

<https://doi.org/10.29296/25877305-2025-06-03>

## Роль цифровых двойников в терапевтическом сопровождении пациентов

**П.В. Селиверстов**<sup>1</sup>, кандидат медицинских наук, доцент,  
**В.Б. Гриневич**<sup>1</sup>, доктор медицинских наук, профессор,  
**В.Б. Крюков**<sup>1</sup>, академик РАН, доктор медицинских наук,  
профессор,

**Е.П. Минаков**<sup>2</sup>, доктор технических наук, профессор

<sup>1</sup>Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова  
Минобороны России, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского  
Минобороны России, Санкт-Петербург

**E-mail:** seliverstov-pv@yandex.ru

*Цифровой двойник пациента – это динамическая компьютерная модель, включающая медицинские и физиологические характеристики конкретного больного, то есть фактически цифровая копия человека. Медицинские данные пациента в динамике загружаются в данную модель, а выводы на основе модели могут применяться для коррекции терапии. Таким образом, электронная медицинская карта из статичного хранилища превращается в интерактивный инструмент, который способен прогнозировать развитие болезни и реакцию на различные медицинские вмешательства.*

**Ключевые слова:** цифровой двойник пациента, искусственный интеллект, персонифицированная медицина, моделирование заболевания, цифровая модель.

**Для цитирования:** Селиверстов П.В., Гриневич В.Б., Крюков В.Б. и др. Роль цифровых двойников в терапевтическом сопровождении пациентов. Врач. 2025; 36 (6): 13–9. <https://doi.org/10.29296/25877305-2025-06-03>

Цифровые двойники (ЦД) представляют собой виртуальные реплики реальных объектов, позволяющие имитировать их состояние и поведение на основе актуальных данных. Изначально эта концепция появилась в промышленности в контексте Индустрии 4.0, как модель физической системы, постоянно обновляемая сенсорными данными, для проведения виртуальных экспериментов [1]. Немного позднее аналогичный подход стали использовать и в медицинской практике по отношению к пациенту. Сегодня ЦД пациента (ЦДП) представляет собой динамическую компьютерную модель, включающую медицинские и физиологические характеристики конкретного больного, т.е. фактически является цифровой копией человека. Ключевым свойством ЦДП является двунаправленная связь с реальным прототипом. Так, по мере поступления новые медицинские данные (результаты анализов, показания датчиков и пр.) тут же загружаются в модель, а выводы модели могут сразу применяться для коррекции терапии [2–4]. Это превращает электронную медицинскую карту (ЭМК) из статичного хранилища в интерактивный инструмент, который способен прогнозировать развитие болезни и реакцию на вмешательства [2].

ЦДП выполняет функцию персонализированной «тестовой площадки» для врача, поскольку позволяет безопасно моделировать течение заболевания, предложить и опробовать различные схемы лечения, а также предсказать исходы, не подвергая риску самого пациента [5]. Современные достижения в области больших данных и искусственного интеллекта (ИИ) стимулировали внедрение ЦДП в здравоохранение. Так, накопленный опыт, огромные объемы клинических данных и рост вычислительных мощностей делают возможным создание точной и комплексной модели пациента [6]. Ожидается, что технология ЦД поможет преобразовать медицину, сделав ее более проактивной и точной на всех этапах – от диагностики и подбора терапии до реабилитации и профилактики [4]. Уже сегодня есть примеры, когда цифровые модели улучшают понимание патогенеза заболеваний и позволяют подбирать оптимальное лечение под конкретного пациента, воплощая принципы персонализированной медицины [2, 7]. Тем не менее, ЦД в здравоохранении остаются новой, активно развивающейся областью, несмотря на бурный рост интереса к ним. Бесспорно, что технология находится на ранней стадии внедрения и требует дальнейших исследований, стандартизации и формирования доказательной базы по эффективности [4].

### ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

За последние 5 лет в научной литературе накопилось множество работ, посвященных применению ЦД в медицине. Так, в ряде обзоров обобщены исследования, посвященные текущему состоянию этого вопроса. Так, картографический обзор ЦД (2022) выявил 88 релевантных научных статей по этой теме и отметил, что исследования ведутся интердисциплинарно по всему миру [3]. В этом обзоре также было перечислено не менее 15 коммерческих компаний, занимающихся разработкой медицинских ЦД, и ряд патентов, что свидетельствует о высоком интересе индустрии к подобной технологии [3]. Таким образом, помимо академических исследований формируется система разработчиков и стартапов, стремящихся внедрить ЦДП в медицинскую практику.

На сегодняшний день научные работы по ЦД охватывают разнообразные клинические области. Одним из драйверов стала кардиология, в которой потенциальная выгода от персонализированного подхода особенно очевидна. Например, G. Soorey и соавт. (2022) предлагают концепцию «здорового ЦД» для кардиологического пациента, в которой виртуальная модель сердца, регулярно получающая данные обследований, предсказывает риск осложнений и помогает оптимизировать выбор терапии при сердечно-сосудистых заболеваниях [3]. Конкретное подтверждение этому появилось в 2024 г., когда голландские исследователи продемонстрировали, что ЦД сердца способен с высокой точностью спрогнозировать эффективность имплантации кардиостимулятора у пациентов с сердечной недостаточностью [8]. В рамках данного исследования для 45 пациентов была создана индивидуальная компьютерная модель сердечно-сосудистой системы, на которой виртуально протестировали ресинхронизирующую терапию. Полученные прогнозы совпали с реальными исходами. Данный подход обеспечит персонифицированный отбор кандидатов на дорогостоящие процедуры [8].

