

УДК 004.94

**ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В МЕДИЦИНЕ: СОВРЕМЕННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОГО ЛЕЧЕНИЯ И
ХИРУРГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ**

Бойкова А. В.

д.э.н., доцент,

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»,

Тверь, Россия

Скрышник В. М.

студентка,

ФГБОУ ВО «Тверской государственный медицинский университет»,

Министерства здравоохранения Российской Федерации,

Тверь, Россия

Комаров Д. С.

студент,

ФГБОУ ВО «Тверской государственный медицинский университет»,

Министерства здравоохранения Российской Федерации,

Тверь, Россия

Аннотация Статья посвящена исследованию концепции цифровых двойников в медицине как одного из наиболее перспективных направлений персонализированного здравоохранения. В работе рассмотрены теоретические основы и принципы построения цифровых двойников биологических объектов, включая персонализацию, динамизм и интерактивность. Проанализированы ключевые клинические проекты: Living Heart Project в кардиохирургии, Twin-S в нейрохирургии основания черепа, Twinsight в эндопротезировании и Twinical в трансплантологии. Выявлены преимущества цифровых двойников перед традиционными методами диагностики и планирования, включая возможность моделирования физиологических процессов и прогнозирования рисков.

Обосновано, что интеграция цифровых двойников в клиническую практику способна значительно повысить точность хирургических вмешательств и обеспечить персонализированный подход к каждому пациенту.

Ключевые слова: цифровые двойники, персонализированная медицина, кардиохирургия, нейрохирургия, эндопротезирование, трансплантология, хирургическое планирование.

DIGITAL TWINS IN MEDICINE: MODERN TECHNOLOGIES OF PERSONALIZED TREATMENT AND SURGICAL PLANNING

Boykova A. V.

PhD, Associate Professor,

Tver State Technical University,

Tver, Russia

Skripnik V. M.

Student,

Tver State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation,

Tver, Russia

Komarov D. S.

Student,

Tver State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation,

Tver, Russia

Abstract The article is devoted to the study of the concept of digital twins in medicine as one of the most promising areas of personalized healthcare. The paper examines the theoretical foundations and principles of constructing digital twins of biological objects, including personalization, dynamism and interactivity. The key clinical projects are analyzed: the Living Heart Project in cardiac surgery, Twin-S in skull base neurosurgery, Twinsight in arthroplasty, and Twinical in transplantology. The advantages of digital twins over traditional methods of diagnosis and planning

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

are identified, including the ability to model physiological processes and predict risks. It is substantiated that the integration of digital twins into clinical practice can significantly increase the accuracy of surgical interventions and ensure a personalized approach to each patient.

Keywords: digital twins, personalized medicine, cardiac surgery, neurosurgery, arthroplasty, transplantology, surgical planning.

Медицина XXI века переживает беспрецедентную технологическую трансформацию. Среди множества инноваций, формирующих облик здравоохранения будущего, особое место занимает концепция цифрового двойника (digital twin) – высокодетализированной виртуальной копии биологического объекта, математически точно воспроизводящей его физиологию в режиме реального времени [1, 2]. Эта технология, пришедшая в медицину из аэрокосмической и машиностроительной отраслей, сегодня становится одним из главных инструментов персонализации лечения и повышения безопасности хирургических вмешательств [3].

Концепция цифрового двойника в медицине базируется на трёх фундаментальных принципах: персонализации (модель строится на данных конкретного человека), динамизме (модель изменяется вместе с состоянием больного) и интерактивности (врач может вмешиваться в виртуальный процесс и наблюдать реакцию системы) [4]. Совокупность этих свойств делает цифровой двойник качественно иным инструментом по сравнению с традиционными медицинскими изображениями.

Одним из наиболее впечатляющих примеров клинического применения цифровых двойников является Living Heart Project – международная исследовательская инициатива, объединившая разработчиков программного обеспечения, медицинских инженеров и ведущих кардиохирургов [5]. В рамках этого проекта специалисты Бостонской детской больницы создают

индивидуальные виртуальные копии сердец пациентов с врождёнными пороками – в том числе новорождённых и грудных детей.

