

В. А. ВИШНЯКОВ

МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА С ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКОМ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ПОДДЕРЖКИ ТЕРАПИИ ПАЦИЕНТОВ С НЕВРОЛОГИЧЕСКИМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Нейронная сеть для диагностики обучена на международных данных больных с неврологическими заболеваниями (БН). Нейронная сеть (НС) для поддержки терапии динамически пополняется данными состояния конкретного пациента. Устройство IoT (смартфон) собирает данные пациентов (голос, движение), инициируя их предварительную обработку и извлечение признаков. Эти данные передаются через локальный фреймворк Flask на сервер, использующий Open Semantic Technology for Intelligent Systems (OSTIS) – платформу, которая обрабатывает и интерпретирует информацию о пациентах. Агент прогнозирования на базе НС на сервере, используя обученную нейронную сеть, ставит диагноз пациенту, который передается врачу. Лечение БН требует непрерывной, адаптивной и индивидуальной терапии. Блок электронной терапии на основе нейронной сети, включающий модули пациента и врача, принятия решений и цифрового двойника пациента, расширяет диагностическую систему до поддержки принятия терапевтических решений. Блок выполняет поиск предыдущего состояния пациента; прогностическое моделирование: курс лечения, лекарственную терапию; пояснение для врача. Структура блока включает: рекуррентную нейронную сеть на основе GRU, компонент семантической памяти системы OSTIS, контекстно-зависимые правила в виде SC-графических форм.

Ключевые слова: IoT, нейросетевые модели, граф знаний болезни, электронная диагностики и терапия, цифровой двойник

Введение

Болезнь Паркинсона (БП), прогрессирующее нейродегенеративное заболевание, представляет серьезную проблему для миллионов пациентов и их семей по всему миру. Едва заметные симптомы на ранних стадиях заболевания часто трудно распознать, что приводит к несвоевременной постановке диагноза и упущенным возможностям оптимального лечения [1]. Подтверждение БП преимущественно основывается на оценке истории болезни и клинических проявлений, при этом отсутствуют точные и объективные методы раннего выявления, что ограничивает эффективность лечения заболевания и терапевтических стратегий.

В работе [2] проанализированы четырнадцать признаков движения пациента, которые включают пять вариантов дрожания, шесть вариантов мерцания, два признака гармоничности и среднюю автокорреляцию основного частотного признака. В статье [3] предложен метод, основанный на распознавании и классификации с применением глубокой нейронной сети (DNN) в сочетании с мини-пакетным градиентным спуском (МПГС), для дифференциации пациентов с БП и здоровых людей по признакам изменения голоса.

Появление технологии Интернета вещей (IoT) открыло новые возможности для диагностики и лечения БП. Интеграция датчиков, носимых устройств и интеллектуальных систем анализа, платформы для сбора медицинских данных, разработанной Кимом и соавторами [4], использующий технологию Fast Healthcare Interoperability Resources (FHIR), хранит и передает данные о давлении на стопы пациентов с БП,

демонстрируя эффективность устройств Интернета вещей при непрерывном наблюдении за пациентами. Интеллектуальная система, основанная на голосовых записях и унифицированной шкале оценки болезни Паркинсона (UPDRS), предложенная в статье [5], отличается хранением данных о пациентах и проведением анализа и диагностики в режиме реального времени.

В данной статье рассматривается применение нейронных сетей и технологий IoT для электронной диагностики и поддержки терапии пациентов на базе цифрового двойника. Использование открытой семантической технологии интеллектуальных систем (OSTIS) [6] при разработке прототипа данной ИС ускорило создание сложных графов знания предметной области БП и интеллектуальных механизмов для диагностики и терапии.

Структура и функционирование подсистемы диагностики

Для реализации авторской модели распознавания БП [7] была разработана подсистема ИТ-диагностики с использованием технологии НС, представленная на рисунке 1.