Онкология является другой важной областью применения ЦДП. Здесь ЦДП используются для *in silico*-тестирования противоопухолевых стратегий. Так, создавая виртуальную модель опухоли конкретного пациента, ис-

следователи могут опробовать различные препараты и их комбинации, чтобы выяснить, какой режим терапии даст наилучший эффект до начала лечения. Таким образом, интеграция геномных данных пациента в онкологического ЦД позволяет прогнозировать ответ опухоли с определенными мутациями на таргетные препараты [9]. По сути, выявляя ключевые драйверные генетические изменения, ЦД может предсказать чувствительность опухоли к тем или иным лекарствам, что особенно ценно при подборе персонализированной химиотерапии [9]. Отмечено, что подобные модели могут даже служить основой для разработки индивидуальных противораковых вакцин, нацеленных на уникальный молекулярный профиль опухоли пациента [9]. В последние годы сообщалось об успешном воспроизведении клинических испытаний с помощью ЦДП, например, имитация результатов лечения группы онкобольных в цифровой среде позволила с высокой точностью предугадать исходы реального испытания [10]. Несмотря на то, что подобные подходы носят экспериментальный характер, они демонстрируют огромный потенциал использования ЦД в онкологии – от оптимизации терапии до ускорения разработки новых лекарственных препаратов.

Кроме того, ведутся исследования по применению ЦД в реабилитации и управлении хроническими неинфекционными заболеваниями. В обзоре E. Mikołajewska и соавт. (2024) отмечается, что ЦДП, оснащенные ИИ, способны произвести прорыв в физиотерапии и восстановительном лечении [11]. Например, виртуальная модель пациента после инсульта может проигрывать разные сценарии реабилитации и предсказывать индивидуальный отклик на те или иные упражнения [11]. На основе таких прогнозов система способна рекомендовать персонализированную программу реабилитации, автоматически корректируя ее в реальном времени по мере восстановления больного [11]. Отмечено, что ЦД могут выявлять ранние признаки отклонений или осложнений в ходе восстановления и сигнализировать специалистам о необходимости вмешательства, тем самым реализуя проактивный подход к сопровождению пациента [11]. Одновременно ЦД служат тренажерами для врачей и физиотерапевтов. Так, с их помощью можно отрабатывать навыки ведения сложных случаев реабилитации в виртуальной среде [11].

Таким образом, исследования охватывают широкий спектр применения ЦДП, включая контроль за urgentными состояниями и течением хронических неинфекционных заболеваний. Также прослеживается центральная идея использования ЦДП, состоящая в помощи в принятии более обоснованных клинических решений и персонализированном подходе.

В опубликованных пилотных проектах продемонстрированы значительные результаты от внедрения элементов цифрового моделирования. По данным испытаний, в клиниках, опробовавших технологии ЦД, время, необходимое для установки диагноза, сократилось на 30–35%, а точность прогнозирования клинического течения болезни улучшилась на 20% [5]. Также зафиксировано снижение доли нецелесообразных диагностических и лечебных процедур, что уменьшает лишнюю нагрузку на пациента и систему здравоохранения [5]. Подобные обнадеживающие данные, полученные на ранних этапах внедрения, подтверждают принципиальную применимость ЦД в клинической практике и их системную ценность, как инструмента способного повысить эффективность и качество оказания медицинской помощи.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Создание работоспособного ЦДП требует слияния разнородных технологий и данных. Базой для ЦД служит интеграция данных о пациенте из множества источников. В идеале используются записи из ЭМК пациента, такие как анамнез, результаты лабораторных и инструментальных исследований, заключения специалистов, показания носимых сенсоров, генетическая информация и другие omics-данные, диагнозы и пр. [5]. Все эти разноплановые сведения должны быть объединены в единую цифровую платформу, и на их основе строится компьютерная модель, включающая статистические алгоритмы, модели машинного обучения, биофизические симуляторы, воспроизводящие работу органов. Как правило, на практике реализуются комбинированные подходы. Так, широко используются методы глубинного обучения для анализа изображений и больших массивов клинических данных [9], но вместе с тем высказывается мнение о необходимости их дополнения механистическими моделями, основанными на известных законах физиологии [12]. Включение многоуровневых симуляций, отражающих биологические механизмы (например, гемодинамику сердца или клеточные сигнальные пути), позволяет сделать ЦД более «прозрачным» и биологически правдоподобным [12]. В свою очередь это позволит расширить возможности по испытанию разных стратегий лечения, имитируя на механистической модели действие препарата или манипуляции, благодаря чему врачи смогут понять причины того или иного отклика организма, а не только получить прогноз на основе корреляций.

Архитектура ЦД предполагает непрерывный обмен информацией между физическим пациентом и виртуальной моделью. С одной стороны, модуль сбора данных регулярно обновляет его новыми показателями, в идеале это должно происходить в режиме реального времени, как при телемедицинском мониторинге. С другой стороны, сама модель генерирует предиктивные данные, такие как прогнозы течения болезни, вероятности осложнений, рекомендации по выбору или корректировке терапии. Эти рекомендации передаются врачам и пациенту, замыкая цикл «физический объект ↔ цифровой объект» [2]. Для реализации подобного двунаправленного контура необходимы современные сети передачи данных, облачные вычислительные ресурсы и защищенные протоколы обмена медицинской информацией. В последние годы значительный прогресс в этой области достигнут благодаря развитию Интернета вещей (IoT) в медицине и внедрению 5G-сетей, которые позволяют передавать большие объемы данных от устройств пациента на облачные платформы практически мгновенно. Параллельно с этим облачные инфраструктуры и центры обработки данных, поддерживаемые технологиями ИИ, берут на себя вычислительно трудоемкие задачи анализа полученных данных пациента [6, 13]. В результате стало возможным практически в реальном времени обновлять ЦД и получать от него советы по ведению пациента.