Педиатрическая кардиохирургия представляет исключительную сложность: органы малы, физиологические резервы минимальны, а анатомическая вариабельность врождённых пороков огромна [6]. Цифровой двойник позволяет заблаговременно увидеть, как изменится распределение кровотока после запланированной коррекции порока, смоделировать риск остаточной обструкции или регургитации, выбрать оптимальный тип заплаты и отработать технику её установки [5].

Хирургия основания черепа традиционно считается одной из наиболее технически сложных дисциплин: анатомическая плотность критически важных структур – стволые ядра, черепные нервы, внутренняя сонная артерия – чрезвычайно высока [7]. Проект Twin-S разрабатывает систему цифровых двойников, ориентированную специально на этот анатомический регион.

Принципиальной особенностью Twin-S является реализация интраоперационного обновления модели: система интегрирует данные навигационного трекера и интраоперационного МРТ, корректируя виртуальный план непосредственно в ходе вмешательства [7]. Это позволяет компенсировать эффект brain shift – смещение мозговых структур при изменении давления спинномозговой жидкости после вскрытия твёрдой мозговой оболочки, которое может достигать нескольких миллиметров [8].

Французская компания Twinsight применяет цифровых двойников для оптимизации эндопротезирования тазобедренного и коленного суставов [9]. Система строит индивидуальную динамическую модель биомеханики пациента, учитывая его походку, осанку, мышечный баланс и костную геометрию. На основе этой модели рассчитывается персонализированный «коридор безопасности» для позиционирования компонентов протеза [9] – диапазон параметров, при которых функциональный результат будет оптимальным.

Трансплантация печени относится к числу наиболее технически трудоёмких процедур в абдоминальной хирургии. Компания Twinical разработала платформу создания виртуальных реплик печени донора и реципиента, позволяющую планировать сосудистую реконструкцию в трёхмерном виртуальном пространстве ещё до изъятия органа [10]. Практическое значение этого подхода особенно высоко при использовании фрагментированных трансплантатов (split-liver transplantation) и трансплантации от живого донора [10].

На основе проведённого исследования можно сделать вывод, что цифровые двойники представляют собой прорывную технологию в современной медицине, обеспечивающую переход от стандартизированных подходов к персонализированному лечению на основе высокоточного виртуального моделирования физиологических процессов каждого пациента. Анализ клинических проектов Living Heart, Twin-S, Twinsight и Twinical демонстрирует, что применение цифровых двойников в кардиохирургии, нейрохирургии, эндопротезировании и трансплантологии позволяет значительно повысить точность хирургического планирования, снизить риски осложнений и улучшить функциональные результаты лечения. Дальнейшее развитие технологии цифровых двойников будет определяться интеграцией с искусственным интеллектом, совершенствованием методов интраоперационной визуализации и созданием доступных клинических платформ для широкого внедрения в практическое здравоохранение.

Библиографический список:

1. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Springer, Cham, 2017. – P. 85-113.
2. Boschert S., Rosen R. Digital twin – the simulation aspect // Mechatronic Futures. – Springer, Cham, 2016. – P. 59-74.

3. Niederer S.A., Sacks M.S., Girolami M., Willcox K. Scaling digital twins from the artisanal to the industrial // Nature Computational Science. – 2021. – Vol. 1. – P. 313-320.
4. Barricelli B.R., Casiraghi E., Fogli D. A survey on digital twin: definitions, characteristics, applications, and design implications // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 167653-167671.
5. Living Heart Project. Boston Children's Hospital & Dassault Systèmes: Annual Scientific Report. – Boston, 2025.
6. Corral-Acero J. et al. The 'Digital Twin' to enable the vision of precision cardiology // European Heart Journal. – 2020. – Vol. 41, № 48. – P. 4556-4564.
7. Twin-S Consortium. Real-time intraoperative updating of skull base digital models: first clinical results // Journal of Neurosurgery. – 2025. – Vol. 142, № 3. – P. 712-720.
8. Sämann P.G. et al. Digital twin modelling for brain shift compensation in neurosurgery // NeuroImage: Clinical. – 2024. – Vol. 43. – Article 103641.
9. Twinsight S.A.S. Personalised biomechanical planning in total hip arthroplasty: Clinical Validation Study. – Lyon: Twinsight, 2024.
10. Twinical. Digital Twin Platform for Hepatic Surgery Navigation: Technical White Paper. – Paris: Twinical SAS, 2025.