря на значительный труд, затраченный пациентами на сбор собственных медицинских данных в одном месте, они зачастую остаются невостребованными врачами просто вследствие нехватки времени. В одном из докладов на прошедшей в начале 2025 г. научно-практической конференции ИТМ ИИ² было заявлено, что свыше 50% значимых клинических данных, хранящихся в документах пациента, никто не видит.

На приеме в поликлинике врач формирует свое мнение на основе самых простых и доступных ему примеров, редко задумываясь об особых случаях, также он склонен интерпретировать информацию таким образом, чтобы она совмещалась с его системой взглядов [7]. Кроме того, врач сфокусирован на заполнении медицинской карты в условиях ограниченного времени, в результате до 70% информации в ЭМК просто копируется из предыдущих записей, увеличивая риск дублирования ошибок [7]. И хотя в некоторых продвинутых современных МИС осуществляется контроль

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 апреля 2024 г. № 959-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации здравоохранения» / [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202404190016>. (Доступ: 10.10.2024)

² IX Всероссийская научно-практическая конференция по Искусственному интеллекту в здравоохранении и системам поддержки принятия врачебных решений (<https://itm-ai.ru/>)



использования «копипаста», в масштабах региона, ведомства или страны это не имеет существенного значения, так как возможность копирования даже значимых показателей здоровья предоставляется разработчиками по требованию пользователей (врачей) и/или администрации больницы. При том, что применение в МИС функций повторного использования (копирования) однажды внесённых данных в новые записи считается одним из существенных недостатков современных ЭМК как источников данных о реальной клинической практике (ДРКП, англ. Real World Data, RWD) [13, 14].

Значительно снизить повседневную нагрузку на врачей можно, если действия, которые зависят исключительно от данных, предоставляемых пациентом, передать непосредственно пациенту и системам ИИ (в контролируемой и безопасной форме). В частности, облачные вычисления позволяют внедрять эффективные и безопасные технологии больших данных и системы ИИ в повседневную медицинскую практику. Они обеспечивают вычислительные мощности для анализа больших объёмов данных с более высокой скоростью и меньшими затратами по сравнению с традиционной «локальной» инфраструктурой МО. Пациенты в равной степени заинтересованы в управлении своими личными медицинскими данными. Они (и не только самые молодые; число «продвинутых» стремительно растёт в самых разных возрастных и социальных категориях) вполне осознанно разбираются в современных технологиях и готовы их использовать, если это им поможет улучшить качество жизни и принимать эффективные решения в области собственного здоровья.

Технология цифрового двойника как раз и предлагает возможности для освобождения врачей от сбора анамнеза, клинических данных и их предварительной оценки. Кроме того, цифровые двойники всё чаще используются в качестве инструмента моделирования и оптимизации использования ресурсов в больницах [15]. Благодаря интеграции данных в реальном времени, расширенной аналитике и виртуальному моделированию цифровые двойники должны обеспечить развитие персонализированной медицины, прогнозную аналитику, оптимизацию клинических решений, координацию всех бизнес-процессов МО (оптимизация использования коек, построение логистических цепочек, организация экосистемных партнёрств и т.д.), создание для врачей лучших условий оказания медицинской помощи, а также возможностей для

обучения персонала и моделирования процессов [16]. Таким образом, прогноз широкого внедрения цифровых двойников в практику здравоохранения в среднесрочной перспективе не вызывает сомнения. Появление прижизненного цифрового двойника пациента может стать технологическим фундаментом персонализированной и превентивной медицины и ускорить принятие общего стандарта обмена медицинскими данными [17].

В отличие от аналогичного моделирования в промышленности, создание цифрового двойника человека в медицине затруднено вследствие сложности и комплексности взаимосвязей различных типов систем в человеческом организме, однако в организации здравоохранения, в общественном здравоохранении и в управлении медицинскими технологическими процессами возможности применения цифровых двойников также обширны и позволяют оптимизировать ресурсы МО и других учреждений здравоохранения [12, 10]. В течение последнего периода времени в мировой науке выполнены масштабные исследовательские проекты по разработке алгоритмов цифровых двойников медицинского назначения, определились технологические лидеры и ключевые участники новых рыночных ниш, среди которых, к сожалению, практически отсутствуют отечественные центры компетенций [17].

Основываясь на предыдущих исследованиях [10] [18], мы предполагаем, что эффективная и всеобъемлющая реализация концепции цифровых двойников для такой предметной области, как медицина, включая создание цифрового двойника человека, в перспективе возможна, если будет решена проблема объединения поставщиков и потребителей медицинской помощи в цифровую медицинскую экосистему, предоставляющую возможность сбора всех необходимых первичных данных необходимого качества за счёт взаимодействия участников, соблюдающих требования политики экосистемы.

Цель настоящего исследования:

описание одного из подходов к воплощению идей глубокой медицины в составе цифровой медицинской экосистемы посредством реализации профилактической бизнес-модели работы МО. Предлагается интеллектуальная технологическая структура для имплементации технологии цифровых двойников в цифровой медицинской экосистеме. Технологическая структура рассматривается как часть технологической архитектуры предприятия





(АП)³ – практика проектирования, планирования и управления общей структурой и работой организации, связанная с согласованием технологий, процессов, интересов членов организации (сотрудников и подразделений) с ее бизнес-целями и стратегией. Использование концепции АП позволяет на основе архитектур разных уровней (бизнес-архитектуры, архитектуры данных, архитектуры приложений и архитектуры технологий или ИТ-архитектуры) сформировать такую технологическую структуру медицинской экосистемы, в соответствии с которой взаимодействие с бизнес-средой осуществляется в рамках экосистемного или корпоративного континуума [20, 21].

В связи с тем, что по мере развития технологий внедрение их в производственные структуры становится всё сложнее в силу необходимости совершенствования внутренних компетенций [22], концепция АП – одно из наиболее перспективных направлений, позволяющее при правильной методологии использования не только поддерживать инициативы по созданию медицинских экосистем, но и предложить новые подходы для успешной работы многим современным МО в условиях перехода к цифровой экономике. Благодаря объединению МО в экосистему происходит передача ответственности за сотрудничество и создание устойчивой бизнес-модели на самих участников экосистемы [18], которая позволяет МО-участникам в режиме реального времени использовать большие объёмы данных, поступающие в полностью автоматизированном режиме, на основе договорных соглашений о правилах совместного использования данных, реализации продуманных стратегии и тактики пересмотра действующих нормативных требований и мероприятий для повышения качества данных в экосистеме: как на уровне ЭМК, так и в процессе создания цифровых двойников [23, 24].

Констатируя наличие потенциальных проблем на пути внедрения экосистемных решений, связанных с нарушениями конфиденциальности данных и представляющих собой угрозу жизнеспособности таких технологий, проблемы информационной безопасности не обсуждаются в настоящей статье за исключением нескольких упоминаний в контексте изложения. Мы руководствуемся принципом, что по мере

роста рисков для безопасности медицинских данных растут и возможности завоевать доверие потребителей: пациентов и врачей. Соответственно, главная задача информационной безопасности не в запрещении использования технологий, а в поиске и нахождении решений для обеспечения безопасных условий деятельности в составе экосистемы [10].

Отметим, что в данной работе продолжаются исследования, начатые ранее [25, 10, 26]. Для сохранения целостности изложения и для лучшего понимания предлагаемого подхода, некоторые выводы предыдущих исследований цитируются с указанием соответствующих ссылок по мере изложения.

От настоящего к будущему: профилактическая бизнес-модель работы медицинских организаций

Меры поддержки в период ремиссии острых или при хронических заболеваниях, паллиативная помощь, повторные госпитализации из-за «халатности» пациентов в послеоперационный период и при домашнем уходе дорого обходятся «бесплатному» государственному здравоохранению, так как не только расходуются дополнительные ресурсы, но и не компенсируется проактивное отслеживание динамики состояния здоровья пациента между госпитализациями или посещениями врача (поликлиники). Современная система здравоохранения основана на модели лечения по факту обращения за медицинской помощью: пациент замечает симптомы или заболевает, обращается к врачу и проходит лечение. Разработка технологий для удаленного наблюдения за различными параметрами заболевания с целью получения информации о состоянии здоровья пациента в режиме реального времени в сочетании с телемедициной может повысить эффективность системы организации медицинской помощи и реализовать альтернативный сценарий.

Существующие в настоящее время технологии способны значительно ускорить реакцию на неблагоприятные состояния человека и повысить получаемый при этом эффект. Представьте, что вы испытываете общее недомогание, головную боль и дискомфорт в груди, которые предпочитаете игнорировать из-за напряженного рабочего графика. Но через некоторое время получаете сообщение на смартфон с разъяснениями серьезности ситуации и предложением срочно обратиться ко врачу. Вполне может оказаться, что это сообщение спасет вашу жизнь. Или, например: школьник

³ Архитектура Предприятия – АП (англ. Enterprise Architecture – EA) – инновационная концепция стратегического управления, использование которой позволяет быстро и целенаправленно приспособить современное предприятие под условия постоянно изменяющейся внешней среды [19].



