



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: 10.21045/1811-0185-2026-7-104-121
УДК 519.876.5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ГЛУБОКОЙ МЕДИЦИНЫ В СОСТАВЕ УМНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ. ЧАСТЬ 2: АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАТФОРМЕННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ГЛУБОКОЙ МЕДИЦИНЫ 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., e-mail: miheev@interin.ru

АННОТАЦИЯ

В первой части исследования был обоснован стратегический переход от реактивной «лечебной» модели здравоохранения к проактивной, профилактической парадигме, основанной на принципах глубокой медицины. Была показана ключевая роль синергии цифровой медицинской экосистемы и технологии цифровых двойников (цифровых теней) пациента для реализации этого перехода, а также систематизирован комплекс критических барьеров внедрения.

Цель: разработать и описать конкретную архитектурную модель и технологическую структуру умной медицинской экосистемы, призванной реализовать профилактическую бизнес-модель и преодолеть выявленные барьеры на основе цифровых теней пациентов.

Материалы и методы. На основе анализа проблем внедрения цифровых двойников пациента (ЦДП) предложен экосистемный подход, предполагающий интеграцию сервисов ЦДП в единую платформенную среду. Используются принципы сервис-ориентированной (СОА) и микросервисной архитектуры (МСА) для обеспечения гибкости, масштабируемости и слабой связанности компонентов.

Результаты. Предложена детализированная технологическая мета-структура (архитектурная модель) цифровой медицинской экосистемы, ключевыми артефактами которой являются: банк клинических данных (БКД), личный кабинет пациента (ЛК), виртуальная интегрированная ЭМК (ВЭМК), оперативное хранилище данных (ОХД) и системы ИИ. Показано, что экосистемный подход позволяет решить ключевые проблемы внедрения ЦДП: обеспечить доступность, агрегацию и качество данных за счет единой политики управления, реализовать механизмы информационной безопасности и преемственности медицинской помощи, а также предоставить практическую пользу всем участникам (пациентам, врачам, МО).

Заключение. Интеграция цифровых двойников пациентов в платформенную экосистему существенно увеличивает их ценность и полезность по сравнению с автономными решениями, позволяя перейти к персонализированной, профилактической и предиктивной медицине (5P-медицина). Преодоление оставшихся технологических, регуляторных и этических барьеров требует целостного системного подхода, дальнейших исследований и развития нормативной базы для полной реализации преобразующего потенциала технологии.

Ключевые слова: глубокая медицина, цифровая медицинская экосистема, цифровой двойник пациента, цифровая тень, архитектурная модель, платформенная экосистема, сервис-ориентированная архитектура (СОА), профилактическая медицина, персонализированная медицина, банк клинических данных (БКД), виртуальная электронная медицинская карта (ВЭМК), личный кабинет пациента (ЛК), искусственный интеллект (ИИ), интернет вещей (IoT), предиктивная аналитика, 5P-медицина, управляющая компания экосистемы, политика экосистемы.

Для цитирования: Михеев А.Е. Технологическая структура глубокой медицины в составе умной медицинской экосистемы. Часть 2: Архитектурная модель платформенной экосистемы для поддержки глубокой медицины на основе цифровых двойников. Менеджер здравоохранения. 2026; 7:104–121. DOI: 10.21045/1811-0185-2026-7-104-121

Введение

Современное здравоохранение стоит на пороге фундаментальной трансформации, движимой необходимостью перехода от реактивной «лечебной» парадигмы к проактивной,

профилактической модели. В первой части нашего исследования [1] был проведен критический анализ системных вызовов, стоящих перед отраслью: рост затрат, фрагментация данных и инфраструктуры, увеличение бремени хронических

© Михеев А.Е., 2026 г.



заболеваний и дефицит кадров. В качестве стратегического ответа на эти вызовы была обоснована целесообразность концепции «глубокой медицины», суть которой заключается в использовании искусственного интеллекта и больших данных для усиления человеческого потенциала врача, а не его замены.

Было показано, что практическая реализация принципов глубокой медицины возможна лишь при синергии двух ключевых элементов: единой платформенной цифровой экосистемы, преодолевающей разрозненность данных и сервисов, и технологии цифровых двойников (теней) пациента, преобразующей большие агрегированные данные в персонализированное, динамическое знание. Терминологический анализ позволил уточнить, что в контексте медицины применительно к пациенту наиболее корректен термин «цифровая тень», предполагающий односторонний поток данных от физического объекта к цифровому, а также обратную связь в виде рекомендаций, что исключает этически неприемлемые сценарии прямого управления человеком.

Несмотря на четкое концептуальное обоснование, путь от теории к практике внедрения сопряжен с комплексом серьезных барьеров. В первой части были систематизированы ключевые проблемы, включая вопросы качества и доступности данных, в частности, фундаментальные недостатки электронной медицинской карты (ЭМК) как источников данных реальной клинической практики (ДРКП), конфиденциальности и информационной безопасности, сложности интеграции с существующей ИТ-инфраструктурой, этические дилеммы и необходимость культурной адаптации медицинского сообщества. Преодоление этих барьеров требует не точечных улучшений, а целостного системного подхода.

Целью настоящей работы (второй части исследования) является описание конкретной архитектурной модели и технологической структуры умной медицинской экосистемы, призванной реализовать профилактическую бизнес-модель на основе цифровых теней пациентов. В фокусе внимания находится практическое воплощение концептуального фундамента, заложенного в первой части. Таким образом, исследование завершается посредством перевода теоретических постулатов

глубокой медицины в плоскость конкретного, реализуемого архитектурного решения, способствующего созданию персонализированной, профилактической и экономически эффективной системы здравоохранения будущего.

Экосистемный подход к решению проблем применения технологии цифровых двойников в медицине

Исходя из анализа возможных проблем внедрения цифровых двойников пациента в медицину, изложенных в [1], сервисы цифрового двойника пациента (ЦДП) не могут быть автономными или изолированными комплексными сервисами. Главными препятствиями для этого станут: доступность данных, точность данных, возможность и точность агрегации данных вокруг уникального пациента и возможность учета влияния окружающей среды и образа жизни. Решение находится в реализации сервиса ЦДП в рамках платформенной экосистемы. Здесь под платформой мы понимаем совокупность ИТ-платформ, системы управления, бизнес-продуктов, цифровых сервисов, данных и инфраструктуры, используемых для быстрой настройки предложений цифровых продуктов в континууме экосистемы или, другими словами, промежуточный ИТ-сервис, который создаёт ценность, обеспечивая взаимодействие между клиентами и поставщиками услуг [2].

Метафора экосистемы платформы требует, чтобы у всех заинтересованных сторон была общая цель, но, к сожалению, для здравоохранения это не всегда достижимо или очевидно. Поэтому выстраивание управления для экосистемы как единого целого требует формирования специального управленческого центра – отдельной управляющей компании (УК) [3]. УК (оператор платформы) управляет услугами и коммуникациями между участниками экосистемы (рис. 1). Она обеспечивает разработку, согласование, принятие и реализацию общей политики экосистемы. В отдельных компактных медицинских экосистемах, например, ведомственных или региональных, наличие очевидной общей цели вполне возможно, а роль УК в них играют департаменты или дирекции здравоохранения. Но это лишь частный случай медицинской экосистемы.

Современная платформенная экосистема развивается на пересечении трех ключевых



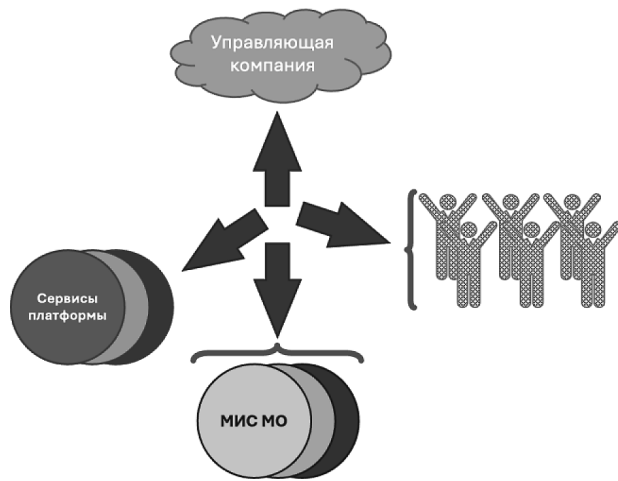


Рис. 1. Принципиальная схема цифровой медицинской экосистемы платформы

направлений: повсеместного сбора данных, их интеллектуальной обработки и расширения каналов взаимодействия между участниками системы. Цель объединения медицинских организаций (МО) в экосистемы – это предоставление информации врачам и пациентам в нужное время, нужного качества и в нужном объеме путем сбора и обработки большого объема информации о пациентах.