На клиентском уровне мобильные платформы, работающие на базе Android, iOS, служат пользовательскими интерфейсами для пациентов и врачей, позволяя вводить исходные медицинские данные и получать результаты. Смартфоны, сконфигурированные для сбора голосовых данных пациентов, используют микрофон и приложения для записи и передачи этих данных на локальную серверную инфраструктуру. Данная ин-

фраструктура включает веб-сервер, действующий как шлюз для HTTP-запросов, и интерфейс WSGI, который

соединяет веб-сервер с приложением Flask, обеспечивая беспрепятственный обмен данными [8].

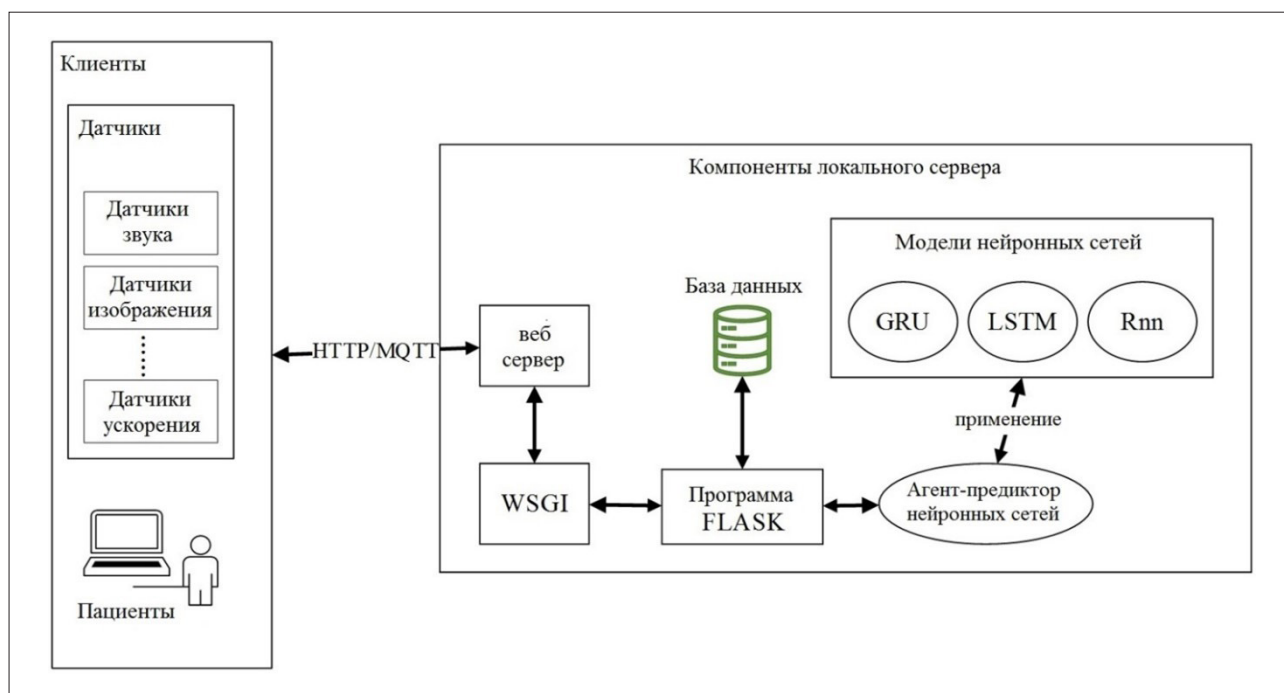


Рисунок 1. Структура подсистемы для диагностики БП

Приложение Flask, являющееся компонентом системного интерфейса OSTIS, предоставляет семантический веб-интерфейс, который переводит сложный семантический код (SC-код) в понятный человеку формат. Управление данными осуществляется в хранилище данных, которое включает базу данных SQL или NoSQL, в зависимости от требований приложения. Диагностирование в системе выполняется агентом прогнозирования, базирующего на нейронных сетях (GRU, LSTM, RNN). Веб-платформа OSTIS поддерживает систему с веб-браузером для доступа пользователей, сетевую инфраструктуру для управления семантической памятью (SC-memory), хранения базы знаний и визуализации SC-кода.