с диабетом жуёт сладкую жвачку – и тут же получает уведомление на телефон: сахар в крови пошёл вверх. Такое же сообщение приходит его маме. Можно сразу отреагировать – без уколов, анализов, ожидания в очереди [27].

Некоторые из популярных носимых устройств, такие как фитнес-браслеты, умные часы, умная одежда, в настоящее время используются, в основном, для отслеживания физической активности и уровня физической подготовки. Данные, собираемые с помощью этих устройств, как правило, синхронизируются с облачной инфраструктурой поставщика/производителя устройства напрямую либо через посредника в виде смартфона или планшета для передачи данных в центральное хранилище. Уже сейчас использование фитнес-трекеров мотивирует пользователей вести здоровый образ жизни (ЗОЖ), что является профилактикой многих наших болезней. А в будущем они могут стать прочной связующей нитью между пациентом и врачом: собирать не только безобидную информацию, но и данные, более специфичные для состояния здоровья: уровень сахара в крови, частота сердечных сокращений, ЭКГ в одном отведении, сатурация, химический состав крови и другие. Причем, темпы развития технологий, используемых в носимых устройствах, позволяют оптимистично предполагать, что количество собираемых дистанционно показателей будет неуклонно возрастать, в том числе за счет развития новых и новых технологий [27].

Однако польза необработанных «сырых» данных очень ограничена. Эти данные становятся действительно полезными только тогда, когда их подготовили для получения дополнительной ценности: клинической, коммерческой или иной выгоды. Это можно сделать с помощью предварительной аналитики больших данных и объединения очищенных данных мониторинга здоровья с ЭМК МИС МО – участников цифровой экосистемы, предоставляющих доступ к предшествующим эпизодам оказания медицинской помощи. В этом случае данные цифровой медицинской экосистемы превратятся в «золотоносные жилы» для использования врачами. Например, МИС МО, в составе которых функционируют системы поддержки принятия врачебных решений (СППВР) с ИИ, могут автоматически выполнять предварительную оценку данных о здоровье своих пациентов и выявлять тех из них, которым требуется немедленное внимание и/или помощь, посредством отображения профилей, моделей или цифровых двойников таких пациентов на

соответствующих дашбордах, рассылки сообщений врачам для быстрого принятия необходимых мер, а также помогать оформлять необходимую медицинскую документацию.

В описанном варианте использование устройств с поддержкой Интернета вещей для сбора данных о физиологическом состоянии пациентов и оказания медицинской помощи служит двум основным целям:

- непрерывный мониторинг здоровья;
- автоматизированные процессы, снижающие зависимость от загруженности медицинского персонала.

Для услуг, предоставляемых в рамках персонализированной медицины, необходимы не только данные о лечении, процедурах и лекарствах, хранящиеся в ЭМК, но и широкий спектр других персональных медицинских данных, таких как эпигенетические данные, собранная пациентом информация о состоянии здоровья, история его связанного со здоровьем поведения, индивидуальные характеристики. Персонализированная медицина – это подход к лечению, учитывающий генетические особенности пациента, а также его образ жизни, предпочтения, убеждения, взгляды и знания в социальном контексте [28, 29].

Чтобы добиться успешной реализации, персонализированная медицина требует наличия персональных медицинских данных не только в контексте оказания медицинских услуг, но и когда мы «здоровы» [28]. Такие факторы, как поддержка семьи, здоровый образ жизни, доступность здоровой пищи, чистой воды и пр. так же, как и повседневная экономическая и физическая безопасность оказывают значительное влияние на здоровье человека. Такого рода персональных медицинских данных не существует ни в одной ЭМК современной МИС. Приходится собирать данные о состоянии здоровья из множества источников, таких как социальные сети, веб-серфинг, персональные медицинские устройства, патронажные службы и используемые ими индивидуальные приборы (рис. 1). Совокупность всех собранных медицинских данных формирует цифрового двойника (речь о котором, с определенными оговорками, пойдет дальше). Регулируемая ЭМК МИС МО больше не является центром медицинской экосистемы.

Так как продукты, услуги и сервисы медицинской экосистемы ориентированы, прежде всего, на использование в рамках континуума здоровьесбережения, в цифровой медицинской экосистеме при наличии в централизованных хранилищах сочетания



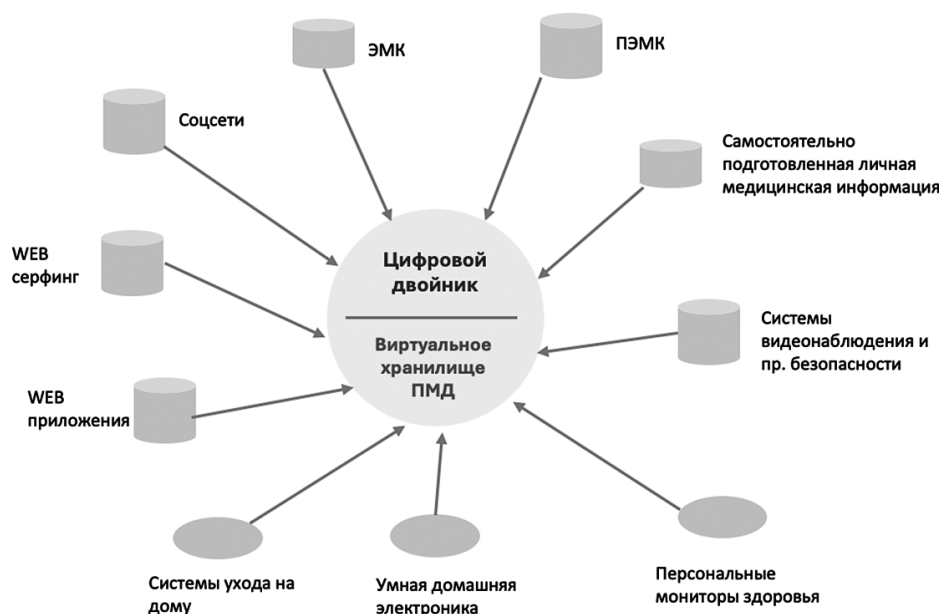


Рис. 1. Типичные источники персональных медицинских данных (ПМД) для формирования цифрового двойника (адаптировано по [28])

данных о текущем состоянии здоровья, полной истории болезни, данных о реальной клинической практике и совокупности доказательств реальной клинической практики (СДРКП, англ. – real world evidence, RWE) [30], а также данных о сетевой активности пациента, преобразуемых в его предпочтения, взгляды и знания в социальном контексте, МО-участники экосистемы смогут предоставить пациенту:

- персонализированную медицинскую помощь;
- улучшенную профилактическую диагностику;
- более эффективное оказание неотложной медицинской помощи;
- отслеживание эффективности лечения;
- прогнозную аналитику изменений в состоянии здоровья и качестве жизни.

Технология цифровых двойников позволит расширить возможности персонализированных медицинских исследований. Их применение в медицине и общественном здравоохранении должно приблизить необходимую радикальную трансформацию традиционных ЭМК, чтобы подготовить их к новой эре прецизионной медицины и общественного здравоохранения [12].

Такое развитие событий меняет бизнес-модель работы МО (поставщика медицинских услуг) с лечебной на профилактическую, которая будет основываться исключительно на данных, поступающих непрерывно в некоторое облачное хранилище, в котором располагается цифровой двойник.

Эта модель профилактической помощи способна изменить подход всей системы здравоохранения к работе с пациентами. Вместо того, чтобы вызывать скорую помощь, система медицинской помощи сама предупредит потребителя о надвигающихся проблемах со здоровьем и окажет необходимую медицинскую помощь в нужное время.

Кроме того, МО могут делиться обработанными данными с другими участниками экосистемы, такими как страховые компании (СК) или сами пациенты. В страховой отрасли эти персонализированные медицинские данные можно использовать для расчёта индивидуальных страховых взносов: более полное представление об общем состоянии здоровья и физической форме потребителя может стать ключом к уменьшению стоимости медицинской страховки для пациентов. На современном рынке СК и сегодня делают то же самое, но с меньшим объёмом данных, а вероятность ошибки при этом выше. В представленной модели СК смогут предлагать индивидуальные страховые планы, о чём сегодня можно только мечтать.

Технология цифровых двойников

Несмотря на то, что технология цифровых двойников считается инновационной, ее история началась еще в 20 веке. На развитие концепции от идеи до практического применения потребовалось время, необходимое для совершенствования



других информационных технологий [31], среди которых стандарты связи между датчиками Интернета вещей, достижения в области хранилищ данных, передачи данных в реальном времени, облачные технологии, ИИ, технологии виртуальной и дополненной реальности. Благодаря развитию других инновационных технологий сферы применения цифровых двойников быстро расширяются.

Сегодня практически невозможно охватить все аспекты темы цифровых двойников не только в медицине, но и в производстве, бизнесе или в других отраслях экономики, поскольку до настоящего времени не существует общих методов, стандартов или правил для разработки ЦД. Более того, хотя сегодня «цифровой двойник» широко известен как ключевой фактор цифровой трансформации большинства отраслей экономики, до сих пор нет единого понимания этого термина. Основной причиной этого является разнообразие специализированных предметных областей в рамках различных отраслей и дисциплин использования.