Исходя из основных принципов концепции цифровой медицинской экосистемы [2], становится нецелесообразным создание централизованных архивов медицинских документов. Критически важны не сами документы, а содержащаяся в них информация. Экосистемный подход означает переход от документоцентричного подхода к моделям, ориентированным на данные. Для того чтобы данные могли быть оперативно и эффективно использованы в клиническом принятии решений или аналитике, их следует изначально формировать в структурированном виде. УК экосистемы за счет ведения согласованной политики организует поэтапную разработку единых стандартов представления, хранения и использования медицинской информации на всех уровнях системы, а также достоверность данных в едином информационном пространстве [3], в том числе посредством гармонизации МИС МО для агрегирования данных вокруг уникальных пациентов или посредством совместного использования технологий

ИИ, например LLM¹, помогающих обеспечить семантическую интероперабельность. За счет возможностей для совместной работы организуется также взаимная поддержка МО при обучении сотрудников для решения проблемы дефицита кадров на стыке медицины и информационных технологий и при работе с данными.

Создание ЦДП во всем многообразии связанных проблем представляется малодостижимым в ближайшей перспективе не только из-за сложности человека, как объекта физического мира, для которого необходимо создать цифрового двойника, но также из-за долгосрочного характера проблемы получения актуальных данных о ключевых физиологических показателях человеческого организма в оперативном режиме в течение всей жизни или хронического заболевания, что приводит к периодическому отсутствию необходимых данных. Также требуются исследования, позволяющие определить как сбор необходимых данных (и сам подход) могут быть экономически эффективно интегрированы в повседневную деятельность каждой МО экосистемы, чтобы не парализовать ее работу [4].

В то же время, как мы уже отмечали в [1], персонализированная медицина – это подход, учитывающий не только генетические особенности пациента, но и его предпочтения, убеждения, взгляды и знания в социальном контексте [5, 6]. Такие факторы, как поддержка семьи, здоровый образ жизни, доступность здоровой пищи, как и повседневная экономическая и физическая безопасность, серьезно влияют на здоровье человека, но учет этих факторов в настоящее время сильно затруднен. Таким образом, исходя из приведенных выше определений, сегодня мы можем говорить только о цифровой модели и/или цифровой тени пациента (рис. 2). Поэтому в дальнейшем, употребляя термин «цифровой двойник пациента», мы подразумеваем технологию, то есть стремление создать максимально точную динамическую модель или профиль пациента.

Мы предлагаем рассмотреть экосистемный подход, когда данные ЭМК каждой МО могут динамически объединяться из различных локально распределенных медицинских и других

¹LLM (большая языковая модель, англ. – Large Language Model) – технология ИИ для распознавания и генерирования текста. Примеры продуктов в технологии LLM: ChatGPT от OpenAI, Bard от Google, Llama от Meta, Bing от Microsoft, YandexGPT от «Яндекса», GigaChat от «Сбера» или всеми любимый DeepSeek.

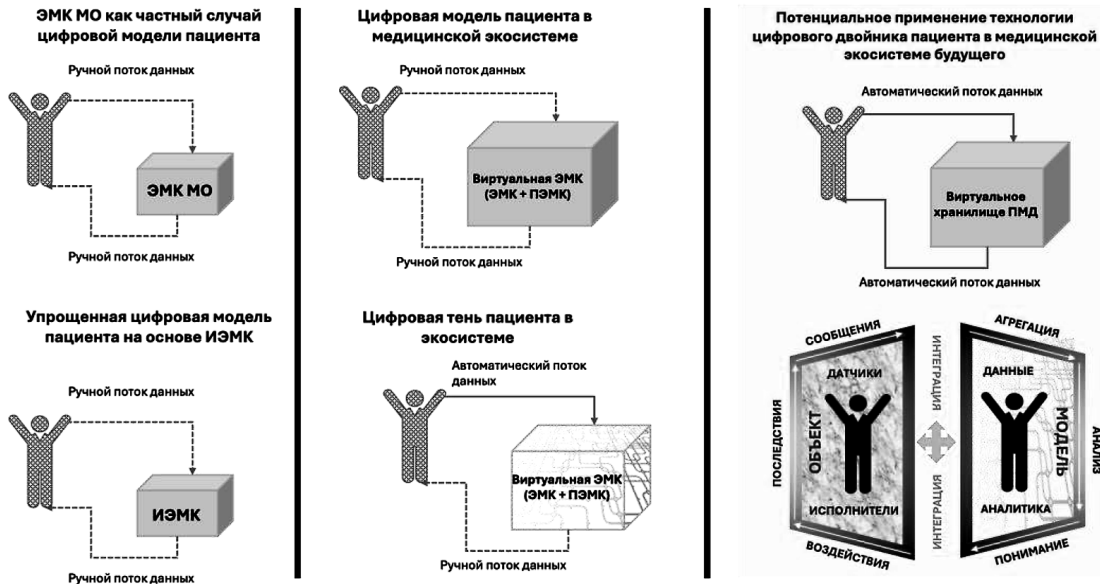


Рис. 2. Эволюция технологии цифрового двойника пациента при трансфере в здравоохранение

информационных систем, что позволяет оценивать все показатели здоровья (здоровьесбережения) в соотношении со всей интегрированной ЭМК (иЭМК) [7], которая меняется динамически. Таким образом, ЭМК каждой МО экосистемы или в составе личного кабинета пациента – персональная ЭМК (ПЭМК) превращается в один из вариантов виртуальной ЭМК (ВЭМК), динамически интегрирующей распределенные информационные системы и обеспечивающей доступность всех имеющихся на момент обращения медицинских данных пациента. То есть, мы получаем динамическую цифровую модель пациента. Добавление для сбора и обработки больших данных технологий ИИ, а также интернета вещей позволяет переходить к рассмотрению цифровой тени пациента (см. определение выше).

Цифровая медицинская экосистема представляет ряд важных преимуществ для внедрения технологии ЦДП. Во-первых, экосистема, организованная на принципах сервис-ориентированной архитектуры (COA), предлагает более простой подход к созданию и внедрению программного обеспечения. Сложные задачи разбиваются на более мелкие, легче решаемые с помощью отдельных сервисов, использующих единое хранилище данных, предоставляемое платформой экосистемы. Кроме того, поскольку сервисы для пользователей представляют собой «черные ящики», это позволяет не углубляться

в сложные детали их функционирования. За счет COA цифровая экосистема также предлагает механизмы адаптации к новым методам работы и принятия решений [8].

Инструменты и механизмы для решения проблемы интеграционного взаимодействия в составе платформы обеспечивают эффективное объединение клинической информации посредством сбора записей из распределенных ЭМК различных МО, что является важным условием извлечения ДРКП из ЭМК МО [9], а также одним из условий доступности и агрегации данных вокруг конкретного пациента – это сквозные (кросс-доменные) технологические сервисы, которые обеспечивают гармонизацию МИС МО или операторов ПМД, а также бесшовное перемещение пользователя между сервисами и обмен опытом использования тех или иных продуктов и сервисов экосистемы. Под доменом здесь понимается совокупность информационных систем, продуктов и сервисов, формирующих и обеспечивающих функционирование МИС каждой конкретной МО (или некоторого объединения МО). Каждый домен экосистемы уведомляет другие домены об изменениях в системе здоровьесбережения пациента также посредством кросс-доменных сервисов экосистемы [8].

В рамках экосистемного подхода возможно решить и проблемы не только доступности, но





и точности данных. Например, если ЦДП определил, что ему не хватает определенных данных, он может их получить посредством запроса к оператору экосистемы или автоматического запроса в МИС МО или ЛК пациента, а также посредством обращения к альтернативным источникам данных экосистемы. ЭМК МО в цифровой экосистеме является ценным источником информации, который в перспективе будет только расширяться как в объемах данных, так и в масштабах его использования. Это становится возможным, так как платформа цифровой экосистемы позволяет воплотить на практике продуманную стратегию повышения качества данных как на уровне ЭМК, так и в процессе извлечения ДРКП и создания цифровых двойников за счет системы управления, реализующей политику экосистемы [8].