Чтобы цифровые модели эффективно работали в клинике, им необходима совместимость с существующими системами и стандартами. Стандартизация – одно из ключевых технологических направлений, без которого широкое внедрение ЦД затруднено. ЦД должен бесшовно интегрироваться с ЭМК, системами обязательного/добровольного медицинского страхования, регистрами и т.д., что требует единых форматов данных и интерфейсов. Понимая это, профессиональное сообщество приступило к разработке стандартов и нормативов для медицинских ЦД. Например, в России в 2024 г. был разработан проект национального стандарта ЦД медицин-

ского назначения (при участии Первого МГМУ им. И.М. Сеченова и Санкт-Петербургского Политеха) [14]. Предполагается, что стандарт установит общие требования к созданию и использованию таких моделей, а также классифицирует возможные области применения — от повышения качества медицинской помощи до обучения персонала и научных исследований [14]. Международные организации также инициируют работы по унификации понятий и технических требований к ЦД в здравоохранении, чтобы обеспечить их интероперабельность и безопасность.

Немаловажны и вопросы кибербезопасности при реализации ЦД. Поскольку в модель загружаются конфиденциальные медицинские данные, то необходимо обеспечить их защиту на всех этапах — от сбора и передачи данных, до хранения. На сегодняшний день проблема частично решается применением методов анонимизации данных пациента, шифрования каналов связи, строгой системой разграничения доступа к модели. Также технические аспекты включают и надежность системы, поскольку сбои или задержки в передаче данных могут приводить к устаревшим прогнозам. В связи с чем инфраструктура ЦДП должна быть отказоустойчивой, с возможностями резервного копирования и восстановления.

Таким образом, технологическая платформа ЦДП сочетает в себе современные средства сбора данных о пациенте, алгоритмы их обработки (AI/ML) и биофизические симуляции, высокоскоростную IT-инфраструктуру для обмена информацией, а также стандартизованные протоколы для интеграции в клинические процессы. Все эти компоненты должны работать согласованно, чтобы врач получал от ЦД актуальные и достоверные рекомендации в удобной для восприятия форме, вписывающийся в его рабочий процесс.

#### КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Одним из наиболее показательных клинических примеров использования ЦД является проект виртуального сердца пациента. Кардиологи одними из первых начали создавать детальные математические модели сердца — «цифровые сердца» — для прогнозирования исходов вмешательства. В 2024 г. опубликованы результаты клинического исследования, в котором для группы пациентов с хронической сердечной недостаточностью перед имплантацией кардиоресинхронизирующих устройств (кардиостимуляторов) создали персональные ЦД их сердечно-сосудистой системы [8]. Этот ЦД сердца представлял собой сложную модель гемодинамики, построенную на базе платформы CircAdapt, настроенную под анатомию и функции каждого пациента. Затем виртуально симулировали работу кардиостимулятора при различных настройках для каждого больного. Модель предсказала, у каких пациентов произойдет улучшение насосной функции, обратное ремоделирование левого желудочка при определенной оптимальной настройке устройства. Фактические клинические результаты подтвердили точность таких прогнозов, что демонстрирует ценность ЦД. Так, в исследовании смогли заранее выявить пациентов, у которых действительно будет положительная динамика от проводимой терапии, и подобрать им оптимальный режим стимуляции [8]. Этот пример персонализированной кардиологии наглядно демонстрирует принятие решения о выборе терапии с помощью цифрового эксперимента, проведенного на «виртуальном пациенте» с положительным результатом.

Другой кардиологический пример модели сердца для оценки риска осложнений представлен компанией Siemens

Healthineers, разрабатывающей ЦД сердца для пациентов с различными сердечно-сосудистыми патологиями, который позволяет прогнозировать риск аритмий или сердечной недостаточности в зависимости от тактики лечения [5]. Такой двойник интегрирует данные визуализации (магнитно-резонансная томография сердца, компьютерная томография (КТ) коронарных артерий, результаты нагрузочных тестов и др.) и строит персонализированную 3D-модель сердца, виртуально «прогоняя» на ней разные сценарии (например, проведение операции, установка клапана или изменение схемы терапии). Врачи могут оценить вероятность осложнений, таких как инфаркт, тромбообразование, прогрессирование сердечной недостаточности [5]. Это помогает принять превентивные меры или изменить план лечения до того, как нежелательное событие произойдет в реальности. Подобные решения находятся в стадии клинических испытаний, но перспективы их применения обнадеживают. С их помощью можно значительно повысить безопасность инвазивных вмешательств и лекарственной терапии в кардиологии за счет тщательной виртуальной проработки.

В онкологической практике ЦД открывают возможности для персонализации лечения злокачественных новообразований. Один из примеров — создание ЦД опухоли на основе данных конкретного пациента с целью подбора таргетной терапии. Так, при лечении метастатического колоректального рака можно построить модель, учитывающую мутации в генах опухоли (*KRAS*, *TP53* и др.), профиль экспрессии, результаты позитронно-эмиссионной томографии/КТ и т.д. Модель имитирует рост опухоли и реакцию на различные препараты (цитостатики, моноклональные антитела, иммунотерапию). В одном из исследований показано, что анализ *in silico* с помощью ЦД, идентифицируя ключевые «driver»-мутации рака, способен предсказать эффективность конкретных лекарств для данного молекулярного подтипа опухоли [9]. Это чрезвычайно важно, поскольку даже пациенты с одинаковым диагнозом могут принципиально по-разному реагировать на лечение из-за генетической гетерогенности опухолей. В этом случае ЦД функционировать как виртуальная платформа для проб и ошибок, в которой можно протестировать десятки препаратов и их комбинации за считанные часы и выявить наиболее перспективный вариант, который затем будет назначен пациенту. Например, моделирование на ЦД может показать, что опухоль с определенной мутацией *BRAF* не ответит на стандартную химиотерапию, зато чувствительна к комбинации целевого препарата с иммуноонкологическим средством. При этом врач выберет именно эту схему лечения для пациента, повышая шанс на успех. Кроме того, ЦД применяются в онкологии для прогноза прогрессирования заболевания.