В литературе имеется множество различных определений термина «цифровой двойник». Общим для всех определений является взаимный обмен данными между физическим объектом и его виртуальной моделью, способствующий нахождению проблем и поиску их решений [31]. В работе [17] цифровой двойник определяется как компьютерный прообраз объекта реального мира, представляющий собой продукт виртуальной реальности, который, благодаря накопленной информации и специальным алгоритмам, может составлять прогнозы поведения своей физической копии и/или бизнес-процессов в режиме реального времени. В другой работе [12] цифровой двойник (или цифровой близнец – англ. digital twin) определяется как виртуальная модель (данные и алгоритмы) с особыми функциями, которых нет в традиционных моделях и симуляциях, и которые динамически связывают физический и цифровой миры, используя интеллектуальные сенсорные технологии, анализ данных и искусственный интеллект.

Основываясь на общем контексте известных определений ЦД, можно выделить общее понимание цифровых двойников как динамического цифрового профиля, содержащего исторические и актуальные данные (возможно не все, а лишь наиболее полезные) о физическом объекте или процессе. ЦД основан на огромном объёме накопленных и непрерывно поступающих новых данных, полученных в ходе измерений целого ряда показателей объекта в реальном мире. Анализ накопленных данных

позволяет получать точную информацию о производительности системы, принимать решения о необходимости внесения изменений как в производимый продукт, так и в процесс производства, что помогает оптимизировать эффективность бизнеса [10].

Одновременно существуют и другие термины (цифровая модель, цифровая тень), которые часто используются как синонимы, а иногда самостоятельно [10]. В здравоохранении термин «цифровой двойник» до настоящего времени также не является строгим и устоявшимся. В отсутствие методологии дифференциации понятий наряду с «цифровым двойником» используются «цифровой профиль пациента», «виртуальная модель пациента (органа)», «аватар пациента» и др. [17]. Разнообразие терминов при их неоднозначной трактовке связано, видимо, в том числе, с продолжающимся интенсивным развитием данного направления в мире.

Мы согласны с выводами исследования [12], что такое разнообразие понятий связано, прежде всего, с тем, что «цифровой двойник» может соотноситься с различными уровнями сложности (степенями абстракции), которые применяются к обработке данных. Уровень сложности цифрового двойника связан с точностью воспроизведения данных, доступным инструментарием сопряженности, а также со встроенной системой обучения и ее автономией (данные и алгоритмы). Главной особенностью цифрового двойника является динамическое двунаправленное отображение объекта или процесса [12], в противном случае, мы имеем дело с цифровой тенью или моделью объекта.

В работе [32], основываясь на общности определений цифрового двойника в любом контексте как цифровых двойников физических объектов, предлагается различать термины «цифровая модель», «цифровая тень» и «цифровой двойник» по уровню интеграции данных между физическим и цифровым аналогом. Так как некоторые цифровые представления моделируются вручную и не связаны с каким-либо реально существующим физическим объектом, в то время как другие полностью интегрированы с обменом данными в режиме реального времени, предлагается следующая классификация цифровых двойников с выделением трёх подкатегорий (рис. 2) в соответствии с их уровнем интеграции данных [32]:

- **цифровая модель** – цифровое представление существующего или планируемого физического объекта, в котором не используется какая-либо форма автоматизированного обмена данными между физическим и цифровым





объектами. Цифровое представление может включать более или менее полное описание физического объекта (включая имитационные модели, например, новых продуктов или услуг), но весь обмен данными осуществляется вручную. Изменение состояния физического объекта не оказывает прямого влияния на цифровой объект, и наоборот;

- **цифровая тень** – цифровое представление существующего или планируемого физического объекта аналогично цифровой модели, но при наличии автоматизированного одностороннего потока данных между физическим и цифровым объектами. Изменение состояния физического объекта приводит к изменению состояния цифрового объекта, но не наоборот;
- **цифровой двойник** – аналогично цифровой тени, но при полной интеграции потоков данных между существующим физическим и цифровым объектами в обоих направлениях. В такой комбинации цифровой объект может выступать в качестве управляющего экземпляра физического объекта. Также могут существовать другие объекты, физические или цифровые, которые вызывают изменения состояния цифрового объекта. Изменение состояния физического объекта напрямую приводит к изменению состояния цифрового объекта, и наоборот.

В дальнейшем мы будем употреблять термины «цифровая модель», «цифровая тень» и «цифровой двойник» в соответствии с предложенной классификацией, но ясно давая себе отчет, что в медицине,

применительно к человеку, корректно говорить лишь об односторонней связи (от физического объекта к цифровой модели), не исключая обратную связь как рекомендацию, но не как прямое управляющее воздействие. Полная двусторонняя интеграция потоков данных, при которой «цифровой объект выступает в качестве управляющего экземпляра физического объекта», в настоящее время невозможна и, с этической точки зрения, недопустима.

Основная идея цифровой модели заключается в том, чтобы имитировать физическую систему с помощью некоторых математических моделей для описания соответствующей структуры или поведения. Характерной особенностью такого моделирования является то, что оно более или менее статично. После ввода необходимых данных оно представляет собой подробную модель физического объекта или структуры и не требует постоянного обновления. Цифровые двойники, в отличие от модели, нуждаются в постоянном вводе данных, касающихся представленной структуры или поведения оригинала, после чего могут обеспечить моделирование в режиме реального времени и обратную связь [29][17].

В медицине термин «двойник» подразумевает тесную связь между объектом (органом) или человеком в целом и его или их симуляцией. Концепция цифрового двойника, в отличие от концепции «модели» или «тени», имеет два отличительных признака [29]:

- во-первых, она строго спроектирована и создана с целью выявления и определения характерных функций моделируемого органа и/или человека, которые и использовались в качестве основы для моделирования, а точнее – создания двойника;

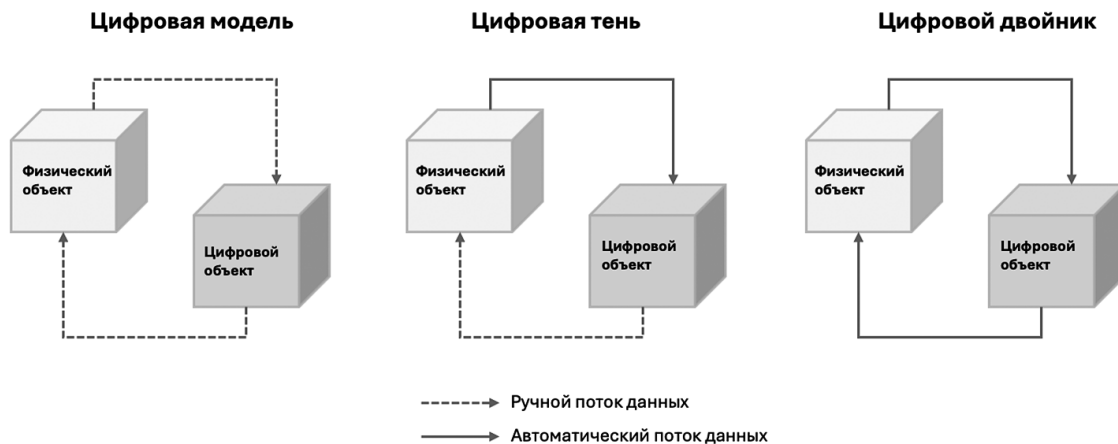


Рис. 2. Подкатегории цифровых двойников (адаптировано по [32])



- во-вторых, что очень важно с этической точки зрения, концепция двойника не ограничивается улучшением диагностики и терапии, а направлена на прогнозирование будущих состояний здоровья или болезней.

Таким образом, цифровых двойников можно использовать для моделирования частей тела или даже всего организма человека, чтобы делать полноценные прогнозы и, в частности, предсказывать будущие события или состояния. То есть прогноз можно адаптировать в соответствии с текущим или будущим образом жизни моделируемого человека, а цифровой двойник может принимать различные формы цифрового воплощения и взаимодействовать с симулируемым человеком, «стучась в его дверь», чтобы предупредить его или предложить изменить образ жизни [29]. Ключевое преимущество всестороннего продвинутого цифрового двойника в отличие от пассивной модели – это активность и способность управлять потоками данных.

Цифровые двойники сочетают в себе ИИ, большие данные и математическое моделирование для прогнозирования будущего и использования потенциальных возможностей [15]. Современная концепция использования технологии ЦД основана (рис. 3) на взаимодействии нескольких сред или слоев (физического, виртуального (цифрового) или программного) [31, 33]:

- **физический слой** – это реальный мир: физические объекты и их действия;
- **цифровой слой** – это виртуальное представление физических объектов и/или процессов;
- **программный слой** – программные приложения, посредством которых объекты обмениваются между собой данными и информацией, объединяя физический и цифровой слои за счет сбора и анализа данных, полученных от физического объекта, их визуализации и/или конфигурирования в цифровом слое, а также воздействия на физический слой при необходимости.