За счет организации сбора ДРКП с соблюдением необходимых требований, обеспечивающих их качество, в экосистеме меняется и восприятие совокупности доказательств реальной (рутинной) клинической практики [10], реальным воплощением которой становится банк клинических данных (БКД), содержащий данные всех ЭМК МО экосистемы в деперсонализированном и очищенном виде [11]. БКД является богатым источником медицинских данных для исследований, включая демографические данные, симптомы, лабораторные тесты, диагнозы, методы лечения, условия направления для лечения в стационаре и т.п. Это отличный источник данных поиска прецедентных решений для лечения пациентов [12]. В ходе проведенных исследований [13, 14] прецедентный подход доказал свою эффективность и тем самым еще раз подтвердил научную и практическую целесообразность сбора и накопления больших клинических данных. БКД также способен помочь выявлять ошибки в дозировке лекарственных препаратов и предотвращать мошенничество, улучшить процесс приоритизации и сортировки пациентов.

БКД – в составе медицинской экосистемы в купе с прецедентной СППВР – представляет собой совокупность доказательств реальной клинической практики – клиническое свидетельство об использовании и потенциальных выгодах или рисках применения технологий здравоохранения, полученное в результате анализа данных реальной клинической практики

[15]. Именно в условиях цифровой медицинской экосистемы технологии ИИ при наличии БКД способны существенно снизить риск медицинских ошибок и, главным образом, предотвратить медицинских ошибок, когда вред здоровью пациентов наносится вследствие недостаточной информации или невыполнения предписанных мероприятий, учитывающих индивидуальные особенности пациентов [2]. Таким образом, качество исходных данных, контролируемое УК посредством реализации политики экосистемы, и прецедентная СППВР в составе БКД, предоставляющая корректные методы для получения доказательств на основании этих данных, определяют высокое качество СДРКП для оценки медицинских технологий [10].

Цифровые экосистемы медицинской помощи предполагают также расширение полномочий пациента и позволяют ему играть более активную роль в укреплении и поддержании своего здоровья посредством активного участия в клинических процессах при помощи инструментов личного кабинета (ЛК). За счет инкорпорации в ЛК систем, средств и других ресурсов экосистемы, которые усиливают значимость содержимого ПЭМК, ЛК может в значительной мере изменить клинические процессы и методы самопомощи пациентов. Технологии автоматического пополнения данных – ключевой фактор принятия ЛК пользователями и его долговременного использования за счет возможности систематического общения пациентов с врачами, автоматического экспорта и импорта данных из разных информационных систем, преобразования клинических показателей и результатов наблюдений в значимую и полезную информацию [16]. Предлагая обслуживание и сопровождение пациенту под «одним брендом», экосистема предоставляет возможности и для удержания пациента.

Также следует отметить, что продукты экосистемы обычно связывают и множество других сервисов и подходов к взаимодействию, например: унификация систем информационной безопасности, консолидация данных, аналитика, обеспечение омниканальности (доступ к единому набору сервисов в разных интерфейсах), личные кабинеты врачей и агентов по продаже услуг и другие, без которых экосистема не будет таковой [8]. В целом, медицинская экосистема, как и любая другая бизнес-экосистема,



выполняет роль источника ресурсов и знаний для развития компаний-участников. Продукты и сервисы в этой бизнес-модели обогащают друг друга функциями и данными. При этом сами продукты экосистемы посредством перечисленных сервисов достигают главной цели – получают синергетический эффект от взаимного обогащения знаниями [17].

Компаниям-поставщикам решений для технологии ЦД платформенная экосистема предоставит понимание жизненного цикла продукта – позволит компаниям полностью контролировать свои продукты в цифровом формате от проектирования и разработки до завершения жизненного цикла. Это, в свою очередь, может помочь им понять не только дизайн продукта, но и то, как продукт используется в полевых условиях, получить отзывы и рекомендации по использованию продукта от всех заинтересованных сторон. Кроме того, экосистема предоставит возможность повышения скорости вывода цифровых продуктов и сервисов на рынок, в том числе за счет технологии ЦД: компании могут добиться значительных результатов в области улучшения операционной деятельности, сокращения количества дефектов в собственных продуктах и разработки новых бизнес-моделей для увеличения доходов.

К сожалению, архитектурные, функциональные и технологические особенности платформенных экосистем, особенно при передаче, обработке и хранении большого объема конфиденциальных персональных данных, создают серьезные проблемы с безопасностью, конфиденциальностью и доверием. Некоторые исследователи утверждают, что в современных цифровых информационных системах пользователю практически невозможно сохранить конфиденциальность, современные решения в области безопасности неэффективны, конфиденциальность – это иллюзия, а доверие – всего лишь убеждение [18, 19, 20, 21]. Соответственно, необходимо серьезно пересмотреть действующие нормативные требования для легитимизации и облегчения доступа конечных пользователей к различным типам медицинских данных, а владельцам медицинских данных прозрачно делиться ими со всеми заинтересованными сторонами (членами семьи, врачами, исследовательскими и ИТ-организациями).

Технологическая структура глубокой медицины: описание структуры технологии цифрового двойника в цифровой медицинской экосистеме

На основе проведенного анализа мы можем сказать, что технологическая структура поддержки глубокой медицины в составе успешной платформы цифровой медицинской экосистемы должна соответствовать следующим требованиям:

1. Пациенты должны получать практическую пользу от участия в медицинской экосистеме за счет:

- улучшенной профилактической диагностики;
- более эффективного оказания неотложной медицинской помощи;
- предоставления прогнозной аналитики изменений в состоянии здоровья и качестве жизни;
- постоянного сопровождения по системе медицинской помощи в процессе лечения и в процессе поддержания здоровья («когда мы здоровы»), снижение зависимости от загруженности медицинского персонала.

2. Врачи должны получать практическую пользу от участия в медицинской экосистеме за счет:

- «передачи на аутсорсинг» МИС и другим системам, в том числе ИИ, задач сбора всех необходимых данных о здоровье, их обработки, а также многих других рутинных задач;
- отслеживания эффективности лечения.

3. Руководители МО должны получать практическую пользу от участия в медицинской экосистеме за счет:

- повышения удовлетворенности пациентов качеством помощи в МО вследствие уделения врачами большего внимания пациентам;
- оптимизации использования материальных ресурсов вследствие предотвращения ошибок при назначениях лекарственных препаратов, использовании расходных материалов и уменьшения прочих возможностей для мошенничества;
- повышения пропускной способности вследствие улучшенных процессов приоритизации и сортировки пациентов;





- повышения качества медицинской документации и достоверности данных.
- 4. Пациенты должны сами контролировать свои ПМД, им должна предоставляться возможность безопасно делиться своими данными с врачами или другими заинтересованными сторонами, например ИТ-сервисами платформы.
- 5. ИТ-сервис должен стать основой создания стоимости, как и в любой цифровой экосистеме [22].
- 6. Должен предоставляться открытый API, позволяющий разработчикам запрашивать разрешение и получать доступ к медицинским данным.
- 7. Структура платформы должна быть гибкой с точки зрения типов медицинских данных, доступных для мониторинга физиологического состояния пациентов и/или об эпизодах оказания медицинской помощи.

Мы предлагаем разработать открытую архитектуру платформы цифровой медицинской экосистемы, поддерживающей идеи глубокой медицины, на основе технологической структуры, которая решала бы проблему обмена медицинскими данными между разработчиками ИТ-сервисов и мобильных медицинских приложений, обеспечивая прозрачную агрегацию и совместное использование медицинских данных. Предполагается, что эта платформа будет основана на принципе локального хранения и обработки персональных данных с использованием удаленных вычислительных ресурсов. Такая платформа должна позволить разработчикам медицинских приложений и сервисов значительно снизить затраты на разработку и упростить доступ конечных пользователей к различным типам медицинских данных.

В цифровой экосистеме основные функциональные элементы распределены по самостоятельным программным сервисам, которые объединяются с помощью внешних компонентов платформы экосистемы, обеспечивающих их взаимодействие в соответствии с производственными требованиями. Технологическая мета-структура глубокой медицины в цифровой медицинской экосистеме – это совокупность технологий, инструментов, процессов и организаций, объединенных вокруг цели оказания персонализированной медицинской помощи пациентам. Она включает различные элементы, такие как МИС, медицинские устройства,

платформы телемедицины, хранилища данных, аналитические инструменты, информационные системы страховых компаний и других участников процесса медицинского обслуживания. Все перечисленные элементы взаимодействуют друг с другом, создавая комплексную сеть взаимосвязанных компонентов.