Виртуальная модель, «обученная» на больших данных, способна предсказать вероятность рецидива после операции или метастазирования, учитывая множество факторов, и тем самым помочь определить оптимальную интенсивность последующей терапии и наблюдения. Компания Philips соощает об использовании технологии виртуальных пациентов при подборе индивидуальной терапии онкологическим [5], речь идет о системах, где ЦД помогает сопоставить профиль пациента с базой данных о реагировании опухолей на лечение и выдать рекомендацию по оптимальной терапии. В перспективе по мере накопления данных такие системы могут стать неотъемлемой частью онкологических консилиумов, повышая обоснованность и успешность принимаемых решений.

## РЕАБИЛИТАЦИЯ И ХРОНИЧЕСКИЕ НЕИНФЕКЦИОННЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ

В сфере реабилитационной медицины ЦД используются для сопровождения пациента на протяжении длительного восстановительного лечения. В качестве практического примера можно привести виртуального двойника ортопедического пациента после эндопротезирования сустава. После операции пациенту обычно назначается курс физиотерапии, упражнения, постепенное увеличение нагрузки. В данном случае ЦД может представлять биомеханическую модель пораженного сустава и конечности в целом, индивидуализированную под параметры пациента. Получая данные с датчиков (угол сгиба сустава, нагрузка, амплитуда движений, данные о боли) модель оценивает динамику восстановления. Если прогресс идет быстрее ожидаемого, то ЦД может предложить раньше повысить нагрузку, добавив новые упражнения, если же заметно отставание или появляются тревожные признаки (например, снижение диапазона движений, указывающее на возможное осложнение), система сигнализирует врачу о необходимости коррекции лечения [11].

Таким образом, терапия становится адаптивной в реальном времени. Подобный подход испытывается, к примеру, в нейрореабилитации после инсульта. Так, ЦД, интегрированный с робототехническим тренажером для разработки паретической конечности, следит за показателями усилий и электроэнцефалографии пациента и динамически настраивает уровень поддержки движений, добиваясь максимальной нейропластичности. Первые результаты показывают ускорение восстановления функций по сравнению со стандартным протоколом за счет точной подстройки под каждого пациента [11].

Кроме непосредственного участия в лечении ЦД в реабилитации служит инструментом телемедицины. Так, в виртуальной модели могут «встречаться» врач и пациент на расстоянии. Например, пациент выполняет дома упражнения, а данные с его носимых сенсоров поступают в ЦД, и реабилитолог в другом городе через интерфейс видит в режиме реального времени, как продвигается занятие, корректируя упражнения через платформу. Это особенно ценно для удаленных или маломобильных пациентов, для которых очный визит затруднен [11]. При этом ЦД обеспечивает объективный контроль за соблюдением назначений, так как «видит» все параметры активности пациента и может напоминать или мотивировать больного к выполнению программы. Отмечено, что визуализация собственного прогресса на экране (например, виртуальная модель, показывающая улучшение объема движений или силы мышц со временем) повышает у пациентов приверженность к реабилитации [11].

### ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПРИМЕРЫ

Хотя прямая клиническая выгода является главным предназначением ЦД, нельзя не упомянуть о возможности его применения при обучении врачей и организации здравоохранения. В учебном процессе ЦД уже сегодня используются в симуляционных центрах. Так, в Первом МГМУ им. И.М. Сеченова внедрены цифровые симуляторы пациентов для подготовки ординаторов и разбора сложных клинических случаев [5]. Студенты могут отрабатывать навыки диагностики и назначения лечения на виртуальных пациентах, которые ведут себя как реальные люди, реагируя изменением параметров на введение препарата или проведение манипуляции. Бесспорно, подобные подходы повышают качество подготовки, позволяя моделировать редкие или критические сценарии без

риска для живых больных. В перспективе такие симуляторы, подключенные к реалистичным манекенам, станут стандартным элементом обучения клиническим дисциплинам.

На уровне организации здравоохранения ЦД пока применяются точечно, но имеют значительный потенциал. Примером может служить использование цифровых моделей для оптимизации работы лечебных учреждений. В 2023 г. частная лабораторная сеть Инвитро объявила о внедрении технологии ЦД для планирования и развития сети своих филиалов [15]. Речь идет о цифровой модели организации, которая позволяет на основе данных о потоках пациентов, загрузке оборудования и персонала тестировать различные управленческие решения (открытие нового офиса, изменение графика работы, перераспределение ресурсов) и выбирать наиболее эффективные. Хотя это выходит за рамки непосредственного терапевтического сопровождения пациентов, такой «организационный» ЦД косвенно улучшает и качество оказания помощи, рационализируя рабочие процессы. В будущем можно представить и ЦД целой больницы, в котором моделируются движения пациентов, работа отделений для выявления задержек, чтобы оптимизировать маршрутизацию больных и пр. Некоторые зарубежные медицинские центры уже экспериментируют в этом направлении, и первые результаты показывают сокращение времени ожидания и более эффективное использование оборудования [16].

Таким образом, на системном уровне ЦД могут повысить операционную эффективность здравоохранения, что особенно важно при нехватке медицинских кадров и росте нагрузки на систему.

### ВЫЗОВЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Несмотря на значительный прогресс, на пути широкого внедрения ЦД в терапевтическое сопровождение стоит ряд серьезных вызовов, в первую очередь касающихся данных и их качества, что является фундаментальной проблемой. Полноценный ЦД требует огромного объема точных, разносторонних и обновляемых данных о пациенте. В реальности же медицинские данные часто фрагментированы и не структурированы. Даже базовая цифровизация медицинских учреждений недостаточна: согласно отчету Минздрава России, только около 38% российских клиник в 2024 г. вели ЭМК в полном объеме [5]. Остальные по-прежнему полагаются на бумажную документацию или частично дублируют данные, что затрудняет агрегирование информации для ЦД. Кроме того, разные информационные системы могут быть несовместимы между собой, а отсутствие единого стандарта мешает свести лабораторные, клинические, фармакологические и прочие данные пациента воедино. Даже при наличии данных критически важна их достоверность, поскольку ошибки и пропуски в исходной информации могут повлечь неточность создания ЦД. Таким образом, пока не будут решены вопросы стандартизации медицинских данных и наполнения электронных баз, полноценное создание ЦД для большинства пациентов остается затруднительным.