В работах [31, 34, 17] также упоминаются некоторые конструктивные соображения для внедрения цифровых двойников в медицину, среди которых важнейшими являются:

- **простота добавления и удаления источников данных** – возможность включать все доступные на текущий момент персональные медицинские данные, а также исключать те данные, источник которых становится

недоступным по разным причинам (технического и/или политического свойства);

- **возможность добавления контекста** – возможность указывать контекстуальные события, которые могут влиять на данные пациента, так как большинство медицинских данных могут быть релевантно интерпретированы (как людьми, так и алгоритмами) только с учетом контекста. В некоторых случаях контекст мог быть задан с помощью данных, которые по какой-либо причине недоступны в текущий момент времени.

Таким образом, использование технологии ЦД в персонализированной медицине обязательно предполагает, во-первых, учет предпочтений, убеждений, взглядов и знаний пациента в социальном контексте. Учет влияния социальной среды серьезно осложняет возможность цифровой симуляции в здравоохранении. Во-вторых, очевидно, что польза «сырых» данных в контексте цифрового двойника очень ограничена. Данные должны быть не только собраны, проанализированы и визуализированы, но и поняты, верифицированы, а также соотнесены друг с другом. Соответственно, к трем слоям модели цифрового двойника необходимо добавить еще один слой – интеллектуальный.

Интеллектуальный слой или cyber-слой [34], используя алгоритмы машинного обучения, соотносит динамически получаемые данные друг с другом и с ранее сохраненными для понимания и осмысленного включения их в процесс моделирования с определенными целями: клиническими и/или экономическими. Другими словами, не только получает, но и активно управляет потоками данных. Этот слой определяет, каких данных не хватает, какого они должны быть качества, и откуда их можно получить, запрашивает или даже «требует» предоставить недостающие данные. То есть, интеллектуальный слой позволяет определять не только какие данные необходимы для моделирования (так как в наибольшей степени способствуют предсказуемости результатов), но и как сами эти результаты моделирования могут быть оценены.

Очевидно, что для практического применения концепции цифрового двойника в медицине необходим еще один уровень или слой практической реализации – слой решений или СППВР, которая за счет предиктивной аналитики и методов интеллектуального анализа данных прогнозирует изменения в состоянии физического объекта на основе анализа поведения его виртуального представления.



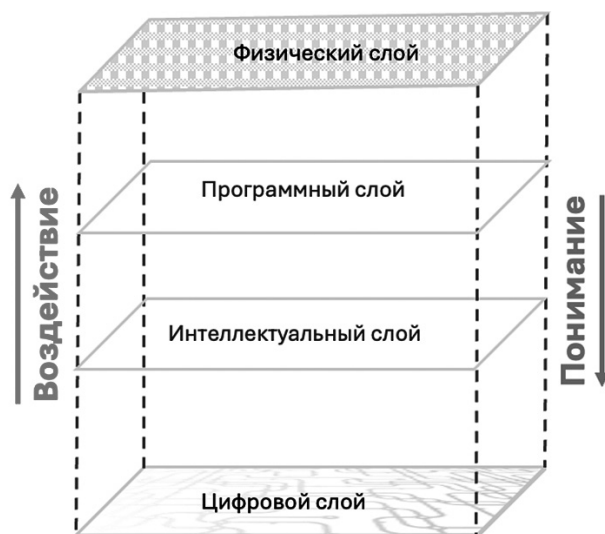


Рис. 3. Схема концепции использования технологии цифровых двойников

Также на этом уровне предлагаются и аннотируются возможные воздействия в автоматическом или автоматизированном режиме. Мы считаем, что интеллектуальная СППВР в общем случае не является структурным элементом технологии цифрового двойника и может быть вынесена за рамки собственно технологии – то есть, в качестве СППВР могут использоваться решения третьих сторон.

Цифровые двойники могут быть созданы как для живых, так и для неодушевленных объектов, и эти вычислительные модели, настраиваясь для отдельных пациентов с использованием множества разнородных потоков данных, могут позволить цифровому двойнику действовать как почти точная копия физического объекта, обеспечивая мониторинг и оценку физического объекта практически в реальном времени. В медицине ЦД может применяться для моделирования работы органа (печень, сердце), системы органов (пищеварительная, выделительная системы), тканей, а также на клеточном и субклеточном уровнях, что позволит исследовать вопросы лекарственного взаимодействия, эффективности и безопасности лечения. Цифровой двойник может моделировать процесс протекания или распространения заболевания, реакции пациента на лечение [12].

Также могут создаваться эталонные цифровые близнецы или прото-близнецы, которые послужат шаблонами или архетипами для создания более сложных, индивидуальных цифровых близнецов каждого типа [12]. Предполагается, что сложные цифровые двойники, например, человека, будут

объединять несколько разных типов. Учреждения здравоохранения (например, больница или поликлиника) также могут иметь своих цифровых двойников медицинской организации или структурных подразделений для лучшего планирования, мониторинга и оптимизации их работы [12, 15, 17].

В заключении по данному разделу следует сказать, что широкое использование термина «цифровой двойник» в медицине – это часто маркетинговое преувеличение, призванное сделать технологию более яркой и инвестиционно-привлекательной; либо обозначение направления развития (технология), то есть речь идет о том, к чему мы стремимся (создать максимально точную динамическую модель), а не о том, что есть сейчас. То, что сегодня называют «цифровым двойником пациента», в лучшем случае соответствует определению «цифровой тени» (англ. digital shadow) из данного раздела, подразумевающей:

- односторонний поток данных от пациента (с носимых устройств, из ЭМК, опросов и т.п.), поступающий в цифровую модель;
- обратную связь в виде рекомендаций, а не команд: модель, основанная на ИИ, может проанализировать данные, спрогнозировать риски и сгенерировать рекомендацию для врача и/или пациента. Но конечное решение – принять таблетку, записаться к врачу, изменить образ жизни – всегда остается за человеком (врачом и пациентом).

Таким образом, цифровым двойником будем называть модель физического объекта или процесса, которая обновляется в реальном времени на основе данных с датчиков и других источников информации, позволяя моделировать, анализировать и оптимизировать поведение оригинала. Следуя определениям различий между терминами «цифровая модель», «цифровая тень» и «цифровой двойник» по уровню интеграции данных между физическим и цифровым аналогом, цифровых двойников пациента лучше называть «цифровыми профилями» или «цифровыми тенями» пациента. Это не умаляет их потенциальной пользы, но зато описывает их реальную суть без этически рискованных и технически некорректных спекуляций.

Проблемы внедрения технологии цифровых двойников пациентов в практическую медицину

Ввиду увлечения сообщества сферы производства и потребления товаров и услуг технологиями ИИ, можно с большой долей уверенности



утверждать, что в ближайшее время популярность ЦД будет возрастать, так как предприятия и бизнес-экосистемы будут внедрять технологию с целью повышения эффективности деятельности и конкурентоспособности. Несмотря на проблемы, присущие трансферу этой технологии в здравоохранение, преимущества, наблюдаемые в других отраслях экономики, указывают и здесь на многообещающее будущее, главным образом, в доклинических областях, таких как управление цепочками поставок или ресурсами МО: координация всех бизнес-процессов МО (оптимизация загрузки коечного фонда, построение логистических цепочек, организация экосистемных партнерств и пр.) [17]. То есть, скорейших результатов следует ожидать в логистике/управлении повседневной деятельностью (планирование, маршрутизация, выставление счетов, обработка претензий и общение с пациентами) медицинских организаций, а не в таких важных клинических областях, как диагностика и терапия, где использование цифровых двойников в принятии клинических решений является более сложным и менее последовательным при внедрении [35].

Реализация технологии ЦД в медицине сталкиваются с рядом проблем [35, 36]:

1. Конфиденциальность информации:

защита конфиденциальности пациентов имеет первостепенное значение в здравоохранении и является еще более серьезной проблемой, когда речь идет о цифровых двойниках. Если физические и умственные (при этом сильные и слабые) стороны каждого человека будут доступны для публичного анализа, это может привести к непредсказуемым последствиям. Несмотря на то, что существуют способы защиты данных, такие как шифрование, контроль доступа, блокчейн и пр. – их внедрение, настройка и конфигурирование требуют много времени и ресурсов, а результат, по-прежнему, не гарантирован.

2. Точность данных: медицинские данные часто включают записи, сделанные вручную или основанные на суждениях, без непрерывных объективных и точных измерений, которые наблюдаются на производстве.

3. Доступность данных: данные поступают из различных систем и форматов, включая ЭМК, медицинские устройства и административные базы данных. Их сбор и интеграция в цифрового двойника являются серьезной проблемой. МО часто не располагают всеобъемлющими данными о своих процессах и пациентах, которые необходимы для

точного и непредвзятого функционирования цифровых двойников. Более того, доступ к потокам данных в режиме реального времени для цифровых двойников добавляет еще один уровень сложности к сбору данных в медицине. Задача разработки цифрового двойника пациента или процесса может настолько усложнить сбор данных (например, мониторинг состояния здоровья и течения заболевания пациентов в больнице), что станет экономически нецелесообразной [37].