Это взаимодействие позволяет обеспечить эффективную диагностику, лечение и профилактику заболеваний, повышение качества жизни пациентов и снижение расходов на медицинское обслуживание. Таким образом, технологическая структура медицинской экосистемы представляет собой многоуровневую систему, включающую разные виды технологических решений, устройств и платформ, работающих совместно для достижения главной цели – улучшения состояния здоровья пациентов, обслуживаемых в экосистеме. Основные компоненты технологической структуры:

1. Артефакты – крупные организационно-структурные элементы, создающие ценности (рис. 3):

- банк клинических данных (БКД);
- личный кабинет пациента (ЛК);
- облако данных персональных мониторов (ОДПМ);
- оперативное хранилище данных (ОХД);
- виртуальная интегрированная ЭМК (ВиЭМК);
- ИИ-системы анализа и обработки данных;
- ИТ-инфраструктура и технологии.

2. Комбинация сервис-ориентированной архитектуры (СОА) и микросервисной архитектуры (МСА), обеспечивающая:

- гибкость бизнес-процессов;
- композицию и оркестровку сервисов;
- слабую связанность компонентов;
- возможность быстрого реагирования на изменения;
- распределенный доступ к компонентам;
- масштабируемость приложений и сервисов;
- модульность разработки.

Рассматривается один из вариантов виртуальной иЭМК (ВЭМК), динамически интегрирующей распределенные информационные системы (ЭМК каждой МО и ПЭМК в составе личного кабинета пациента) и обеспечивающей преемственность и непрерывность медицинской помощи. Система виртуальной электронной



медицинской карты (ВЭМК) интегрирует следующую информацию и данные [3]:

- данные из МИС МО;
- информацию из личных кабинетов пациентов;
- данные устройств интернета вещей;
- информацию из проблемно-ориентированных социальных сетей, интегрированных с ЛК [16];
- данные из других хранилищ и API-интерфейсов.

Единственными источниками клинических данных в России в настоящее время являются МИС. При этом проектировщики отечественных МИС изначально не ставили перед собой задачу объединения данных из различных МИС. Для получения информации о том, где хранятся те или иные сведения о здоровьесбережении, используется специализированное хранилище оперативных данных (ОХД), посредством сервисов которого каждый домен экосистемы (как совокупность информационных систем, продуктов и сервисов отдельной МО или некоторого лечебно-профилактического объединения) уведомляет другие домены о наличии изменений в системе здоровьесбережения пациента. ОХД обеспечивает выполнение следующих функций [3]:

- 1) объединения данных из различных источников;
- 2) уведомления доменов об изменениях;
- 3) обеспечения преемственности медицинской помощи.

ЛК предоставляет доступ ко всем необходимым источникам данных о пациенте через один универсальный интерфейс Интернет-портала или мобильного приложения, доступный в любое время и в любом месте, включая:

- обмен клинической и организационной информацией не только между МИС в составе экосистемы, но и между МИС, не взаимодействующими напрямую;
- технологию автоматического пополнения данных, повышающую точность, полноту и своевременность содержимого ПЭМК;
- средства удаленного мониторинга показателей здоровья, в том числе в составе стационар-замещающих технологий;
- средства контроля данных о сетевой активности пациента, преобразуемых в информацию о его предпочтениях, взглядах

и знаниях в социальном контексте (история поведения, связанного со здоровьем, взглядов и знаний, предпочтений и т.п).

Необходимым условием для встраивания технологий ИИ в медицинскую практику является наличие больших очищенных данных для проведения глубокого машинного обучения и семантического анализа. К сожалению, современные МИС также изначально не приспособлены для представления клинических данных в пригодной для обработки методами машинного обучения форме. На помощь приходят сервисы БКД, которые извлекают необработанные (сырые), но предварительно обезличенные данные из различных источников, преобразуют их в единый заранее определенный формат и загружают в БКД [3]. В работе [11] предложена проблемно-ориентированная формализация клинических данных в расчете на применение к данным банка современных методов искусственного интеллекта.

На рис. 3 предлагается схема упрощенной архитектурной модели глубокой медицины или технологическая мета-структура, которая показывает логическую структуру и семантику элементов, демонстрирующую взаимосвязь между понятиями и технологиями профилактической бизнес-модели работы МО-участников экосистемы. Из-за стремления к простоте и прозрачности на схеме показаны не все отношения, существующие между участниками, а некоторые отношения упрощены. Например, на схеме отсутствуют конвейеры передачи данных – наборы инструментов и действий для перемещения данных из одной системы с ее методом хранения и обработки данных в другую систему, в которой они могут храниться и управляться по-другому [3]. Конвейеры позволяют автоматически получать информацию из множества разрозненных источников, затем преобразовывать и консолидировать ее в одном высокопроизводительном хранилище данных. Архитектура конвейера передачи данных описывает точное расположение компонентов, обеспечивающих извлечение, обработку и доставку информации. Архитектура конвейеров передачи данных (ETL, ELT и пр².)

² Конвейеры ETL (англ. Extract, Transform, Load – извлечение, преобразование, загрузка) и ELT (англ. Extract, Load, Transform – извлечение, загрузка, преобразование) различаются тем, когда происходит преобразование данных к нормализованному виду: до загрузки или после.





Рис. 3. Технологическая мета-структура цифровой экосистемы медицинской помощи

выбирается в зависимости от решаемых задач и особенностей информационных систем участников экосистемы.

В составе цифровой экосистемы рассматриваются только сервисы ЛК. Разделение ЛК и пациента на схеме приведено для наглядности и лучшего понимания процессов.

Мы исходим из утверждения, что ценность не является внутренней характеристикой продукта или услуги, а определяется потребителем продукта/услуги как ценность в использовании [23]. Участник экосистемы создает только «ценностное предложение», которое становится взаимным путем взаимодействия нескольких участников, т.е. предлагаемая ценность должна представлять собой решение определенной проблемы участника: МО, врача, пациента. Соответственно, утилизационная ценность достигается только за счет практического использования продукта или услуги [22]. Таким образом, каждый структурный элемент экосистемы может поставляться отдельным поставщиком решений в виде ИТ-сервисов, в зависимости от наличия ресурсов: инфраструктуры информационно-коммуникационных технологий, сотрудников, материалов и возможностей участников.

Созданная ценность сервиса доставляется через платформу экосистемы, которая

предоставляет средства для взаимодействия, оркестровки и гармонизации сервисов. Политика экосистемы реализуется управляющей компанией [3]. Следует ответить, что такой подход требует от ИТ-компаний изменения бизнес-логики, начиная с производства продуктов и услуг для клиентов и заканчивая созданием новых ценностей в виде ИТ-сервисов совместно со своими клиентами. Эти изменения предполагают разработку новой бизнес-модели, которая будет поддерживать новый подход к ведению сервис-ориентированного бизнеса [22] в цифровой медицинской экосистеме.

Указанная технологическая структура способствует более точному определению артефактов архитектуры цифровой медицинской экосистемы для воплощения идей глубокой медицины и создает предпосылки для разработки сервис-ориентированных бизнес-моделей профилактической медицины в составе цифровой экосистемы – сети цифровых сообществ, состоящей из взаимосвязанных, взаимозависимых и взаимодополняющих цифровых элементов, включая заинтересованные стороны, организации и цифровые устройства, расположенные в цифровой среде, которые взаимодействуют как функциональные единицы и связаны между собой потоками действий, информации и транзакций [24].



Обсуждение

В статье описан один из возможных вариантов технологической структуры платформы цифровой медицинской экосистемы. Платформа поддерживает профилактическую бизнес-модель работы МО-участников и идеи глубокой медицины за счет создания цифрового двойника пациента на основе больших данных и технологий моделирования. ЦДП позволяет использовать цифровую копию пациента для персонализированной медицины и прогнозирования заболеваний. Интегрируя и анализируя обширные данные о пациентах из различных источников, таких как ЭМК, медицинские устройства, носимые устройства и генетическая информация, ЦДП создают целостное представление о пациенте, позволяя врачам разрабатывать индивидуальные планы лечения, а СК индивидуальные страховые планы, что приводит к улучшению результатов лечения, оптимизации его стоимости и повышению удовлетворённости пациентов.

Интеграция ЦДП с данными, полученными от различных источников, в режиме, приближенном к реальному времени, позволяет осуществлять постоянный мониторинг пациентов и выявлять ранние признаки ухудшения состояния здоровья или отклонений от нормы. Это предоставляет врачам МО возможность принимать упреждающие меры, предотвращать осложнения, оптимизировать планы лечения и управлять лечением дистанционно, снижая необходимость в частых посещениях МО пациентами, что особенно важно для пациентов с хроническими заболеваниями [25, 26].