Исследователи также указывают на методологические сложности интеграции разнородных данных. Так, необходимы структуры и платформы, способные обработать большие объемы медицинских данных из множества различных источников (от генома до окружения пациента) и объединять их в целостную модель [12]. Одновременно отмечается потребность в надежных математических моделях, описывающих организм на разных уровнях, от клеточного до органного, с достаточной точностью [12]. Достичь такой мультимасштаб-

ной модели чрезвычайно сложно, учитывая сложность биологии человека. Также сказывается дефицит врачебных кадров и неготовности медицинского персонала, включая руководителей медицинских учреждений, к использованию новых информационных технологий на основе ИИ в повседневной деятельности [17, 18].

Также одними из ключевых являются инфраструктурные и организационные проблемы. Многие медицинские учреждения просто не имеют ресурсов для внедрения и поддержки ЦД. Требуются не только мощные серверы и программное обеспечение, но и специалисты — аналитики данных, биомедицинские инженеры, IT-разработчики, разбирающиеся и в медицине, и в технологиях ИИ. В настоящее время лишь немногие ведущие клиники и исследовательские центры располагают подобными командами. Кроме того, необходимо обучить и существующий медицинский персонал работе с новым инструментом.

Немаловажно, чтобы интерфейс ЦД был интуитивно понятен врачу, интегрирован в привычный клинический рабочий процесс, иначе технология будет отвергнута из-за сложности ее восприятия. Так, существует «разрыв» между IT-решением и его восприятием практикующим врачом. Например, если платформа генерирует вероятностный прогноз осложнений, врачу нужно понимать, как этим воспользоваться в решении по пациенту. В связи с чем многие исследователи отмечают слабую проработанность вопросов внедрения ЦД в клинический процесс [11]. Часто создается впечатляющая с технической точки зрения модель, но не определено, кто и как будет использовать ее выводы на практике, в результате такие проекты остаются на этапе пилотов. Без тесного сотрудничества разработчиков и медиков на этапе дизайна системы это препятствие преодолеть достаточно сложно.

С точки зрения доказательной медицины пока недостаточно прямых клинических доказательств пользы ЦД. Есть отдельные успешные примеры, но для широкого признания технологии профессиональным сообществом нужны масштабные сравнительные исследования. Вопрос «улучшают ли ЦДП конечные исходы лечения?» пока остается открытым. Тем не менее, предварительные данные многообещающие, однако требуется больше рандомизированных клинических испытаний, показывающих, что использование ЦДП приводит, например, к снижению летальности, сокращению осложнений или повышению качества жизни пациентов по сравнению со стандартным их сопровождением [11, 19]. На сегодняшний день таких исследований недостаточно, что и сдерживает принятие технологии регуляторами и страховщиками. Фактически ЦД предстает как новый тип медицинского изделия/технологии, требующий сертификации и включения в клинические рекомендации, а это, к сожалению, на современном этапе невозможно без обширной доказательной базы.

Отдельно следует рассмотреть этические и правовые аспекты. ЦД оперирует персональными данными о здоровье, в связи с чем становится актуальным вопрос о конфиденциальности. Пациенты должны быть уверены, что их цифровая копия и все данные в ней надежно защищены от несанкционированного доступа. Утечка таких данных или их ненадлежащее использование (например, для дискриминации при найме или страховании) представляет серьезную угрозу. Необходимо соблюдение законодательства о персональных данных (таких как GDPR в Европе, ФЗ-152 в России) и, возможно, разработка отдельных норм, касающихся ЦДП.

Кроме того, возникает вопрос ответственности за решения, принятые на основе рекомендаций ЦД. Если врач сле-

довал совету модели, и это привело к ошибке или нанесению вреда здоровью пациента, то кто в этом случае понесет ответственность, врач, разработчики алгоритма или никто? В настоящее время законодательство не содержит прямых положений об использовании ИИ в качестве консультативных систем в медицине, что создает правовой вакуум. В России, например, по состоянию на 2024 г. не было официально утвержденных правил или методических рекомендаций по применению ЦД в клинике [5]. Подобная нормативная неопределенность затрудняет внедрение даже там, где готова сама система и администрация лечебно-профилактического учреждения (ЛПУ). Последняя может опасаться юридических и страховых рисков и воздержаться от использования ЦД до появления четких регламентов. Отставание регулирования от технологий оценивается экспертами в 2–3 года [5], и это отставание нужно оперативно сокращать. Тем более, что указом Президента №490 утверждена «Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года», которая определяет здравоохранение как приоритетную отрасль для исследований, разработок и внедрения технологий ИИ, что должно способствовать реализации стратегических целей и задач.

Наконец, нельзя забывать о экономических и социальных барьерах. Внедрение современных технологий на основе ИИ, в том числе ЦДП, является ресурсозатратным процессом, требующим инвестиций. Не у всех ЛПУ есть возможность закупить необходимое оборудование и программное обеспечение. В тех же случаях, когда технологию поставляют коммерческие компании, встает вопрос стоимости использования. Нужно понимать, увеличивает ли ЦД расходы на лечение или, напротив, в перспективе сокращает их за счет профилактики развития осложнений, что также предстоит изучить в экономических исследованиях. Крайне важно, чтобы используемые технологии не усиливали неравенство в доступности медицинской помощи. Если высокотехнологичные ЦД будут доступны только в крупных центрах или платных клиниках, то пациенты, проживающие на отдаленных территориях или с низким достатком, могут оказаться в затруднительном положении. В связи с чем параллельно техническому развитию должны прорабатываться стратегии всеобщего внедрения. Подобные инициативы возможны при условии государственной поддержки программ цифровизации медицины, обеспечивающие ресурсами регионы. Тем более цифровая трансформация здравоохранения в нашей стране сегодня является одной из ключевых задач и реализуется в рамках Национального проекта «Продолжительная и активная жизнь».

