

УДК 004.94

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В МЕДИЦИНЕ

Бойкова А. В.

д.э.н., доцент,

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»,

Тверь, Россия

Скрыпник 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 магистральных тенденций развития технологии цифровых двойников в медицине. В работе рассмотрены четыре ключевых направления эволюции: интеграция геномики и протеомики в физиологические модели, позволяющая прогнозировать молекулярные процессы; расширение масштаба моделирования от отдельных органов к мультиорганной модели «цифрового человека»; демократизация доступа через платформы «двойник как услуга» (DTaaS); интеграция с роботизированной хирургией для повышения точности вмешательств. Обосновано, что развитие по указанным направлениям формирует новую парадигму персонализированной и предиктивной медицины. Сделан вывод, что

дальнейший прогресс будет определяться синергией вычислительных мощностей, биомедицинских данных и клинической валидации.

Ключевые слова: цифровые двойники, персонализированная медицина, геномика, мультиорганное моделирование, DTaaS, роботизированная хирургия.

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS IN MEDICINE

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 main trends in the development of digital twin technology in medicine. The paper examines four key directions of evolution: the integration of genomics and proteomics into physiological models, which makes it possible to predict molecular processes; the expansion of modeling scale from individual organs to a multi-organ model of the "digital human"; the democratization of access through "Digital Twin as a Service" (DTaaS) platforms; integration with robotic surgery to increase the accuracy of interventions. It is substantiated that development in these directions forms a new paradigm of personalized and predictive medicine. It is concluded that further progress will be

determined by the synergy of computing power, biomedical data and clinical validation.

Keywords: digital twins, personalized medicine, genomics, multi-organ modeling, DTaaS, robotic surgery.

Технология цифровых двойников (digital twins) представляет собой одно из наиболее перспективных направлений цифровой трансформации медицины, обеспечивающее переход от стандартизированных подходов к персонализированному лечению на основе высокоточного виртуального моделирования физиологических процессов. Эволюция данной технологии определяется несколькими магистральными тенденциями, среди которых ключевое место занимает интеграция геномики и протеомики в физиологические модели, что открывает возможности для прогнозирования молекулярных процессов и разработки персонализированных схем терапии.

Вторым значимым направлением является расширение масштаба моделирования от отдельных органов к интегральной мультиорганной модели – «цифровому человеку», что особенно актуально для пациентов с сочетанной патологией. Параллельно развивается демократизация доступа к технологии посредством платформ «двойник как услуга» (Digital Twin as a Service, DTaaS), что позволит распространить преимущества цифровых двойников за пределы крупных академических центров.

Наконец, интеграция цифровых двойников с роботизированной хирургией открывает перспективу полуавтономного выполнения хирургических вмешательств, меняя роль хирурга и повышая точность и безопасность оперативных вмешательств.

Эволюция технологии цифровых двойников в медицине определяется несколькими магистральными тенденциями. Первая – интеграция геномики и протеомики в физиологические модели [1, 2]. Следующее поколение двойников

будет моделировать молекулярные процессы: экспрессию генов-регуляторов воспаления, фармакокинетику препаратов, динамику опухолевого микроокружения. Это откроет путь к персонализированной онкологии, где двойник предскажет ответ конкретной опухоли на ту или иную схему химиотерапии.

Вторая тенденция – расширение масштаба моделирования от органа к организму [3, 1]. Если сегодня большинство двойников воспроизводят отдельный орган или систему, то в перспективе речь идёт о создании «цифрового человека» – интегральной мультиорганной модели, особенно актуальной для пациентов с полиорганной патологией.

Третья тенденция – демократизация доступа к технологии посредством платформ «двойник как услуга» (Digital Twin as a Service, DTaaS) [4]. По мере снижения стоимости вычислительных ресурсов преимущества технологии распространятся за пределы крупных академических центров – в региональные больницы и амбулаторную практику.

Четвёртая тенденция – интеграция с роботизированной хирургией [3]. Связка «цифровой двойник – хирургический робот» открывает возможность полуавтономного выполнения стандартизированных хирургических элементов по оптимальному плану, разработанному двойником. Роль хирурга при этом смещается в сторону надзора и принятия нестандартных решений.

На основе проведённого анализа можно сделать вывод, что развитие цифровых двойников в медицине движется по четырём магистральным направлениям: интеграция геномных и протеомных данных в физиологические модели, расширение масштаба от органов к мультиорганному «цифровому человеку», демократизация доступа через платформы DTaaS и интеграция с роботизированной хирургией. Каждая из этих тенденций вносит вклад в формирование новой парадигмы медицины, где лечение становится предиктивным, персонализированным и высокоточным. Дальнейший прогресс

в этой области будет определяться синергией вычислительных мощностей, биомедицинских данных и клинической валидации, что позволит сделать цифровые двойники неотъемлемым инструментом повседневной врачебной практики.

Библиографический список:

1. Laubenbacher R., Sluka J., Glazier J. Using digital twins in viral infection // Science. – 2021. – Vol. 371, № 6534. – P. 1105-1106.
2. Voigt I. et al. Digital twins for multiple sclerosis // Frontiers in Immunology. – 2021. – Vol. 12. – Article 669811.
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.