Анализируя данные и симптомы пациентов с помощью предиктивной аналитики и алгоритмов машинного обучения для прогнозирования развития заболеваний и результатов лечения, ЦДП в составе рассматриваемой технологической структуры помогает принимать меры на более ранних этапах, что приводит к более эффективному и целенаправленному лечению. Такой упреждающий подход позволяет врачам вмешаться еще до того, как состояние пациента ухудшится, предотвращая госпитализацию и снижая расходы на медицинскую помощь, улучшая результаты лечения пациентов. Профилактическая помощь с помощью ЦДП включает в себя не только персонализированные рекомендации по здоровью, но и напоминания об

обследованиях, поддержку в соблюдении режима приема лекарств и о необходимости изменения образа жизни.

Предложенная технологическая структура позволяет и самим пациентам активно участвовать в управлении своим здоровьем, предоставляя им доступ к данным их ЦД посредством ЛК пациента. Цифровые двойники облегчают пациентам понимание процессов, происходящих в их организме – это уменьшает страх перед неизвестным и мотивирует пациентов более эффективно сотрудничать с медицинским персоналом и придерживаться назначенного лечения (более строгое соблюдение режима лечения, ведение здорового образа жизни, использование расширенных методов самоконтроля), а также помогает общению и сотрудничеству между пациентами и врачами, способствуя совместному принятию решений относительно ориентированного на пациента лечения [4], реализуя на практике идеи глубокой медицины [27].

Кроме того, элементы представленной технологической структуры, анализируя данные пациентов и исторические прецеденты, предоставляемые БКД, помогают выявлять пациентов из группы риска, прогнозировать потенциальные осложнения и рекомендовать профилактические меры. Такой проактивный подход к лечению позволяет врачам своевременно вмешиваться в процесс, предотвращать неблагоприятные события, своевременно изменять планы лечения на основе прогнозируемых реакций пациентов, что, в конечном итоге, повышает безопасность пациентов и улучшает результаты лечения в долгосрочной перспективе.

Благодаря обмену данными о пациентах между различными МО и своевременному информированию врачей МО обо всех предшествующих эпизодах лечения, обеспечивается его непрерывность. ЦДП является ценным дополнением к устоявшимся технологическим процессам медицинской помощи благодаря интеграции в сквозные рабочие процессы и обеспечению совместимости с жизненно важными системами ЭМК и/или управления запасами лекарств в МИС МО. Это гарантирует, что все врачи всех МО будут иметь доступ к самой актуальной и полной информации о пациентах для оказания скоординированной помощи, минимизации дублирования исследований, контроля полипрагмазии. В итоге это приведет к сокращению





количества предотвратимых врачебных ошибок. При этом контроль ПМД осуществляется в соответствии с идеями глубокой медицины самими пациентами посредством контроля обмена данными о здоровье. Пациент (или физическое лицо) динамически управляет доступом к персональным медицинским данным, используя инструменты, предоставляемые ЛК: контролируется использование и передача заинтересованным сторонам содержимого ЭМК МО и других ПМД.

Рассматриваемая технологическая структура может использоваться для стратификации рисков, поскольку ЦД позволяют классифицировать пациентов экосистемы по группам риска в соответствии с их данными о здоровье и прогностическими моделями. Выявляя людей из группы риска, МО могут более эффективно распределять ресурсы, уделять больше внимания профилактическим мерам и реализовывать целевые стратегии. ЦД дают представление о том, какие пациенты с наибольшей вероятностью получают пользу от профилактических мер, раннего обследования, изменения образа жизни или конкретных вмешательств. Такой целенаправленный подход улучшает распределение ресурсов здравоохранения, снижает затраты и улучшает результаты лечения пациентов [30].

В то же время, когда электронная коммерция, а следом и медицинская отрасль, рассматривают ПМД как «новую нефть» и товар, участниками экосистемы здравоохранения всё чаще становятся научно-исследовательские и коммерческие организации, предлагающие услуги ИИ и машинного обучения. Такое развитие событий порождает множество проблем, связанных с конфиденциальностью и доверием. Концепция ЦДП поднимает вопросы о конфиденциальности, например, о том, кто является владельцем ЦД человека (например, пациент, поставщик медицинских услуг или кто-то другой), кто может использовать цифрового двойника и каковы права пациента, имеющего цифрового двойника [31]. Необходимо дополнительно исследовать также правовые аспекты владения данными цифровых двойников и ответственности за их использование.

Поэтому одним из основных препятствий, с которыми медицина сталкивается при внедрении цифровых двойников, является обеспечение конфиденциальности и безопасности данных. Подход, когда обмен данными между

заинтересованными сторонами контролируется самим пациентом, является лишь одним из возможных. Другой подход – использование смарт-контракта или информированного согласия пациента при поддержке технологий блокчейн. При этом следует понимать, что не все пациенты готовы делиться своей медицинской информацией, что приводит к пробелам в данных или даже к невозможности использования технологии в некоторых случаях [28].

Но во всех случаях обеспечение безопасного и этичного хранения и использования ПМД является огромной проблемой. Использование данных, лежащих в основе технологии цифровых двойников, сопряжено с неизбежным риском: данные могут быть перехвачены при их передаче между ЦД и другими заинтересованными сторонами. ЦД представляют собой сложные системы и нуждаются в надежной интеграции с различными программными и аппаратными устройствами. Хотя такая взаимосвязь является сильной стороной, она также может привести к уязвимостям системы. Интернет вещей имеет решающее значение для внедрения технологии цифровых двойников. Однако устройства Интернета вещей известны своими уязвимостями в системе безопасности из-за слабых настроек «по умолчанию» и отсутствия своевременных обновлений [32]. Необходимы строгие правила защиты данных и надежные меры информационной безопасности, не только включающие методы шифрования, технологии блокчейн, анонимизации данных, решения для их безопасного хранения и прозрачности в отношении того, как используются данные, но и технологий ИИ для анализа исходного кода программного обеспечения цифрового двойника, обнаружения уязвимостей и распознавания поисковых или ключевых слов, которые могли бы поставить под угрозу безопасность данных пациентов при запросе данных ЦД [29].

Стандартизация и интеграция данных для создания ЦДП, поступающих в различных форматах из разных источников – также непростая задача, требующая дополнительных исследований. Одно из возможных решений – создание надежных систем и платформ, позволяющих разобраться в большом разнообразии данных. Другая критически важная для практической реализации проблема – это формирование требований к инфраструктуре и необходимость



значительных вычислительных мощностей. Наконец, для создания ЦД заинтересованным сторонам потребуется инвестировать большие суммы денег в развитие инфраструктуры, приобретение передового программного и аппаратного обеспечения и обучение медицинского персонала, чему должен предшествовать детальный анализ экономической эффективности предлагаемого подхода.

Технология ЦД, как и в целом системы ИИ, является сквозной, то есть не связана с конкретной сферой или продуктом, она используется во всех отраслях экономики, социальной сфере и государственном управлении. Несмотря на то, что кроме описанной технологической структуры глубокой медицины на основе ЦД в медицинской экосистеме существуют и другие способы создания и применения технологии, в любом случае необходимо учитывать особенности предметной области (например, клинических рабочих процессов, потребностей пользователей, систем оплаты, доверия, безопасности пациентов и этических последствий). ИИ усиливает и дополняет человеческий интеллект, а не заменяет его. Таким образом, при создании ЦД в медицине важно не заменять важные элементы взаимодействия врач-пациент, а повысить эффективность этого взаимодействия [33]. Платформенная медицинская экосистема, в которой используется технология ЦДП, должна опираться на глубокое, ориентированное на человека понимание сложности маршрутов пациентов и путей оказания медицинской помощи [34].

Конечно, современное видение платформенных экосистем часто грешит технологическим детерминизмом. В реальности концепция платформенной экосистемы – не волшебная палочка, а инструмент, формирующий соответствующее видение проблем и предлагающий подходы для их решения. Ее успех зависит как от технологических возможностей, так и от зрелости МО и ИТ-разработчиков, их готовности к изменениям, наличия четкого стратегического видения и плана поэтапного внедрения [2], зрелости в управлении данными и информационной безопасности. Другими словами, стратегические выгоды не предоставляются экосистемой «по умолчанию», но зарабатываются большими усилиями по интеграции технологии в социально-техническую систему МО, ведомственной

или региональной медицины со всеми людьми, процессами и противоречиями.

Как и любая технология, ЦД в медицине проходит свои уровни зрелости, которые могут быть представлены различными типами цифровых двойников: от фиксирующих и визуализирующих статус на определенный момент времени (ЭМК) к более информативным (иЭМК) и аналитическим (ВЭМК) – вплоть до интеллектуальных автономных – самоуправляемых агентов, способных независимо принимать решения и воздействовать на физический объект. Способность управлять потоками данных, активно запрашивать недостающие данные, искать альтернативные источники и вычислять недостающие параметры на основе других данных – это признак цифрового двойника высшего уровня зрелости: уровень 4–5 по моделям Gartner, Консорциума цифровых двойников³ или [35]. На этом уровне зрелости ЦД превращается из пассивного отражения физического объекта в интеллектуального «живого» агента, который сам заботится о качестве своих данных, а, значит, и о качестве своих выводов и решений. Таких ИИ-агентов, а также их роль в обеспечении преемственности медицинской помощи мы предлагаем обсудить в отдельной статье.