Таким образом, основные вызовы на пути широкого внедрения ЦДП — это данные, доказательства, доверие и стандарты. Требуется преодолеть каждое из этих препятствий, чтобы инновация перешла из разряда экспериментальных в разряд повседневных клинических инструментов.

### ПЕРСПЕКТИВЫ И СИСТЕМНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Несмотря на перечисленные сложности, тренд в здравоохранении однозначно смещается в сторону цифровизации и персонализации, а ЦД рассматриваются как одна из ключевых технологий ближайшего будущего. Организационные структуры здравоохранения начинают готовиться к их интеграции. Показательно, что Минздрав России в 2025 г. включил ЦД в перечень приоритетных технологий медицины наряду с ИИ и телемедицинскими технологиями [5].

Подобные действия со стороны государства подтверждают признание значимости этого направления и готовность к содействию в его развитии. Сегодня в разных странах запу-

скаются национальные программы, исследовательские консорциумы и пилотные проекты, объединяющие врачей, IT-специалистов, ученых для апробации технологий на основе ИИ, в том числе и ЦД, в реальной клинической практике [20, 21]. Такие мультидисциплинарные коллаборации призваны решить проблему разобщенности специалистов и обеспечить обмен опытом. Ожидается, что уже в ближайшей перспективе мы увидим рост числа внедрений. Так, по прогнозу Ассоциации медицинского ИИ, к 2026 г. до 15% частных клиник в России начнут применять цифровые модели пациентов в повседневной медицинской практике [5]. Медицинские вузы тоже не остаются в стороне и ведущие университеты (Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Первый МГМУ им. Сеченова, Первый СПбГМУ им. Павлова и др.) внедряют симуляторы на основе ЦД в программы обучения, готовя новое поколение врачей, умеющих работать с цифровыми инструментами [5]. Вероятно в ближайшие 5–10 лет навыки взаимодействия с системами ИИ и ЦД станут таким же обязательным элементом квалификации врача, как владение компьютером или умение читать ЭКГ.

Одним из решающих факторов успеха станет стандартизация и регламентация. В ближайшие годы ожидается появление первых стандартов и клинических рекомендаций, посвященных ЦДП. Национальный стандарт, разрабатываемый в России, должен заложить терминологическую и классификационную основу, определить требования к качеству моделей, безопасности и этике их применения [14]. Аналогичные процессы происходят при участии международных организаций (ISO, IEEE, ВОЗ), которые также разрабатывают универсальные стандарты на уровне данных и интерфейсов. Это облегчит обмен наработками между странами и совместимость различных систем. Юридическое оформление статуса ЦД возможно, как вида медицинского изделия – программного, поднадзорного регуляторам здравоохранения, что позволит выводить их на рынок с понятными правилами сертификации. Все это является предпосылками для перехода от единичных решений к массовому развитию рынка ЦД. Уже сегодня его объем касательно предлагаемых решений ЦДП в здравоохранении оценивается в 10 млрд долларов США (2023), а прогноз на 2028 г. превышает 110 млрд долларов США [20]. Такой взрывной рост инвестиций отражает уверенность в революционном потенциале технологии. Крупные IT- и медтех-компании активно инвестируют в разработку платформ ЦД, что бесспорно приведет к появлению новых продуктов на стыке медицины и информационных технологий.

В перспективе следует ожидать появления все более сложных и всеобъемлющих цифровых моделей человека. Эксперты полагают, что первые полномасштабные ЦДП могут быть созданы к середине следующего десятилетия. В России озвучена амбициозная цель – к 2035 г. получить ЦД человека, сопровождающего его на всех этапах жизни [20]. Это означает, что у каждого пациента потенциально будет свой постоянный виртуальный помощник, начиная от рождения (сбора генетических данных, перинатальной информации) и далее в течение жизни модель будет обновляться медицинскими сведениями, формируя уникальный «портрет» здоровья индивида. Такой двойник сможет предсказывать риски заболеваний задолго до их клинического проявления, разрабатывать персонализированные меры профилактики (например, скорректировать диету или образ жизни с учетом генетических предрасположенностей [20]), подсказывать врачу наилучшие варианты лечения при любом обращении, а в старости прогнозировать инволютивные процессы и рекомендовать геропротективные

стратегии [20]. По сути речь о переходе к персонифицированной медицине, когда каждое решение максимально адаптировано к конкретному пациенту на основе его ЦД. Конечно, достижение такого уровня требует решения множества научных и практических задач, но движение в этом направлении уже началось: совершенствуются «частичные» двойники моделей отдельных органов и систем – разрабатываются ЦД сердца и легких нового поколения [20], способные учитывать мельчайшие анатомические особенности по данным высокоточного сканирования. Постепенно эти разрозненные модели научатся объединять в единую экосистему, так называемые интегрированные мультимодальные ЦД.

С точки зрения системного эффекта, широкое внедрение ЦД способно существенно трансформировать здравоохранение. Во-первых, медицина станет более предиктивной: вместо реагирования на уже случившееся заболевание акцент сместится на прогнозирование и предупреждение. ЦД, непрерывно мониторя показатели здоровья, смогут заблаговременно сигнализировать о развивающихся отклонениях. Например, о формировании опухоли или риске инсульта, что позволит принять меры на доклинической стадии. Во-вторых, здравоохранение станет более персонализированным. Так, уйдет практика «средних» назначений, каждому пациенту терапия будет подбираться с учетом его уникальных особенностей (генетики, полиморбидности, образа жизни и пр.), смоделированных в ЦД. В-третьих, повысится эффективность и безопасность лечения. Виртуальное тестирование избавит от значительной части неэффективных или токсичных вмешательств, уменьшит число ошибок и нежелательных исходов. Это приведет к экономии ресурсов за счет более короткого срока лечения, уменьшения риска осложнений и количества госпитализаций, что повлечет снижение затрат для ЛПУ, страховых систем и страны в целом [5]. Для пациента выгоды не менее очевидны. Так, сократится количество ненужных процедур и анализов, врач быстрее определится с правильным диагнозом, предложит понятный план лечения, основанный на объективных данных [5]. Подобные меры повысят доверие пациентов к медицинским решениям, поскольку врач сможет четко обосновать свои рекомендации результатами моделирования, а не только эмпирическим опытом.

