

УДК 004.738;615.47

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ НА НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕРАПИИ ПАЦИЕНТОВ С НЕВРОЛОГИЧЕСКИМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ



В.А. Вишняков

*Доктор технических наук, профессор кафедры
инфокоммуникационных технологий БГУИР
vish@bsuir.by_*

В.А. Вишняков

Область профессиональных интересов и направление исследований: информационное управление и безопасность в инфокоммуникациях, Интернет вещей, блокчейн, электронный маркетинг, ИТ в образовании и медицине, интеллектуальные системы управления.

Аннотация. В докладе рассматривается технология цифровых двойников, основанных на искусственном интеллекте, для персонализированного ведения пациентов с нейродегенеративными заболеваниями (Альцгеймера и Паркинсона). Цифровой двойник представляет собой динамическую виртуальную модель индивидуальных когнитивных и физиологических систем пациента, создаваемую с использованием мультимодальных данных и нейросетевых алгоритмов. Анализируются архитектура таких систем, ключевые типы данных для их построения, принципы работы, лежащих в их основе нейронных сетей, а также перспективы их интеграции в клиническую практику для ранней диагностики, прогнозирования течения заболевания и подбора оптимальной терапии. Представлена структура и описание такого цифрового двойника.

Ключевые слова: цифровой двойник, болезни Альцгеймера, Паркинсона, нейронные сети, искусственный интеллект, персонализированная медицина, электронная терапия.

Введение. Глобальное бремя нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера и болезнь Паркинсона, продолжает расти, создавая значительное давление на системы здравоохранения по всему миру. Традиционные подходы к диагностике и лечению часто носят реактивный характер и основаны на популяционных усредненных данных, что не учитывает уникальные особенности каждого пациента. В этой связи возникает острая необходимость в переходе к предиктивной и персонализированной медицине.

Технология цифровых двойников (Digital Twins), пришедшая в здравоохранение из промышленности, открывает новые горизонты для управления здоровьем [1]. Цифровой двойник пациента – это не статичная модель, а динамическая, постоянно обновляемая виртуальная копия, отражающая текущее состояние его организма на основе потока данных из различных источников [2]. В контексте нейродегенеративных заболеваний эта технология, усиленная возможностями искусственного интеллекта и нейронных сетей, позволяет создавать комплексные модели, способные симулировать течение болезни и реакцию на терапию в виртуальной среде, до применения вмешательств к реальному пациенту [2, 3]. Цель доклада – проанализировать архитектуру, принципы функционирования и перспективы внедрения цифровых двойников на нейронных сетях для электронной терапии пациентов с болезнями Альцгеймера и Паркинсона.

Модель нейронных сетей в основе цифрового двойника. Нейронные сети являются вычислительным ядром, обеспечивающим способность цифрового двойника к

обучению, прогнозированию и адаптации. По своей сути, искусственная нейронная сеть – это модель, приближенная к сетям нейронов головного мозга, способная к обучению на данных [1]. В контексте диагностики и моделирования заболеваний используются следующие подходы. Обработка мультимодальных данных: ключевым преимуществом является интеграция разнородных данных [4]. Нейросети обучаются на совокупности нейровизуализации, генетической информации, цифровых биомаркеров (например, траектория движения глаз, голос, походка) и клинических шкал. Исследования показывают, что такие мультимодальные подходы существенно превосходят по точности оценку, основанную на одном типе данных [2].

Ученые Сеченовского университета разработали нейросеть, которая по данным электроэнцефалограммы (ЭЭГ) выявляет болезнь Паркинсона на ранней стадии с точностью до 97% [5]. Другие разработки, такие как израильский стартап Neuralight, используют ИИ для анализа около 100 параметров движения глаз, включая скорость расширения зрачка, что сильно коррелирует с болезнью Паркинсона и позволяет оценивать эффективность терапии [6].

Структура данных пациента. Построение точного цифрового двойника требует интеграции данных из множества источников. Эти данные можно структурировать по следующим модулям (таблица 1).

Таблица 1. Модули и типы данных для построения цифрового двойника

Модуль данных	Типы данных	Значение для модели
Нейровизуализация и физиология	МРТ, фМРТ, ЭЭГ, МЭГ, ПЭТ, диффузионная томография (для построения коннектома)	Оценка структурных и функциональных изменений мозга, выявление областей атрофии, нарушений нейронных связей [2, 3].
Генетика и биомаркеры	Геномные данные, биомаркеры крови (например, бета-амилоид, тау-белок), гистологические данные	Оценка генетической предрасположенности, подтверждение патологии на молекулярном уровне [2, 7]
Цифровые биомаркеры	Данные с носимых устройств (активность, сон), характеристики голоса, моторики (тремор), походки, когнитивные тесты в приложении, траектория движения глаз [2, 6].	Непрерывный мониторинг в реальных условиях, выявление subtle changes, объективная оценка эффективности лечения.
Клинические и анамнестические данные	История болезни, демография, назначенная лекарственная терапия, субъективные жалобы, психометрические шкалы (MMSE, UPDRS)	Контекстуализация объективных данных, учет клинического состояния и проводимого лечения [1].