Выводы

Происходящая в сфере здравоохранения трансформация направлена не только на более глубокое понимание причин заболеваний и того, как лекарства действуют в организме человека, но и на предоставление высококачественных медицинских услуг для всех по более низкой цене. Для этого осуществляется цифровизация медицины, внедряются инновационные технологии и методики, такие как новые математические инструменты для расширенного моделирования, ИИ и машинное обучение. В этом контексте собирается широкий спектр персональных медицинских данных, который во много раз превышает объём текущих ЭМК. Предполагаемый результат – переход здравоохранения и социального обеспечения к персонализированной, профилактической, предиктивной, партнерской и прецизионной медицине (5P-медицина) [36]. Условием трансформации

³ The Business Maturity Model Is Key to Digital Twin Adoption (<https://www.digitaltwinconsortium.org/publications/digital-twin-business-maturity-model/>).





здравоохранения в сторону 5P-медицины всё чаще становится переход МО и медицинских услуг в платформенные экосистемы, организованные на принципах СОА и предоставляющие МО возможность изменить бизнес-модель своей работы (поставщика медицинских услуг) с лечебной на профилактическую.

Большим потенциалом для преобразования отрасли здравоохранения обладают также ЦД. Несмотря на проблемы, присущие только этому разделу предметной области, преимущества, наблюдаемые в других секторах, указывают на многообещающее будущее. Внедряя ЦД в здравоохранение, можно принимать более взвешенные решения, оптимизировать процессы и, в конце концов, улучшить результаты для пациентов. При постоянном внимании и инновациях ЦД могут стать краеугольным камнем современного здравоохранения.

Существующие исследования в этой области демонстрируют, что ЦД могут помочь в точном лечении, в управлении больницами и клиниками, борьбе с пандемиями, а также в машинном обучении и моделировании. Применение цифровых двойников в составе экосистемы способно подарить врачам больше времени для эмпатичного общения с пациентами [27], в том числе при серьезных диагнозах. Однако исследований в этих областях все еще недостаточно для оценки эффективности этих технологий в долгосрочной перспективе и рассмотрения сложностей, связанных с их массовым внедрением в учреждениях здравоохранения. Поэтому создание и внедрение таких технологий должно оцениваться с точки зрения их практической и экономической целесообразности.

Имплементация цифровых двойников пациентов в цифровую медицинскую экосистему существенно увеличивает ценность и полезность этой технологии, по сравнению с автономными решениями, позволяя достичь лучшего результата в лечении, профилактике и поддержке здоровья каждого отдельного пациента за счет интеграции с другими компонентами экосистемы (МИС МО, БКД и СППВР). Это позволяет перейти от реактивной к превентивной и предиктивной медицине, улучшая результаты лечения и снижая затраты. Автономные же решения ограничены в возможностях и требуют дополнительных усилий для синхронизации с внешними системами.

Применение цифровых двойников в здравоохранении может кардинально изменить подход к лечению пациентов. Однако для полной реализации потенциала цифровых двойников в здравоохранении необходимо решить ряд серьезных проблем. Эти проблемы включают в себя: эффективное использование вычислительных мощностей, конфиденциальность и безопасность, совместимость и качество данных, ресурсозатратность технологии, интеграцию с текущими рабочими процессами, масштабируемость и культурные изменения (этические нормы и правила), а также вовлечение всех заинтересованных сторон и обучение специалистов и пациентов. Для преодоления этих и других проблем, чтобы цифровые двойники стали практическим инструментом в сфере здравоохранения, необходимы дальнейшие исследования и разработки. По мере решения перечисленных и не только проблем, технология ЦД может произвести революцию качества и эффективности в системе здравоохранения [37].

Технология ЦД и переход МО к экосистемам характеризуется общим интересом к данным, как «новой нефти». Соответственно, для получения качественных, экономических, административных и социальных преимуществ, необходимо на политическом уровне изменить подход к защите ПМД: от жесткой защиты к балансу между конфиденциальностью информации и свободным перемещением медицинских данных [20]. Необходимо серьезно пересмотреть действующие нормативные требования [38]. Чтобы сделать 5P-медицину успешной, надежной и безопасной и, следовательно, приемлемой для людей, необходимо переосмыслить то, как в настоящее время понимаются и управляются конфиденциальность информации и доверие в медицинских экосистемах. Для достижения этой цели необходимы общепризнанный консенсус, новые законы и политическая воля [20].

Необходимо также учитывать ключевые технологические тренды [39], обостряющие проблемы кибербезопасности. В соответствии с некоторыми исследованиями, более трети взаимодействий с генеративным ИИ в ближайшем будущем будут выполняться через автономных ИИ-агентов, которые становятся все более «разумными», умеют планировать действия, координироваться между собой и взаимодействовать с внешними сервисами. ИИ-агенты



все активнее используются в электронной коммерции: они могут консультировать клиентов, оформлять заказы, производить оплату через виртуальные карты. Появляются решения, где ИИ может полностью заменить человека, например, он может бронировать путешествия, заказывать товары или взаимодействовать с веб-сайтами. Ведется работа над финансовой инфраструктурой, чтобы агенты могли проводить платежи безопасно без участия человека.

Современная медицинская помощь представляет собой горизонтально-вертикальное взаимодействие множества агентов в сложной адаптивной системе (экосистеме), характеризующейся индивидуальным поведением и самостоятельностью в достижении определенных целей как отдельными агентами (МО, врачами или пациентами), так и совокупностью

некоторого объединения таких агентов. Соответственно, автономные или полуавтономные интеллектуальные программные агенты хорошо подходят для информационной интеграции и реализации парадигмы преемственной и непрерывной медицинской помощи в медицинских экосистемах [40]. С ростом числа ИИ-агентов возрастут и риски, связанные с их контролем. Необходимы новые политики безопасности, решения для управления идентичностью, отслеживания действий агентов, решения, защищающие ИИ-промпты, профилирующие взаимодействия в режиме реального времени, предоставляющие средства для борьбы с дипфейками [39]. Также необходимы новые подходы к обеспечению защиты интересов и прав пациентов и врачей в новой реальности цифровых двойников и автономных ИИ-агентов.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Михеев А.Е. Перспективы создания цифровых медицинских экосистем в России: цифровые двойники и другие технологии, проблемы и подходы. // Менеджер здравоохранения. 2024; 5:4-32. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-5-4-32.
3. Михеев А.Е. Подходы к разработке концептуальной модели архитектуры цифровой медицинской экосистемы. // Менеджер здравоохранения. 2024; 5:33-52. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-5-33-52.
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. 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 доказательство. 2022; 2 (2):8-20. <https://doi.org/10.37489/2782-3784-nivrvd-13>.
8. 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; 5:101-118. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-5-101-118.
9. 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. В MJ Open. 2012; 2: e001622. doi: 10.1136/bmjopen-2012-001622. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/232765475>. (Доступ: 15.05.2025).
10. Хомицкая Ю.В., Осина Г.С., Новодежевкина Е.А., Гольдина Т.А. Исследования рутинной практики: как разработать и внедрить новое направление. Системный подход в обеспечении качества результатов // Медицинские технологии. Оценка и выбор. – 2021. – № 4(43). – 0.16–27. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-rutinnoy-praktiki-kak-razrabotat-i-vnedrit-novoe-napravlenie-sistemnyy-podhod-v-obespechenii-kachestva-rezultatov>. (Доступ: 15.05.2025).
11. Малых В.Л., Михеев А.Е., Рудецкий С.В. Проблемно-ориентированная модель банка клинических данных. Программные системы: теория и приложения, 2018, 9:4(39), с. 219–237. [Электронный ресурс]. URL: https://psta.pstiras.ru/read/psta2018_4_219-237.pdf (Доступ: 30.08.2024).