Конечно, столь оптимистичный сценарий возможен лишь при ответственном подходе к развитию современных технологий. Необходимо параллельно совершенствовать этические нормы применения ЦД и программы обучения врачей, чтобы они стали уверенными пользователями таких систем и понимали их ограничения. Очевидно, что уже сегодня ЦД становятся не просто модным трендом, а неотъемлемой частью стратегии развития современного здравоохранения [5]. Цель внедрения ЦДП – сделать медицину более точной, проактивной и ориентированной на пациента, что полностью соответствует цифровой политике нашего государства, концепции Healthcare 4.0 и мировым тенденциям здравоохранения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЦД в терапевтическом сопровождении пациентов представляют собой мощный инструмент, способный качественно изменить подход к лечению. Они позволяют перенести значительную часть неопределенности и экспериментов из плоскости реального здоровья пациента в виртуальную среду, в которой ошибки не влияют на жизнь и благополучие пациента. Уже продемонстрированы примеры успешного применения ЦД в кардиологии, онкологии, реабилитации, подтверждающие, что эта технология может повысить эф-

фективность и безопасность медицинской помощи. ЦД вписываются в парадигму персонализированной медицины, предоставляя врачам детальные знания о конкретном пациенте и прогнозы развития событий, а пациентам – таргетную и своевременную помощь.

Однако широкое внедрение технологии в настоящее время ограничено разными факторами – от технических до нормативно-этических. Необходимы стандарты, доказательная база и доверие со стороны пациентов и медицинского сообщества. При этом растет интерес исследователей и инвесторов к ЦД, а государство осознает важность направления и выстраивает необходимые условия для реализации инициатив. Если усилия разработчиков, врачей и регуляторов будут сведены воедино, то в ближайшее десятилетие ЦД смогут стать привычной частью клинической практики. Врач будущего станет работать в тандеме со своим «цифровым коллегой» – моделью пациента, которая непрерывно будет учиться и предлагать понятные решения. В свою очередь, пациенты получают персонализированный и предсказуемый подход при их сопровождении на всех этапах диагностики и лечения.

Таким образом, роль ЦД в терапевтическом сопровождении заключается в предоставлении нового уровня понимания и контроля над ходом диагностического и лечебного процесса. Это пример того, как слияние медицины и высоких технологий способно вывести здравоохранение на новый уровень развития, на котором индивидуальные особенности каждого пациента станут отправной точкой для всего процесса оказания медицинской помощи.

\*\*\*

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование отсутствует.

Статья поступила в редакцию / The article received: 20.12.2024.

Принята к публикации / Accepted: 30.01.2025.

## Литература / References

1. Nadeem M., Ahmad I., Ahmed Q. et al. A comprehensive review of digital twin in healthcare in the scope of simulative health-monitoring. *Digit Health*. 2025; 11. DOI: 10.1177/20552076241304078
2. Kagadis G.C., Kloukinas C., Moore K. et al. Digital Twins' Advancements and Applications in Healthcare, Towards Precision Medicine. *J Pers Med*. 2024; 14 (11): 1234. DOI: 10.3390/jpm14111234
3. Coorey G., Figtree G.A., Fletcher D.F. et al. The health digital twin to tackle cardiovascular disease – a review of an emerging interdisciplinary field. *NPJ Digit Med*. 2022; 5: 126. DOI: 10.1038/s41746-022-00640-7
4. Katsoulakis E., Wang Q., Wu H. et al. Digital twins for health: a scoping review. *NPJ Digit Med*. 2024; 7: 77. DOI: 10.1038/s41746-024-01073-0
5. Малов Д. Как цифровые двойники меняют диагностику в медицине. РБК Компании от 14.04.25 [Электронный ресурс]. [Malov, D. How digital twins are changing diagnostics in medicine. RBC Companies, April 14, 2025 [Electronic resource]. (in Russ.)]. URL: <https://companies.rbc.ru/news/MCGKSbhzhX/kak-tsifrovyye-dvojniki-menyayut-diagnosticsku-v-medsinsine/>
6. Rodriguez-Gonzalez A.B., Chitimali S., Mohan S. et al. Medical Digital Twin: A Review on Technical Principles and Clinical Applications. *J Clin Med*. 2025; 14 (2): 324. DOI: 10.3390/jcm14020324
7. Тайц Б.М. «10P медицина» в решении вопросов снижения смертности, увеличения продолжительности и повышения качества жизни пожилого населения. *Клиническая геронтология*. 2021; 27 (11-12): 76–9 [Tayts B.M. «P10 Medicine» for lower mortality, longer life expectancy and better quality of life in elderly people. *Clin Gerontol*. 2021; 27 (11-12): 76–9 (in Russ.)]. DOI: 10.26347/1607-2499202111-12076-079
8. Digital twin of heart patient can correctly predict outcomes of medical treatment. Maastricht University News, January 30, 2024 [Electronic resource]. URL: <https://www.maastrichtuniversity.nl/news/digital-twin-heart-patient-can-correctly-predict-outcomes-medical-treatment>
9. Wu H., Wang J., Liu M. et al. From virtual to reality: innovative practices of digital twins in tumor therapy. *J Transl Med*. 2025; 23: 100. DOI: 10.1186/s12967-025-06371-z

10. Scientists create cancer patients' digital twins to predict how well treatments may work. eCancer. 2024 [Electronic resource]. URL: <https://ecancer.org/en/news/25568-scientists-create-cancer-patients-digital-twins-to-predict-how-well-treatments-may-work>