Структура цифрового двойника. Архитектура цифрового двойника представляет собой многоуровневую систему, где данные пациента питают вычислительные модели, которые, генерируют виртуальные симуляции для поддержки клинических решений.

Виртуальный двойник мозга (Virtual Brain Twin): Как отмечается в проекте EBRAINS, такая модель создается путем комбинации структурных данных мозга (МРТ) с функциональными данными (ЭЭГ, фМРТ) для построения вычислительной модели нейронной сети пациента [3]. Эта модель симулирует, как различные регионы мозга соединены и взаимодействуют через нейронные пути (коннектом). Для эпилепсии и рассеянного склероза такие модели уже помогают планировать хирургические вмешательства и реабилитацию, и их применение для болезни Паркинсона и Альцгеймера является логическим продолжением [3].

Динамическая симуляция и сценарное моделирование: ядро двойника – это способность запускать симуляции «что-если». Врач может виртуально «назначить» определенный препарат или процедуру (нейростимуляцию) и наблюдать в модели предсказанный отклик систем организма – изменение паттернов ЭЭГ, динамику двигательных функций или когнитивных показателей [1, 3]. Это позволяет подобрать оптимальную терапию, минимизируя риски неэффективности или побочных эффектов у реального пациента.

Интерфейс взаимодействия: для практического использования цифровой двойник должен быть интегрирован в удобный для врача интерфейс, который предоставляет визуализацию симуляций, аналитические отчеты и рекомендации, сформированные ИИ [7].

Таблица 2. Уровни архитектуры цифрового двойника и их функции

Уровень архитектуры	Основные функции	Технологии
Уровень данных	Сбор, хранение, верификация и стандартизация мультимодальных данных пациента в режиме, близком к реальному времени.	Облачные хранилища, IoT-платформы, сенсоры.
Модельный уровень	Создание и обновление вычислительных моделей органов и систем (мозг, сердечно-сосудистая система). Нейросетевые алгоритмы прогнозируют динамику заболевания.	Глубокое обучение, байесовский вывод, механистическое моделирование [2, 3].
Сервисный уровень	Предоставление врачу инструментов для сценарного анализа, визуализации данных и результатов симуляций, формирования терапевтических рекомендаций.	Веб-интерфейсы, VR/AR для хирургического планирования [1, 7].

Программирование и техническая реализация. Разработка системы цифрового двойника – это междисциплинарная задача, требующая команду врачей, инженеров и программистов [1]. Первый этап – создание инфраструктуры для сбора и предобработки (очистка, аугментация, разметка) больших объемов данных. Для обучения медицинских нейросетей необходимы большие размеченные датасеты, сбор которых является нетривиальной задачей [8].

Обучение моделей: процесс обучения нейронной сети включает подачу на входной слой данных (например, голос, движение), их обработку через скрытые слои (где каждый нейрон имеет свои «веса» – коэффициенты значимости) и получение выходного результата (например, вероятности наличия заболевания) [9]. Модель последовательно проходит множество «эпох» обучения, постепенно минимизируя ошибку прогноза [8]. Для задач цифрового двойника часто используются гибридные подходы, сочетающие глубокое обучение для автоматического извлечения признаков и более интерпретируемые методы машинного обучения (например, случайные леса) там, где это необходимо клиницистам [2].

Валидация и интеграция: обученная модель должна пройти строгую валидацию на независимых наборах данных. Важно отметить, что заявления о высокой точности (85–95%), полученные на небольших однородных когортах, могут не воспроизводиться в реальных клинических условиях, где их точность, вероятно, окажется на 10–15% ниже [2]. После успешной валидации модель интегрируется в клинические рабочие процессы и системы (например, EHR – Electronic Health Records).

Блок электронной терапии (модули пациента и врача, принятие решений, цифровой двойник на HC), который дополняет диагностическую систему динамической поддержкой терапевтических решений. Блок реализован в виде гибридной системы, которая сочетает в себе: рекуррентную нейронную сеть на основе GRU (изучает временные и последовательные взаимосвязи при прогрессировании симптомов), компонент семантической памяти системы OSTIS, который хранит варианты решений, реакции на лечение и контекстно-зависимые правила. Эти два компонента

соединены через интерфейсный уровень, который позволяет нейронной модели считывать данные из семантического графа знаний и записывать их в него, тем самым постоянно обогащая цифрового двойника как обучением, основанным на данных, так и знаниями, полученными под руководством человека. Представленная структура описывает поток данных взаимодействия врача с пациентом. Поток записывается в цифровом двойнике в режиме реального времени, происходит поиск и обработка временных данных, моделирование прогнозов развития (БА, БП), формирование новых данных для лечения с поддержкой врача. Цифровой двойник работает в трех шаговом режиме, обеспечивая замкнутый цикл обратной связи для интеллектуальной терапевтической поддержки.