12. Банк медицинских данных Сеченовского университета планируется интегрировать с зарубежными хранилищами. [Электронный ресурс]. URL: [https://medvestnik.ru/content/news/Bank-medicinskih-dannyh-Sechenovskogo-universiteta-planiruetsya-integrirovat-s-zarubejnymi-hranilishami.html](https://medvestnik.ru/content/news/Bank-medicinskih-dannyh-Sechenovskogo-universiteta-planiruetsya-integriruvat-s-zarubejnymi-hranilishami.html) (Доступ: 20.03.2025).
13. *Vladimir L. Malykh, Igor N. Kononenko and Sergey V. Rudetskiy.* Estimation of accuracy of recommended diagnostic and treatment actions based on precedent approach. Proceedings of the International Conference e-Health 2016, Madeira, Portugal, July 1-4, 2016. P. 52-58.
14. *Малых В.Л., Рудецкий С.В.* Сравнительный анализ различных подходов к поддержке принятия врачебных решений на основе больших клинических данных. Московская научно-практическая конференция по Искусственному интеллекту в медицине MosCAI'17. 12 октября 2017 года, г. Москва, Конгресс-центр гостиницы Космос.
15. *Гольдина Т.А., Колбин А.С., Белоусов Д.Ю., Боровская В.Г.* Обзор исследований реальной клинической практики. Качественная Клиническая Практика. 2021;(1):56-63. <https://doi.org/10.37489/2588-0519-2021-1-56-63>
16. *Михеев А.Е.* Личный кабинет и расширение полномочий пациентов в цифровых экосистемах медицинской помощи. // Менеджер здравоохранения. 2023; S:46-54. DOI: 10.21045/1811-0185-2023-S-46-54.
17. Архитектура экосистем [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/companies/nspk/articles/532462/> (Доступ: 14.08.2024).
18. *Rubinstein IS.* Big Data: The End of Privacy or a New Beginning? International Data Privacy Law. (Vol. 3). Oxford: Oxford University Press (2013).
19. *Rubinfeld J.* The End of Privacy. New Haven: Yale Law School, Faculty Scholarship Series (2008).
20. *Ruotsalainen P. and Blobel B.* (2022) Transformed Health Ecosystems – Challenges for Security, Privacy, and Trust. Front. Med. 9:827253.doi: 10.3389/fmed.2022.827253
21. *Taviani H.T., Moore J.H.* Privacy protection, control of information, and privacy-enhancing technologies. Com Soc. (2001) 31:6-11. doi: 10.1145/572277.572278
22. *Majstorovic, Milosav & Regodić, Dušan & Grubor, Gojko.* (2016). Metamodel of a Service-Oriented Business. SINTEZA 2016 INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON ICT AND E-BUSINESS RELATED RESEARCH. 36-43. 10.15308/Sinteza-2016-36-43. [Электронный ресурс]. UR: <https://www.researchgate.net/publication/303561097> (Доступ: 26.05.2024).
23. *Vargo S.L. & Lusch R.F.* Evolving to a new dominant logic for marketing. Journal of Marketing, 68(1), 1-17. DOI:10.1509/jmkg.68.1.1.24036. [Электронный ресурс]. UR: <https://www.researchgate.net/publication/200167378>. (Доступ: 26.05.2024).
24. *Iyawa G.E., Marlien Herselman M., Adele Botha A.* Digital Health Innovation Ecosystems: from Systematic Literature Review to Conceptual Framework. Amsterdam: Elsevier, Procedia Computer Science (2016). P. 244-52. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/303898601>. (Доступ: 26.05.2024).
25. *Haleem A., Javaid M., Pratap Singh R., Suman R.* Exploring the revolution in healthcare systems through the applications of digital twin technology. Biomed Technol. (2023) 4:28-38. doi: 10.1016/j.bmt.2023.02.001
26. *Elkefi S., Asan O.* Digital twins for managing health care systems: rapid literature review. J Med Internet Res. (2022) 24: e37641. doi: 10.2196/37641
27. Глубокая медицина: может ли ИИ помочь вашему врачу понять вас? [Электронный ресурс] URL: <https://smart-lab.ru/blog/723357.php>. (Доступ: 23.04.2025).
28. Digital Twins in Healthcare: How Can Patients And Doctors Benefit From Them? [Электронный ресурс]. URL: <https://pixelplex.io/blog/digital-twins-healthcare/> (Доступ: 26.03.2025).
29. *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.
30. *Morande S.* Enhancing psychosomatic health using artificial intelligence-based treatment protocol: a data science-driven approach. Int J Inf Manag Data Insights. (2022) 2:100124. doi: 10.1038/s41746-022-00640-7
31. *Bruynseels K., Santoni de Sio F., van den Hoven J.* Digital twins in health care: ethical implications of an emerging engineering paradigm. Front Genet. (2018) 9:31. doi: 10.3389/fgene.2018.00031.
32. *Nishanth P.K.* Digital Twin Security: Steps to Take & Best Practices. [Электронный ресурс] URL: <https://www.toobler.com/blog/digital-twin-security> (Доступ: 30.05.2025).
33. *Topol E.J.* Editor. Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again. New York: Basic Books, 2019.
34. *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
35. *Metcalfe B., Boshuizen H.C., Bulens J. and Koehorst J.J.* Digital twin maturity levels: a theoretical framework for defining capabilities and goals in the life and environmental sciences [version 1; peer review: 3 approved with reservations]. F1000Research 2023, 12:961. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.12688/f1000research.137262.1>. (Доступ: 25.08.2025).
36. *Pravettoni G., Triberti S.* P5 eHealth: An Agenda for the Health Technologies of the Future. Berlin: Springer Open (2020). P. 3-17. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/338319393>. (Доступ: 26.05.2024).



37. 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)
38. 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).
39. JPMorganChase. 2025 – Emerging technology trends. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jpmorgan.com/content/dam/jpmorgan/documents/technology/jpmc-emerging-technology-trends-report.pdf>. (Доступ: 19.07.2025)
40. Schweiger A., Sunyaev A., Leimeister J.M., Krcmar H. Information systems and healthcare XX: Toward seamless healthcare with software agents // *Commun. Assoc. Inform. Syst.* – 2007. – Vol. 19. – P. 692-709.

ORIGINAL PAPER

TECHNOLOGICAL STRUCTURE OF DEEP MEDICINE WITHIN A SMART MEDICAL ECOSYSTEM. PART 2: ARCHITECTURAL MODEL OF A PLATFORM ECOSYSTEM FOR SUPPORTING DEEP MEDICINE BASED ON DIGITAL TWINS

A.E. Mikheev ✉

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

✉ Corresponding author: Mikheev A.E., e-mail: miheev@interin.ru

ABSTRACT

The first part of the study substantiated the strategic transition from a reactive «curative» healthcare model to a proactive, preventive paradigm based on the principles of deep medicine. It highlighted the key role of synergy between the digital medical ecosystem and patient digital twin (digital shadow) technology in implementing this transition, and systematized a set of critical implementation barriers.

Objective: to develop and describe a specific architectural model and technological structure of a smart medical ecosystem designed to implement a preventive business model and overcome the identified barriers based on patient digital shadows.

Materials and methods. Based on an analysis of patient digital twin (PDT) implementation challenges, an ecosystem approach is proposed, involving the integration of PDT services into a unified platform environment. The principles of service-oriented architecture (SOA) and microservices architecture (MSA) were used to ensure flexibility, scalability, and loose coupling of components.

Results. A detailed technological meta-structure (architectural model) of a digital medical ecosystem is proposed. Its key artifacts are: a clinical data repository (CDR), a patient portal (PP), a virtual integrated electronic health record (vEHR), an operational data store (ODS), and AI systems. It is shown that the ecosystem approach solves key PDT implementation problems: it ensures data availability, aggregation, and quality through a unified management policy; implements information security mechanisms and continuity of care; and provides practical utility for all stakeholders (patients, doctors, healthcare organizations).

Conclusion. Integrating patient digital twins into a platform ecosystem significantly increases their value and utility compared to standalone solutions, enabling a shift towards personalized, preventive, and predictive medicine (5P medicine). Overcoming the remaining technological, regulatory, and ethical barriers requires a holistic systems approach, further research, and the development of a regulatory framework to fully realize the transformative potential of the technology.

Keywords: deep medicine, digital medical ecosystem, patient digital twin, digital shadow, architectural model, platform ecosystem, service-oriented architecture (SOA), preventive medicine, personalized medicine, clinical data repository (CDR), virtual electronic health record (vEHR), patient portal (PP), artificial intelligence (AI), internet of things (IoT), predictive analytics, 5P medicine, ecosystem management company, ecosystem policy.