4. Интегрируемость: совместимость цифровых двойников с имеющимися системами медицинской помощи. Цифровым двойникам необходимо будет взаимодействовать и интегрироваться с используемыми в настоящее время МИС и ЭМК, чтобы обеспечить бесперебойную и эффективную медицинскую помощь. Такая интеграция потребует стандартизации форматов данных и протоколов связи между различными системами, в том числе для «старых» МИС МО, имеющих большую историю эксплуатации. Стандартизация и интеграция данных для создания единого цифрового двойника – непростая задача.

5. Агрегация данных вокруг уникального пациента: эпизодичность медицинской помощи, раздробленность инфраструктуры здравоохранения чрезвычайно затрудняют проектирование ЦД конкретного пациента с учетом его характерных особенностей и функций. В условиях отсутствия единого индекса пациентов, например в РМИС, или безусловных идентификаторов медицинских записей, например СНИЛС, гармонизация МИС МО, владеющих ЭМК пациентов, или других операторов персональных медицинских данных (ПМД) является непростой задачей.

6. Инфраструктура подключения пациента к цифровому объекту: для того, чтобы разобраться в огромных потоках данных, требуется объединение разных ИТ-технологий:

- сложное сочетание передовых вычислений (облачных, туманных и периферийных) для получения из высокоскоростного потока данных важных сигналов и принятия незамедлительных мер;
- высокоскоростные платформы обработки данных для анализа больших объемов потоковых данных практически в режиме реального времени и последующего хранения;
- мультимодальное хранение и слияние данных для интеллектуального объединения данных разной природы и формы представления





с синтезом новой информации о здоровьесбережении [38];

- машинное обучение – использование перовой аналитики для выявления закономерностей и тенденций, а также выработки рекомендаций по действиям.

7. Влияние окружающего сообщества и образа жизни: сбор таких данных может представлять нетривиальную задачу, в то же время социальная среда влияет не только на формирование привычек и образа жизни, но и оказывает значительное влияние на здоровье человека, что мы уже отмечали. Кроме того, люди из неблагополучных социальных групп могут сталкиваться с ограничениями доступа к медицинским услугам, что может привести к ухудшению здоровья и развитию хронических заболеваний.

8. Адаптация к новым методам работы и принятия решений: нелинейный процесс принятия цифровых двойников сообществом врачей и пациентов, позволяющий в полной мере использовать преимущества технологии. Как врачам, так и пациентам необходимо доверять используемой технологии. Обеспечить прозрачность работы технологии цифровых двойников и продемонстрировать ее эффективность и безопасность может быть непросто.

9. Этические проблемы: есть опасения, что распространение технологии цифрового двойника может усугубить социальные различия. Маловероятно, что цифровые двойники, будут доступны в системе ОМС (читай – для малообеспеченных слоев населения), пока, по крайней мере, стоимость их внедрения не станет приемлемой вследствие широкого распространения технологии. Это означает, что более состоятельные слои общества смогут улучшить свою жизнь с помощью цифровых двойников, в то время как менее обеспеченные слои не будут иметь доступа к этой технологии. Недостаточный учет социального окружения и образа жизни при анализе данных может привести к дискриминации отдельных социальных слоев [15].

10. Вычислительные проблемы: создание цифрового двойника пациента и его эксплуатация требуют значительных вычислительных мощностей, так как речь идет об обработке данных в режиме реального времени и сложном прогностическом моделировании. Не только не все системы медицинской помощи в нашей стране (федеральная, муниципальные, ведомственные, коммерческие), но и не все системы здравоохранения в мире

в настоящее время располагают инфраструктурой для поддержки создания и эксплуатации цифровых двойников пациентов.

Очевидно, что одним из основных препятствий в здравоохранении для интеграции цифровых двойников пациента в клиническую практику, в отличие от промышленного производства, где ЦД легко получают любые производственные показатели, является доступность качественных данных и возможность их агрегирования вокруг одного пациента. Одним из основных источников ДРКП являются ЭМК [13]. К сожалению, до настоящего времени для извлечения ДРКП из ЭМК с приемлемым для дальнейшего анализа и исследований качеством необходимо предпринимать ряд сложных технических и организационных мер, включая организацию централизованного сбора записей из распределенных ЭМК в различных МО, включая поликлиники и стационары [23].

Хотя активное развитие технологий ИИ, включая машинное обучение, позволяет автоматизировать обработку неструктурированных записей ЭМК, получая из них пригодные для анализа данные, а полученные в работе [23] результаты свидетельствуют, что анализ и извлечение ДРКП из ЭМК позволяет создавать большие наборы структурированных данных, улучшение качества формирования и ведения ЭМК – одна из ключевых задач, которая на сегодня должна стоять перед разработчиками МИС и руководителями в сфере здравоохранения [23]. Причем, в большей степени – перед руководителями здравоохранения, так как качество ЭМК в МИС МО во многом определяется качеством решений, применяемых в МИС, и ее зрелостью, а вот способ применения решений МИС регламентируется целиком руководством МО или регионального здравоохранения, если речь идет о РМИС. Кроме того, разработчики МИС не стоят на месте и, по мере распространения систем ИИ, будут заниматься совершенствованием качества данных в ЭМК, чтобы помочь МО коммерциализировать собственные анонимизированные ЭМК в качестве одного из универсальных источников данных для обучения систем ИИ. Возможно мы должны прийти, наконец, к стандартизации медицинской записи как основной аналитической единицы клинической информации.

Чтобы ЭМК в МИС МО стали источником качественных данных, нужно решить проблему скорости и/или объема заполнения ЭМК врачом. Все мы прекрасно знаем, что применение в МИС функций копирования однажды внесённых данных в новые



записи, возможность вносить данные в неструктурированном виде и прочие недостатки конкретных ЭМК связаны, в первую очередь, с запросами пользователей, основанными на желании сократить время на ведение медицинской документации, и решениями идущих у них на поводу руководителей МО, без подписи которых не будет закрыт ни один акт на внедрение МИС МО. Эту проблему можно решить только на уровне регулятора, который должен сформулировать требования по качеству ведения ЭМК: от требований по использованию нормативно-справочной информации (НСИ) при вводе данных до правил регистрации хронических заболеваний в реалиях цифрового здравоохранения и описания условий форматно-логического контроля. Это в значительной степени будет способствовать изменению концепции, согласно которой ЭМК, в первую очередь, используются в клинической практике, и только во вторую – в клинических исследованиях [39].

В то же время, по мнению некоторых экспертов, именно в системе здравоохранения цифровые двойники смогут полностью раскрыть свой потенциал [17], в частности, в контуре такого магистрального направления, как развитие персонализированной медицины, которая может быть определена также как подход к лечению, основанный на комплексной, повсеместной, дифференцированной и адаптивной стратегии, учитывающей генетические особенности, образ жизни и окружающую среду пациента при выборе и назначении лечения, адаптированного к индивидуальным потребностям и течению заболевания пациента. Например, в настоящее время цифровые двойники используются для развития персонализированной медицины с помощью генетических или молекулярных маркеров для выявления конкретных диагнозов и соответствующих методов лечения [37, 40]. Такое применение ЦД представляет собой значительное отступление от традиционного подхода, основанного на усреднённых показателях, и позволяет применять более персонализированные и эффективные методы лечения для отдельных пациентов [15].

Несмотря на то, что большинство составляющих технологию цифрового двойника компонентов уже разработаны и используются по отдельности, их быстрое внедрение в клиническую практику отстает почти во всех областях медицины, а большинству компаний-разработчиков не хватает специализации, необходимой для объединения всех этих компонентов в эффективные комплексные решения.

Кроме того, они сталкиваются с такими проблемами, как дороговизна технологии, отсутствие квалифицированных кадров и нормативных документов, сопровождающих внедрение концепции [31]: прежде чем цифровых двойников можно будет использовать для лечения пациентов, их эффективность и безопасность должны быть подтверждены реальными исследованиями, а сами они приняты и утверждены экспертным сообществом, состоящим из врачей, пациентов, руководителей МО, политиков, ИТ-специалистов, правительства и т.д. Это включает в себя разработку стандартов безопасности данных и обмена данными. Для обеспечения защиты прав пациентов необходима также разработка этических рекомендаций и регламентов по использованию цифровых двойников в здравоохранении, включая информированное согласие пациентов [15].

Кроме того, для разработки инструментов цифрового двойника в медицине необходимо вовлечение всех заинтересованных сторон для учета соответствующих требований и отзывов, при использовании инструментов цифрового двойника на практике. В частности, для создания ЦД (и, вообще, систем ИИ) в медицине требуются изменения в законе о персональных данных, который создает много проблем при обмене медицинскими данными, а принятый сегодня для регистрации ИИ в качестве медицинского изделия третий класс риска демонстрирует неоправданный страх перед новой технологией, который, тем не менее, уживается с высокой заинтересованностью в ее внедрении [24]. Наконец, для успешного внедрения этой технологии крайне важно обучать врачей и пациентов использованию и интерпретации данных ЦД. Врачи должны уметь понимать и использовать данные цифрового двойника для оказания персонализированной и эффективной помощи пациентам, а сами пациенты должны научиться принимать результаты использования цифровых двойников с учетом всех моральных и этических соображений. Таким образом, несмотря на значительный прогресс в процессе интеграции цифровых двойников в здравоохранение, по-прежнему остается множество проблем, которые необходимо решить, чтобы эта технология получила широкое распространение и стала полезной для пациентов и общества.