1. Поиск предыдущего состояния и синхронизация данных. При каждой регистрации в клинике или при получении данных цифровой двойник получает доступ к предыдущим записям пациента из Sc-памяти. Это включает в себя: оценку речи и двигательных функций с отметками времени; предыдущие процедуры (лекарства, дозировки, планы физиотерапевтических процедур); прошлые предсказания модели и одобренные врачом вмешательства.

2. Прогностическое моделирование. Используя последние наблюдения в качестве входных данных, модель, основанная на GRU, моделирует: ожидаемую динамику симптомов в течение следующих 1–4 недель; прогнозируемую реакцию пациента на различные сценарии лечения (коррекция медикаментозного лечения, введение логопеда); оценка вероятности двигательных или когнитивных нарушений.

3. Выходные данные и семантическое объяснение. Лучшие рекомендации по лечению представляются через семантический веб-интерфейс OSTIS с сопроводительными пояснениями: какие симптомы, что ожидается или улучшатся; какие предыдущие решения повлияли на рекомендации; как модель оценивала потенциальную пользу.

Заключение. В докладе рассмотрена технология цифровых двойников на нейронных сетях, которая представляет собой новый подход в поддержке терапии больных с болезнями Альцгеймера и Паркинсона. Технология осуществляет переход от реактивной, обобщенной медицины к проактивной и персонализированной. Представлен блок электронной терапии для неврологических заболеваний (модули пациента и врача, принятие решений, цифровой двойник на НС), который дополняет диагностическую систему динамической поддержкой терапевтических решений. Блок реализован в виде гибридной системы, которая включает: рекуррентную нейронную сеть на основе GRU (временные и последовательные взаимосвязи при прогрессировании симптомов), компонент семантической памяти системы OSTIS, который хранит варианты решений, реакции на лечение и контекстно-зависимые правила.

Список литературы

- [1] Виртуальные клоны: как цифровые двойники пациентов помогают врачам // Scientific Russia. 2023 [Электронный ресурс]. – Код доступа :<https://scientificrussia.ru/articles/virtualnye-klony-kak-cifrovye-dvojniki-pacientov-pomogaut-vracam>. – Дата доступа : 7.11.2025.
- [2] Gkintoni, E., Halkiopoulos C. Digital Twin Cognition: AI-Biomarker Integration in Biomimetic Neuropsychological Frameworks // Biomimetics. – 2025. 10 (10): 640.
- [3] Hashemi, M., Depannemaecker D., Saggio M., Triebkom P., Rabuffo G., Fousek J. Principles and Operation of Virtual Brain Twins. IEEE Reviews in Biomedical Engineering. 2025, № 4:1-29.
- [4] Вишняков В.А., Ся И. Распознавание признаков болезни Паркинсона на основе анализа голосовых маркеров и двигательной активности. Информатика. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 106–114.
- [5] В Сеченовском университете разработали нейросеть для выявления болезни Паркинсона по данным ЭЭГ-исследования. 2025 [Электронный ресурс]. – Код доступа : <https://www.sechenov.ru/pressroom/news/v-sechenovskom-universitete-razrabotali-neyroset-dlya-vyyavleniya-bolezni-parkinsona-po-dannym-eeg-i/>. – Дата доступа : 7.11.2025.
- [6] Болезнь Паркинсона: как нейросети помогают врачам поставить правильный диагноз, 2022 [Электронный ресурс]. – Код доступа : <https://sbermed.ai/neyroseti-pomogayut-vracham-postavit-pravilnyu-diagnoz>. – Дата доступа : 7.11.2025.

[7] Виртуальные органы и испытание лекарств: цифровые двойники в медицине // РБК Тренды. – 2021 [Электронный ресурс]. – Код доступа : <https://trends.rbc.ru/trends/industry/613b35369a7947506473665e>. – Дата доступа : 7.11.2025.

[8] Нейросети в медицине: что это и как работает // Celsus. – 2020. [Электронный ресурс]. – Код доступа : <https://celsus.ai/blog/kak-rabotaet-mediczinskaya-nejroset/>. – Дата доступа : 7.11.2025.

[9] Вишняков В. А. Модель и структура сети Интернета вещей для ИТ-диагностики пациентов / В. А. Вишняков, Юй Чуюэ // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 5. – С. 104–112.

DIGITAL TWINS ON NEURAL NETWORKS IN ELECTRONIC THERAPY OF PATIENTS WITH ALZHEIMER'S AND PARKINSON'S DISEASES

U.A. Vishniakou

*Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
of Infocommunication Technologies, BSUIR*

vish@bsuir.by

Abstract. The report examines the potential of artificial intelligence-based digital twin technology for the personalized management of patients with neurodegenerative diseases (Alzheimer and Parkinson). The digital twin is a dynamic virtual model of the patient's individual cognitive and physiological systems, created using multimodal data and neural network algorithms. The architecture of such systems, the key types of data for their construction, the principles of the underlying neural networks, as well as the prospects for their integration into clinical practice for early diagnosis, prediction of the course of the disease and the selection of optimal therapy are analyzed.

Keywords: digital twin, Alzheimer's disease, Parkinson's disease, neural networks, artificial intelligence, personalized medicine, electronic therapy.