For citation: Mikheev A.E. Technological structure of deep medicine within a smart medical ecosystem. Part 2: Architectural model of a platform ecosystem for supporting deep medicine based on digital twins. *Manager Zdravoohranenia*. 2026; 7:104-121. DOI: 10.21045/1811-0185-2026-7-104-121

REFERENCES

1. Mikheev A.E. Technological Structure of Deep Medicine within a Smart Medical Ecosystem. Part 1: Challenges of Modern Healthcare and the Target Concept of a Preventive Model Based on Digital Twins. *Manager Zdravookhranenia*. 2025; 12:101-120. DOI: 10.21045/1811-0185-2025-12-101-120.
2. Mikheev A.E. Prospects for Creating Digital Medical Ecosystems in Russia: Digital Twins and Other Technologies, Problems and Approaches. *Manager Zdravookhranenia*. 2024; S:4-32. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-S-4-32.
3. Mikheev A.E. Approaches to Developing a Conceptual Model of a Digital Medical Ecosystem Architecture. *Manager Zdravookhranenia*. 2024; S:33-52. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-S-33-52.





4. 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).
5. 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).
6. 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>. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/350081467_Represent_me_please_Towards_an_ethics_of_digital_twins_in_medicine (Accessed: 29.03.2025).
7. 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>.
8. Mikheev A.E. An Approach to Implementing Clinical Decision Support Systems Based on Service-Oriented Architecture Principles Using Digital Medical Ecosystem Services. *Manager Zdravookhranenia.* 2024; S:101-118. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-S-101-118.
9. 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).
10. Khomitskaya Yu.V., Osina G.S., Novoderezhkina E.A., Goldina T.A. Real-World Practice Studies: How to Develop and Implement a New Direction. Systematic Approach in Ensuring the Quality of Results. *Medical Technologies. Assessment and Choice.* 2021; 4(43): 16-27. [Online]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-rutinnoy-praktiki-kak-razrabotat-i-vnedrit-novoe-napravlenie-sistemnyy-podhod-v-obespechenii-kachestva-rezultatov> (Accessed: 15.05.2025).
11. Malykh V. L., Mikheev A.E., Rudetskiy S.V. Problem-Oriented Model of a Clinical Data Bank. *Software Systems: Theory and Applications*, 2018, 9:4(39), pp. 219-237. [Online]. Available: https://psta.psiras.ru/read/psta2018_4_219-237.pdf (Accessed: 30.08.2024).
12. Sechenov University Medical Data Bank Planned to be Integrated with Foreign Repositories. [Online]. Available: <https://medvestnik.ru/content/news/Bank-medicinskih-dannyh-Sechenovskogo-universiteta-planiruetsya-integriruvat-s-zarubejnymi-hranilishami.html> (Accessed: 20.03.2025).
13. Vladimir L. Malykh, Igor N. Kononenko and Sergey V. Rudetskiy. Estimation of accuracy of recommended diagnostic and treatment actions based on precedent approach. *Proceedings of the International Conference e-Health 2016, Madeira, Portugal, July 1-4, 2016*. P. 52-58.
14. Malykh V.L., Rudetskiy S.V. Comparative Analysis of Different Approaches to Clinical Decision Support Based on Big Clinical Data. Moscow Scientific and Practical Conference on Artificial Intelligence in Medicine MosCAI'17. October 12, 2017, Moscow, Kosmos Hotel Congress Center.
15. Goldina T.A., Kolbin A.S., Belousov D.Yu., Borovskaya V.G. Review of Real-World Clinical Practice Studies. *Quality Clinical Practice.* 2021;(1):56-63. <https://doi.org/10.37489/2588-0519-2021-1-56-63>
16. Mikheev A.E. Personal Account and Expansion of Patient Authority in Digital Healthcare Ecosystems. *Manager Zdravookhranenia.* 2023; S:46-54. DOI: 10.21045/1811-0185-2023-S-46-54.
17. Ecosystem Architecture [Online]. Available: <https://habr.com/ru/companies/nspk/articles/532462/> (Accessed: 14.08.2024).
18. Rubinstein I.S. Big Data: The End of Privacy or a New Beginning? *International Data Privacy Law.* (Vol. 3). Oxford: Oxford University Press (2013).
19. Rubenfield J. The End of Privacy. New Haven: Yale Law School, Faculty Scholarship Series (2008).
20. Ruotsalainen P. and Blobel B. (2022) Transformed Health Ecosystems – Challenges for Security, Privacy, and Trust. *Front. Med.* 9:827253. doi: 10.3389/fmed.2022.827253
21. Taviani H.T., Moore J.H. Privacy protection, control of information, and privacy-enhancing technologies. *Com Soc.* (2001) 31:6-11. doi: 10.1145/572277.572278
22. Majstorovic, Milosav & Regodić, Dušan & Grubor, Gojko. (2016). Metamodel of a Service-Oriented Business. *SINTEZA 2016 INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON ICT AND E-BUSINESS RELATED RESEARCH*. 36-43. 10.15308/Sinteza-2016-36-43. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/303561097> (Accessed: 26.05.2024).
23. Vargo S.L. & Lusch R.F. Evolving to a new dominant logic for marketing. *Journal of Marketing*, 68(1), 1-17. DOI: 10.1509/jmkg.68.1.1.24036. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/200167378> (Accessed: 26.05.2024).
24. Iyawa G.E., Marlien Herselman M., Adele Botha A. Digital Health Innovation Ecosystems: from Systematic Literature Review to Conceptual Framework. Amsterdam: Elsevier, *Procedia Computer Science* (2016). P. 244-52. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/303898601> (Accessed: 26.05.2024).
25. Haleem A., Javaid M., Pratap Singh R., Suman R. Exploring the revolution in healthcare systems through the applications of digital twin technology. *Biomed Technol.* (2023) 4:28-38. doi: 10.1016/j.bmt.2023.02.001
26. Elkefi S., Asan O. Digital twins for managing health care systems: rapid literature review. *J Med Internet Res.* (2022) 24: e37641. doi: 10.2196/37641
27. Deep Medicine: Can AI Help Your Doctor Understand You? [Online] Available: <https://smart-lab.ru/blog/723357.php> (Accessed: 23.04.2025).



28. 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).
29. Siddharth Ghatti, Livvy Ann Yurish, Haiying Shen, Karen Rheuban, Kyle Enfield, Nikki Reyer Facteau, Gina Engel, Kim Dowdell. Digital Twins in Healthcare: A Survey of Current Methods. Archives of Clinical and Biomedical Research. 7 (2023): 365–381.
30. Morande S. Enhancing psychosomatic health using artificial intelligence-based treatment protocol: a data science-driven approach. Int J Inf Manag Data Insights. (2022) 2:100124. doi:10.1038/s41746-022-00640-7
31. Bruynseels K., Santoni de Sio F., van den Hoven J. Digital twins in health care: ethical implications of an emerging engineering paradigm. Front Genet. (2018) 9:31. doi:10.3389/fgene.2018.00031.
32. Nishanth P.K. Digital Twin Security: Steps to Take & Best Practices. [Online] Available: <https://www.toobler.com/blog/digital-twin-security> (Accessed: 30.05.2025).
33. Topol E.J. Editor. Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again. New York: Basic Books, 2019.
34. 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/fhj.2021-0095
35. Metcalfe B., Boshuizen H.C., Bulens J. and Koehorst J.J. Digital twin maturity levels: a theoretical framework for defining capabilities and goals in the life and environmental sciences [version 1; peer review: 3 approved with reservations]. F1000Research 2023, 12:961. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12688/f1000research.137262.1> (Accessed: 25.08.2025).
36. Pravettoni G., Triberti S. P5 eHealth: An Agenda for the Health Technologies of the Future. Berlin: Springer Open (2020). P. 3–17. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/338319393> (Accessed: 26.05.2024)
37. Vallee A. (2023) Digital twin for healthcare systems. Front. Digit. Health 5:1253050. doi:10.3389/fgdth.2023.1253050. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/373744374_Digital_twin_for_healthcare_systems (Accessed: 28.03.2025).
38. Boris Zingerman. Not a Unified Russia: What's Wrong with Healthcare Digitalization. [Online] Available: <https://www.forbes.ru/healthcare/535926-ne-edinaa-rossia-cto-ne-tak-s-cifrovizaciej-zdravoohranenia> (Accessed: 15.05.2025).
39. JPMorganChase. 2025 – Emerging technology trends. [Online]. Available: <https://www.jpmorgan.com/content/dam/jpm/technology/driving-innovation/emerging-technology/JPMC-Emerging-Technology-Trends-Report-2025.pdf> (Accessed: 19.07.2025).
40. Schweiger A., Sunyaev A., Leimeister J.M., Krcmar H. Information systems and healthcare XX: Toward seamless healthcare with software agents. Commun. Assoc. Inform. Syst. – 2007. – Vol. 19. – P. 692–709.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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