Заключение

Реактивная «лечебная» модель медицинской помощи исчерпала свой потенциал. Растущее бремя хронических заболеваний, разрозненность данных,





экономическое давление и дефицит кадров требуют смены парадигмы. Ответом на эти вызовы становится переход к проактивной, профилактической модели, краеугольным камнем которой является глубокая медицина – подход, использующий технологии ИИ и большие данные не для замены врача, а для усиления его человеческих качеств, возвращая в центр медицинской практики эмпатию и углубленное взаимодействие с пациентом.

Реализовать эту трансформацию силами отдельной МО принципиально невозможно. Ключом к успеху служит синергия двух преобразующих сил: платформенной цифровой экосистемы, преодолевающей фрагментацию и технологическую разобщенность, и технологии цифровых двойников пациента, обеспечивающей глубокий уровень понимания на основе совокупности всех доступных данных о его здоровье, образе жизни и социальном контексте. Именно цифровой двойник, выступая динамическим цифровым профилем, превращает разрозненные данные в целостную, персонализированную модель, позволяющую прогнозировать риски и управлять здоровьем, а не болезнями.

Однако, путь внедрения этой концепции сопряжен с комплексом серьезных, взаимосвязанных барьеров. Проблемы качества, доступности и агрегации данных (включая фундаментальные недостатки ЭМК как источников ДРКП), информационной безопасности и конфиденциальности, этические дилеммы, сложность интеграции с существующей ИТ-инфраструктурой и необходимость культурной адаптации медицинского сообщества – все это формирует «пропасть» между многообещающей концепцией и ее практической

реализацией. Становится очевидным, что преодоление этих барьеров невозможно путем точечных усовершенствований – оно требует системного архитектурного подхода, который рассматривал бы технологические, организационные и регуляторные аспекты как единое целое. Таким образом, реализация высокого потенциала профилактической модели, основанной на синергии глубокой медицины, цифровых экосистем и цифровых двойников, требует целостной технологической структуры, способной обеспечить безопасный, масштабируемый и совместимый обмен данными, их аналитику и превращение в практические рекомендации.

Построению такой структуры, решающей обозначенные проблемы в рамках единой архитектуры цифровой медицинской экосистемы, будет посвящена вторая часть настоящего исследования, в которой предложим рабочую модель реализации и внедрения технологии цифрового двойника, которая способна уменьшить влияние перечисленных проблем, облегчить выполнение соответствующих стратегических задач, обеспечить поддержку профилактической модели работы и принципов глубокой медицины. Данная модель – это поиск и предложение новых путей создания ценностей, повышения эффективности каждой МО и совместное развитие (эволюция) всех участников. Она обеспечивает внедрение технологии не только на уровне региона или ведомства, но и на уровне самостоятельного объединения МО в рамках цифровой медицинской экосистемы, представляющей собой переосмысление бизнес-моделей и опыта взаимодействий с пациентами.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Junaid Bajwa, Usman Munir, Aditya Nori and Bryan Williams.* Artificial intelligence in healthcare: transforming the practice of medicine. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/353288517_Artificial_intelligence_in_healthcare_transforming_the_practice_of_medicine. (Доступ: 24.01.2025). DOI: 10.7861/fhj.2021-0095
2. *Subbiah V.* The next generation of evidence-based medicine. *Nat Med* 29, 49–58 (2023). [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1038/s41591-022-02160-z> (Доступ: 28.03.2025).
3. *Ongwere, Tom & Berry, Andrew & Caldeira, Clara & Arriaga, Rosa & Ayobi, Amid & Burgess, Eleanor & Connelly, Kay & Franklin, Patricia & Miller, Andrew & Min, Aehong & Verdezoto, Nervo.* (2022). Challenges, Tensions, and Opportunities in Designing Ecosystems to Support the Management of Complex Health Needs. 1–7. 10.1145/3491101.3503714.
4. National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion (NCCDPHP). Health and Economic Costs of Chronic Diseases. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cdc.gov/chronicdisease/programs-impact/pop/index.htm> (2022) (Доступ: 28.03.2025).
5. *MacMahon S., Calverley P., Chaturvedi N., Chen Z., Corner L., Davies M., Ezzati M., Guthrie B., Hanson K., Jha V. and others.* 2018. Multimorbidity: a priority for global health research. Technical Report. The Academy of Medical Sciences // [Цифровой ресурс]. URL: <https://acmedsci.ac.uk/file-download/82222577> (Доступ: 30.03.2025).



6. *Topol E.J.* Editor. Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again. New York: Basic Books, 2019.
7. *Тополь Э.* Искусственный интеллект в медицине: Как умные технологии меняют подход к лечению. Москва, Альпина Паблишер, 2022. 400 с. ISBN 978-5-9614-2920-6.
8. Глубокая медицина: может ли ИИ помочь вашему врачу понять вас? [Электронный ресурс] URL: <https://smart-lab.ru/blog/723357.php> (Доступ: 23.04.2025).
9. Деер-медицина. Как искусственный интеллект может вернуть здравоохранению человечность. Эрик Тополь. [Электронный ресурс] URL: <https://smart-lab.ru/blog/723357.php> (Доступ: 23.04.2025).
10. *Михеев А.Е.* Перспективы создания цифровых медицинских экосистем в России: цифровые двойники и другие технологии, проблемы и подходы. // Менеджер здравоохранения. 2024; S:4–32. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-S-4-32.
11. *Белышев Д.В., Гулиев Я.И., Михеев А.Е.* Цифровая экосистема медицинской помощи. // Врач и информационные технологии, № 5, 2018, с. 4–17.
12. *Зуенкова Ю.А.* Опыт и перспективы применения цифровых двойников в общественном здравоохранении // Менеджер здравоохранения. 2022; 6: 69–77. DOI: 10.21045/1811-0185-2022-6-69-77.
13. *Гусев А.В., Зингерман Б.В., Тюфилин Д.С., Зинченко В.В.* Электронные медицинские карты как источник данных реальной клинической практики. Реальная клиническая практика: данные и доказательства. 2022;2 (2):8–20. <https://doi.org/10.37489/2782-3784-nivrd-13>.
14. Клиника «Медицина»: эффекты и разочарования цифровизации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osp.ru/articles/2024/1113/13058941> (Доступ: 28.03.2025).
15. *Siddharth Ghatti, Livvy Ann Yurish, Haiying Shen, Karen Rheuban, Kyle Enfield, Nikki Reyer Facticeau, Gina Engel, Kim Dowdell.* Digital Twins in Healthcare: A Survey of Current Methods. Archives of Clinical and Biomedical Research. 7 (2023): 365–381.
16. *Vallee A.* (2023) Digital twin for healthcare systems. Front. Digit. Health 5:1253050. doi:10.3389/fdgth.2023.1253050. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/373744374_Digital_twin_for_healthcare_systems (Доступ: 28.03.2025).
17. *Кобякова О.С., Стародубов В.И., Куракова Н.Г., Цветкова Л.А.* Цифровые двойники в здравоохранении: оценка технологических и практических перспектив. Вестник РАМН. 2021;76(5):476–487. doi: <https://doi.org/10.15690/vramn1717>.
18. *Михеев А.Е.* МИС как бизнес-платформа цифровой экосистемы медицинской помощи. // Менеджер здравоохранения. 2022; S: 5–22. DOI: 10.21045/1811-0185-2022-S-5-22.
19. *Куликова И.Ю., Уланов Е.А.* Архитектура предприятия: учеб. пособие / Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столето-вых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2020. – 124 с. ISBN 978-5-9984-1112-0.
20. *Masuda Y., Zimmermann A., Viswanathan M., Bass M., Nakamura O., Yamamoto S.* Adaptive Enterprise Architecture for the Digital Healthcare Industry: A Digital Platform for Drug Development. Information 2021, 12, 67. <https://doi.org/10.3390/info.12020067>
21. *Zimmermann, Alfred & Schmidt, Rainer & Sandkuhl, Kurt & Jugel, Dierk & Bogner, Justus & Möhring, Michael.* (2018). Evolution of Enterprise Architecture for Digital Transformation. 87–96. 10.1109/EDOCW.2018.00023. [Электронный ресурс] URL: <https://www.researchgate.net/publication/328993200> (Доступ: 09.11.2024).
22. *Сиротин Д.В.* Технологическая структура российской промышленности и индустриальных регионов РФ // Векторы благополучия: экономика и социум. 2023. № 3 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskaya-struktura-rossiyskoy-promyshlennosti-i-industrialnyh-regionov-rf> (Дата обращения: 25.04.2025).
23. *Гусев А.В., Гольдина Т.А.* Анализ данных реальной клинической практики, извлеченных из электронных медицинских карт в платформе Webiomed. Врач и информационные технологии. 2024; 3: 44–61. doi: 10.25881/18110193_2024_3_44.
24. *Борис Зингерман.* Не единая Россия: что не так с цифровизацией здравоохранения. [Электронный ресурс] URL: <https://www.forbes.ru/healthcare/535926-ne-edinaa-rossia-cto-ne-tak-s-cifrovizaciej-zdravoohranenia>. (Доступ: 15.05.2025).
25. *Михеев А.Е.* Подходы к разработке концептуальной модели архитектуры цифровой медицинской экосистемы. // Менеджер здравоохранения. 2024; S:33–52. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-S-33-52.
26. *Михеев А.Е.* Подход к внедрению систем поддержки принятия врачебных решений на принципах сервис ориентированной архитектуры с использованием сервисов цифровой медицинской экосистемы. // Менеджер здравоохранения. 2024; S:101–118. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-S-101-118.
27. Графеновые татуировки: что это такое и как они спасают жизни // [Цифровой ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/902130/>. (Доступ: 22.04.2025).
28. *Uday Kiran Kotla, Jinni Jane.* Digital healthcare ecosystem// [Цифровой ресурс]. URL: <https://www.infosys.com/digital/white-papers/Documents/digital-healthcare-ecosystem.pdf> (Доступ: 30.03.2025).
29. *Braun M.* Represent me: please! Towards an ethics of digital twins in medicine. J Med Ethics. 2021;47:394–400. doi: <https://doi.org/10.1136/medethics-2020-106134>. [] URL: https://www.researchgate.net/publication/350081467_Represent_me_please_Towards_an_ethics_of_digital_twins_in_medicine (Доступ: 29.03.2025).
30. *Гольдина Т.А., Суворов Н.И.* Исследования рутинной клинической практики: от получения данных к оценке медицинских технологий и принятию решений в здравоохранении. Медицинские технологии. Оценка и выбор. 2018; 1(31): 21–29.
31. *Сосфенов Д.А.* Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. –2023. – № 4. – С. 35–43. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-35>.
32. *Kritzing W., Karner M., Traar G. et al.* Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification, IFAC-PapersOnLine, 2018. – Vol. 51. – No. 11. – P. 1016–1022. [Electronic resource]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021> (Accessed: 12.10.2024 r).