11. Mikołajewska E., Prokopowicz P., Mikołajewski D. et al. Applications of Artificial Intelligence-Based Patient Digital Twins in Decision Support in Rehabilitation and Physical Therapy. *Electronics*. 2024; 13 (24): 4994. DOI: 10.3390/electronics13244994

12. Marshall M.S., Boukouvalas A., Wheeler B. et al. Challenges and opportunities for digital twins in precision medicine from a complex systems perspective. *NPJ Digit Med*. 2024; 7: 402. DOI: 10.1038/s41746-024-01402-3

13. Селиверстов П.В., Бакаева С.П., Шаповалов В.В. Оценка рисков социально значимых хронических неинфекционных заболеваний с использованием телемедицинской системы. *Врач*. 2020; 31 (10): 68–73 [Seliverstov P., Bakaeva S., Shapovalov V. A telemedicine system in the assessment of risks for socially significant chronic non-communicable diseases. *Vrach*. 2020; 31 (10): 68–73 (in Russ.)]. DOI: 10.29296/25877305-2020-10-13

14. В России создадут стандарт для цифровых медицинских двойников. Медвестник от 24.10.24 [Электронный ресурс] [Russia to create standard for digital medical twins. Medvestnik, 24 October 2024 [Electronic resource] (in Russ.)]. URL: <https://medvestnik.ru/content/news/V-Rossii-sozdadut-standart-dlya-cifrovyyh-medicinskih-dvoynikov.html>

15. Цифровые двойники в здравоохранении. Zdrav.Expert от 24.07.23 [Электронный ресурс] [Digital twins in healthcare. Zdrav.Expert, 24 July 2023 [Electronic resource]. (in Russ.)]. URL: [https://zdrav.expert/index.php/Статья:Цифровые\\_двойники\\_в\\_здравоохранении](https://zdrav.expert/index.php/Статья:Цифровые_двойники_в_здравоохранении)

16. Almalaiha M., Jenkins H., Ray P. Digital twin for healthcare systems. *Healthcare (Basel)*. 2023; 11 (20): 2738. DOI: 10.3390/healthcare11202738

17. Селиверстов П.В. Психология адаптации пациентов к использованию искусственного интеллекта при проведении скрининга хронических неинфекционных заболеваний. *Медицинский Совет*. 2024; 23: 266–72 [Seliverstov P.V. Psychology of patient adaptation to the use of artificial intelligence in screening for chronic noncommunicable diseases. *Medical Council*. 2024; 23: 266–72 (in Russ.)]. DOI: 10.21518/ms2024-551

18. Селиверстов П.В. Будущее сестринской профессии в эпоху искусственного интеллекта и роботизации здравоохранения. *Медицинская сестра*. 2025; 27 (3): 12–7 [Seliverstov P.V. The Future of Nursing in the Era of AI and Healthcare Robotization. *Meditsinskaya sestra*. 2025; 27 (3): 12–7 (in Russ.)]. DOI: 10.29296/25879979-2025-03-03

19. Seliverstov P.V., Shapovalov V., Vasin A. et al. Secure telemedicine platforms: implementation challenges and privacy protection mechanisms in distributed healthcare systems. *J Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, Dependable Applications*. 2025; 16 (1): 217–29. DOI: 10.58346/JOWUA.2025.11.013

20. Через 10 лет в России может появиться цифровой двойник человека. Newprospect.ru от 22.11.24 [Электронный ресурс] [In 10 years, Russia may see the emergence of digital human doubles. Newprospect.ru, 22 November 2024 (in Russ.)]. URL: <https://newprospect.ru/news/cherез-10-let-v-rossii-mozhet-poyavitsya-tsifrovoy-dvojnik-cheloveka>

21. Селиверстов П.В., Шаповалов В.В., Алешко О.В. Внедрение телемедицинских технологий на основе искусственного интеллекта в практику оказания амбулаторно-поликлинической помощи для проведения медицинского осмотра. *Медицинский алфавит*. 2023; 28: 44–9 [Seliverstov P.V., Shapovalov V.V., Aleshko O.V. Introduction of telemedicine technologies based on artificial intelligence into practice of providing outpatient care for medical examination. *Medical alphabet*. 2023; 28: 44–9 (in Russ.)]. DOI: 10.33667/2078-5631-2023-28-44-49

## THE ROLE OF DIGITAL DOUBLES IN THE THERAPEUTIC SUPPORT OF PATIENTS

Associate Professor **P. Seliverstov**<sup>1</sup>, Candidate of Medical Sciences; Professor **V. Grinevich**<sup>1</sup>, MD; Professor **V. Kryukov**<sup>1</sup>, Academician of the Russian Academy of Sciences, MD; Professor **E. Minakov**<sup>2</sup>, Doctor of Engineering Sciences  
<sup>1</sup>S.M. Kirov Military Medical Academy, Ministry of Defense of Russia, Saint Petersburg  
<sup>2</sup>A.F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, Ministry of Defense of Russia, Saint Petersburg

*The patient's digital double is a dynamic computer model that includes medical and physiological characteristics of a particular patient, that is, in fact, a digital copy of a person. The patient's medical data in dynamics are loaded into this model, and the conclusions based on the model can be used to correct therapy. Thus, an electronic medical card from a static storage turns into an interactive tool that is able to predict the development of the disease and a reaction to various medical interventions.*

**Key words:** patient's digital twin, artificial intelligence, personalized medicine, disease modeling, digital model.

**For citation:** Seliverstov P., Grinevich V., Kryukov V. et al. The role of digital doubles in the therapeutic support of patients. *Vrach*. 2025; 36 (6): 13–19. <https://doi.org/10.29296/25877305-2025-06-03>

**Об авторах / About the authors:** Seliverstov P.V. SPIN-код: 6166-7005, ORCID: 0000-0001-5623-4226; Grinevich V.B. SPIN-код: 1178-0242, ORCID: 0000-0002-1095-8787; Kryukov V.B. SPIN-код: 3900-3441, ORCID: 0000-0002-8396-1936; Minakov E.P. SPIN-код: 4819-0765