33. От моделей до предсказаний: что могут цифровые двойники и кто их создает/ [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/Y3yAqsYT93qWjCoQ?ysclid=m6krzigoig797004267> (Доступ: 26.03.2025).
34. Schwartz S.M., Wildenhaus K, Bucher A., Byrd B. Digital twins and the emerging science of self: Implications for digital health experience design and «small» data. *Front. Comput. Sci.* 2020, 2, 3/ [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/346217932_Digital_Twins_and_the_Emerging_Science_of_Self_Implications_for_Digital_Health_Experience_Design_and_Small_Data (Доступ: 26.03.2025).
35. Alexandra Ezhova. Digital twins in healthcare: practical lessons from a Canadian hospital, 26.06.2024. [Электронный ресурс] UR: <https://www.anylogic.com/blog/digital-twins-in-healthcare-practical-lessons-from-a-canadian-hospital/> (Доступ: 26.03.2025).
36. Digital Twins in Healthcare: How Can Patients And Doctors Benefit From Them? [Электронный ресурс]. URL: <https://pixelpex.io/blog/digital-twins-healthcare/> (Доступ: 26.03.2025).
37. Voigt I., Inojosa H., Dillenseger A. et al. Digital twins for multiple sclerosis, *Front. Immunol.*, 2021, vol. 12, p. 1556. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/immunology/articles/10.3389/fimmu.2021.669811/full>. (Доступ: 12.10.2024).
38. Михненко П.А. Анализ мультимодальных данных в управлении проектами: перспективы использования машинного обучения. *Управленческие науки = Management Sciences in Russia.* 2023;13(4):71–89. DOI: 10.26794/2404-022X-2023-13-4-71-89
39. Yamamoto K., Yamanaka K., Hatano E. et al. An eClinical trial system for cancer that integrates with clinical pathways and electronic medical records. *Clin Trials* 2012;9:408–17. [Электронный ресурс] URL: <https://www.researchgate.net/publication/224979764>. (Доступ: 15.05.2025).
40. Fagherazzi G. Deep digital phenotyping and digital twins for precision health: time to dig deeper. *Journal of Medical Internet Research* 22 (2020): e6770.
41. Yamamoto K., Sumi E., Yamazaki T. et al. A pragmatic method for electronic medical record-based observational studies: developing an electronic medical records retrieval system for clinical research. *B MJ Open.* 2012; 2: e001622. doi: 10.1136/bmjopen-2012-001622. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/232765475>. (Доступ: 15.05.2025).

ORIGINAL PAPER

THE TECHNOLOGICAL STRUCTURE OF DEEP MEDICINE AS PART OF A SMART MEDICAL ECOSYSTEM. PART 1: CHALLENGES OF MODERN HEALTHCARE AND THE TARGET CONCEPT OF A PREVENTIVE MODEL BASED ON DIGITAL TWINS

A.E. Mikheev ✉

Ailamazyan Program Systems Institute of RAS, Pereslavl-Zalesskiy, Russia.
<https://orcid.org/0000-0002-4777-2732>.

✉ Corresponding author: Mikheev A.E.

ABSTRACT

Modern healthcare faces unprecedented challenges: rising costs, staff shortages, fragmentation of data and infrastructure, and the increasing burden of chronic diseases. This necessitates a transition from a reactive, «treatment-based» model to a proactive, preventive one. This work is the first part of a study dedicated to the technological foundations of «deep medicine», the essence of which is the use of artificial intelligence to enhance the human aspects of medical practice, not to replace them.

Aim: to conduct a critical analysis of the existing healthcare paradigm and substantiate the strategic necessity of transitioning to a proactive, preventive model. To provide a detailed introduction and terminological clarification of the key concepts forming the basis for the proposed solution: «deep medicine», the digital medical ecosystem, and digital twin technology.

Materials and methods. An analysis of modern challenges and critical pain points in the healthcare system was conducted. The concepts of deep medicine and digital twin technology were examined in detail, including in the context of their implementation within a digital medical ecosystem.

Results. It is shown that the implementation of deep medicine principles is only possible by combining two factors: 1) a unified platform ecosystem that overcomes data fragmentation, and 2) digital twin technology that transforms big data into personalized knowledge. The terminology («digital model», «digital shadow», «digital twin») was clarified, and it was substantiated that in medicine, concerning a patient, the term «digital shadow» is correct, providing a one-way data flow and feedback in the form of recommendations. A complex of key implementation problems was identified and systematized, including issues of data quality, confidentiality, integration, ethics, and computational power.

Conclusion and perspectives. The first part of the research substantiates the inevitability of a paradigm shift and forms a conceptual and terminological foundation. The identified barriers demonstrate that overcoming them requires a holistic systemic approach, not just point solutions. The development of a specific architectural solution – a technological structure for a smart medical ecosystem designed to implement the announced preventive model – will be the focus of the second part of this research.

Keywords: deep medicine, digital ecosystem, digital twin, digital shadow, preventive medicine, personalized medicine, healthcare challenges.

For citation: Mikheev A.E. The technological structure of deep medicine as part of a smart medical ecosystem. Part 1: Challenges of modern healthcare and the target concept of a preventive model based on digital twins. *Manager Zdravoochranenia.* 2025; 12:101–120. DOI: 10.21045/1811-0185-2025-12-101-120



REFERENCES

1. Junaid Bajwa, Usman Munir, Aditya Nori and Bryan Williams. Artificial intelligence in healthcare: transforming the practice of medicine. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/353288517_Artificial_intelligence_in_healthcare_transforming_the_practice_of_medicine. (Accessed: 24.01.2025). DOI: 10.7861/ftj.2021-0095
2. Subbiah V. The next generation of evidence-based medicine. *Nat Med* 29, 49–58 (2023). [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41591-022-02160-z> (Accessed: 28.03.2025).
3. Ongwere, Tom & Berry, Andrew & Caldeira, Clara & Arriaga, Rosa & Ayobi, Amid & Burgess, Eleanor & Connelly, Kay & Franklin, Patricia & Miller, Andrew & Min, Aehong & Verdezoto, Nervo. (2022). Challenges, Tensions, and Opportunities in Designing Ecosystems to Support the Management of Complex Health Needs. 1–7. 10.1145/3491101.3503714.
4. National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion (NCCDPHP). Health and Economic Costs of Chronic Diseases. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/chronicdisease/programs-impact/pop/index.htm> (2022) (Accessed: 28.03.2025).
5. MacMahon S., Calverley P., Chaturvedi N., Chen Z., Corner L., Davies M., Ezzati M., Guthrie B., Hanson K., Jha V. and others. 2018. Multimorbidity: a priority for global health research. Technical Report. The Academy of Medical Sciences. [Digital resource]. Available: <https://acmedsci.ac.uk/file-download/82222577> (Accessed: 30.03.2025).
6. Topol E.J. Editor. Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again. New York: Basic Books, 2019.
7. Topol E. Artificial Intelligence in Medicine: How Smart Technologies are Changing the Treatment Approach. Moscow, Alpina Publisher, 2022. 400 p. ISBN 978-5-9614-2920-6. (In Russ.)
8. Deep Medicine: Can AI Help Your Doctor Understand You? [Online]. Available: <https://smart-lab.ru/blog/723357.php> (Accessed: 23.04.2025). (In Russ.)
9. Deep Medicine. How Artificial Intelligence Can Restore Humanity to Healthcare. Eric Topol. [Online]. Available: <https://smart-lab.ru/blog/723357.php> (Accessed: 23.04.2025). (In Russ.)
10. Mikheev A.E. Prospects for Creating Digital Medical Ecosystems in Russia: Digital Twins and Other Technologies, Problems and Approaches. // *Health Care Manager*. 2024; S:4–32. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-S-4-32. (In Russ.)
11. Belyshev D.V., Guliev Ya.I., Mikheev A.E. Digital Healthcare Ecosystem. // *Physician and Information Technologies*, No. 5, 2018, p. 4–17. (In Russ.)
12. Zuenkova Yu.A. Experience and Prospects of Using Digital Twins in Public Health. // *Health Care Manager*. 2022; 6: 69–77. DOI: 10.21045/1811-0185-2022-6-69-77. (In Russ.)
13. Gusev A.V., Zingerman B.V., Tyufilin D.S., Zinchenko V.V. Electronic Medical Records as a Source of Real-World Clinical Practice Data. *Real Clinical Practice: Data and Evidence*. 2022;2 (2):8–20. <https://doi.org/10.37489/2782-3784-nivrwd-13>. (In Russ.)
14. “Meditsina” Clinic: Effects and Disappointments of Digitalization. [Online]. Available: <https://www.osp.ru/articles/2024/1113/13058941> (Accessed: 28.03.2025). (In Russ.)
15. Siddharth Ghatti, Livvy Ann Yurish, Haiying Shen, Karen Rheuban, Kyle Enfield, Nikki Reyer Facticeau, Gina Engel, Kim Dowdell. Digital Twins in Healthcare: A Survey of Current Methods. *Archives of Clinical and Biomedical Research*. 7 (2023): 365–381.
16. Vallee A. (2023) Digital twin for healthcare systems. *Front. Digit. Health* 5:1253050. doi:10.3389/fdgth.2023.1253050. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/373744374_Digital_twin_for_healthcare_systems (Accessed: 28.03.2025)
17. Kobayakova O.S., Starodubov V.I., Kurakova N.G., Tsvetkova L.A. Digital Twins in Healthcare: Assessment of Technological and Practical Prospects. *Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2021;76(5):476–487. doi: <https://doi.org/10.15690/vramn1717>. (In Russ.)
18. Mikheev A.E. MIS as a Business Platform for the Digital Healthcare Ecosystem. // *Health Care Manager*. 2022; S: 5–22. DOI: 10.21045/1811-0185-2022-S-5-22. (In Russ.)
19. Kulikova I.Yu., Ulanov E.A. Enterprise Architecture: Textbook / Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs. – Vladimir: VIGU Publishing House, 2020. – 124 p. ISBN 978-5-9984-1112-0 (In Russ.)
20. Masuda Y., Zimmermann A., Viswanathan M., Bass M., Nakamura O., Yamamoto S. Adaptive Enterprise Architecture for the Digital Healthcare Industry: A Digital Platform for Drug Development. *Information* 2021, 12, 67. <https://doi.org/10.3390/info12020067>
21. Zimmermann, Alfred & Schmidt, Rainer & Sandkuhl, Kurt & Jugel, Dierk & Bogner, Justus & Muhring, Michael. (2018). Evolution of Enterprise Architecture for Digital Transformation. 87–96. 10.1109/EDOCW.2018.00023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/328993200> (Accessed: 09.11.2024).
22. Sirotin D.V. Technological Structure of Russian Industry and Industrial Regions of the Russian Federation // *Vectors of Well-being: Economics and Society*. 2023. No. 3 (50). Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskaya-struktura-rossiyskoy-promyshlennosti-i-industrialnyh-regionov-rf> (Accessed: 25.04.2025). (In Russ.)
23. Gusev A.V., Goldina T.A. Analysis of Real-World Clinical Practice Data Extracted from Electronic Medical Records in the Webiomed Platform. *Physician and Information Technologies*. 2024; 3: 44–61. doi: 10.25881/18110193_2024_3_44. (In Russ.)





24. Boris Zingerman. Not a Unified Russia: What's Wrong with the Digitalization of Healthcare. [Online]. Available: <https://www.forbes.ru/healthcare/535926-ne-edinaa-rossia-cto-ne-tak-s-cifrovizaciej-zdravoohranenia> (Accessed: 15.05.2025). (In Russ.)
25. Mikheev A.E. Approaches to Developing a Conceptual Model for the Architecture of a Digital Medical Ecosystem. // Health Care Manager. 2024; S:33–52. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-S-33-52. (In Russ.)
26. Mikheev A.E. An Approach to Implementing Clinical Decision Support Systems Based on Service-Oriented Architecture Principles Using Digital Medical Ecosystem Services. // Health Care Manager. 2024; S:101–118. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-S-101-118. (In Russ.)
27. Graphene Tattoos: What Are They and How Do They Save Lives? // [Digital resource]. Available: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/902130/>. (Accessed: 22.04.2025). (In Russ.)
28. Uday Kiran Kotla, Jinni Jane. Digital healthcare ecosystem // [Digital resource]. Available: <https://www.infosys.com/digital/white-papers/Documents/digital-healthcare-ecosystem.pdf> (Accessed: 30.03.2025).
29. Braun M. Represent me: please! Towards an ethics of digital twins in medicine. J Med Ethics. 2021;47:394–400. doi: <https://doi.org/10.1136/medethics-2020-106134>. [Available: https://www.researchgate.net/publication/350081467_Represent_me_please_Towards_an_ethics_of_digital_twins_in_medicine. (Accessed: 29.03.2025).
30. Goldina T.A., Suvorov N.I. Routine Clinical Practice Research: From Data Acquisition to Health Technology Assessment and Healthcare Decision-Making. Medical Technologies. Assessment and Choice. 2018; 1(31): 21–29. (In Russ.)
31. Sosfenov D.A. Digital Twin: History of Origin and Development Prospects // Intelligence. Innovations. Investments. – 2023. – No. 4. – P. 35–43. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-35>. (In Russ.)
32. Kritzing W., Karner M., Traar G. et al. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification, IFAC-PapersOnLine, 2018. – Vol. 51. – No. 11. – P. 1016–1022. [Electronic resource]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021> (Accessed: 12.10.2024).
33. From Models to Predictions: What Digital Twins Can Do and Who Creates Them / [Online]. Available: <https://dzen.ru/a/Y3yAqsYT93qWjCoQ?ysclid=m6krzigoig797004267> (Accessed: 26.03.2025). (In Russ.)
34. Schwartz S.M., Wildenhaus K, Bucher A., Byrd B. Digital twins and the emerging science of self: Implications for digital health experience design and “small” data. Front. Comput. Sci. 2020, 2, 3/ [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/346217932_Digital_Twins_and_the_Emerging_Science_of_Self_Implications_for_Digital_Health_Experience_Design_and_Small_Data (Accessed: 26.03.2025).
35. Alexandra Ezhova. Digital twins in healthcare: practical lessons from a Canadian hospital, 26.06.2024. [Online] Available: <https://www.anylogic.com/blog/digital-twins-in-healthcare-practical-lessons-from-a-canadian-hospital/> (Accessed: 26.03.2025).
36. Digital Twins in Healthcare: How Can Patients And Doctors Benefit From Them? [Online]. Available: <https://pixelplex.io/blog/digital-twins-healthcare/> (Accessed: 26.03.2025).
37. Voigt I., Inojosa H., Dillenseger A. et al. Digital twins for multiple sclerosis, Front. Immunol. – 2021. – Vol. 12. – P. 1556. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/immunology/articles/10.3389/fimmu.2021.669811/full> (Accessed: 12.10.2024).
38. Mikhnenko P.A. Analysis of Multimodal Data in Project Management: Prospects for Using Machine Learning. Managerial Sciences = Management Sciences in Russia. 2023;13(4):71–89. DOI: 10.26794/2404-022X-2023-13-4-71-89 (In Russ.)
39. Yamamoto K., Yamanaka K., Hatano E. et al. An eClinical trial system for cancer that integrates with clinical pathways and electronic medical records. Clin Trials 2012;9:408–17. [Online] Available: <https://www.researchgate.net/publication/224979764> (Accessed: 15.05.2025).
40. Fagherazzi G. Deep digital phenotyping and digital twins for precision health: time to dig deeper. Journal of Medical Internet Research 22 (2020): e16770.
41. Yamamoto K., Sumi E., Yamazaki T. et al. A pragmatic method for electronic medical record-based observational studies: developing an electronic medical records retrieval system for clinical research. BMJ Open. 2012; 2: e001622. doi: 10.1136/bmjopen-2012-001622. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/232765475> (Accessed: 15.05.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михеев Александр Евгеньевич – старший научный сотрудник, Исследовательский центр медицинской информатики Института программных систем им. А.К. Айламазяна Российской академии наук, г. Переславль Залесский, Россия.
E-mail: miheev@interin.ru