Предварительно через смартфон вводятся голосовые данные пациентов с установленной БП, и осуществляется обучение нейронной сети на их основе [7]. В процессе обучения НС извлекает специфические голосовые признаки, связанные с симптомами БП: дрожание, нестабильность интонации и изменение ритма речи [9]. Работа системы начинается со сбора данных, где смартфон выступает в качестве устройства для ввода голосовых данных диагностируемых на БП пациентов в режиме реального времени. Эти данные проходят предварительную обработку в смартфоне, включающую нормализацию, извлечение признаков, отбор для устранения помех и выделения закономерностей, что позволяет подготовить их к дальнейшему анализу. После предварительной обработки данные архивируются в базе данных. Затем выполняется нейросетевой ана-

лиз на базе обученной сети, являющийся частью модуля обработки знаний платформы OSTIS, при этом данные анализируются агентом прогнозирования. Данная подсистема защищена патентом на изобретение [10].

Результаты прогнозирования доводятся до сведения медицинских работников и пациентов через веб-интерфейс пользователя, разработанный с использованием Flask и позволяющий взаимодействовать через веб-браузеры на клиентских устройствах. Врач оценивает результаты работы системы в контексте общей истории болезни пациента, используя эту информацию для принятия обоснованных решений об уходе за пациентом, включая корректировку лечения и планирование дальнейших обследований.

Сбор и обработка данных с мобильных устройств. Для сбора и обработки голосовых данных пациентов с БП использовалась PyAudio (библиотека Python) для доступа к функциям микрофона смартфона. Были заданы звуковые параметры микрофона с частотой дискретизации 44100 Гц, одним каналом и разрядностью 16 бит для обеспечения высокого качества собираемых голосовых данных. Был создан аудиопоток для приема и записи голосовых данных. Перед началом записи участники проходили инструктаж.

Потом запускалась функция записи, в ходе которой были собраны образцы голоса каждого участника, с трехкратным повторением произношения гласного звука /a/ для согласованности. Собранные голосовые данные сначала проходили стадию предварительной обработки, включающей шумоподавление и норма-

лизацию аудиосигнала, чтобы устранить фоновый шум и другие помехи, обеспечивая точность анализа. Анализ во временной области был применен для извлечения основных характеристик речевого сигнала (форма сигнала, энергия и длительность), в то время как анализ в частотной области был сосредоточен на спектральном распределении, частотных компонентах и связанных с ними характеристиках. Внимание было уделено частотным кепстральным коэффициентам Mel (MFCC) и вейвлет-коэффициентам, которые отражают специфические свойства голосового сигнала и особенно эффективны при выявлении голосовых аномалий у пациентов с БП [7].

Выделенные признаки были нормализованы, чтобы обеспечить сопоставимость между ними и предотвратить непропорциональное влияние одной из них на последующее обучение модели. Предварительно обработанные данные о голосовых функциях были упакованы в формат JSON для безопасной передачи на центральный сервер Flask по протоколу HTTP для дальнейшего анализа [6]. Данные отправлены на сервер Flask с помощью POST-запроса. После приема сервер Flask, основываясь на типе данных и определенных процедурах обработки, выполнил соответствующие задачи анализа данных и обучения модели.

Нейросетевой анализ и интеграция знаний OSTIS. После сохранения результатов прогнозирования в базе данных OSTIS framework они становятся доступными в хранилище знаний системы. Сервер

OSTIS оснащен семантическим веб-интерфейсом, обеспечивающим прямое взаимодействие пользователя с интеллектуальной системой. На рисунке 2 показаны SCn-узлы в базе знаний веб-интерфейса OSTIS.



Рисунок 2. Узлы, представленные в базе знаний веб-интерфейса OSTIS

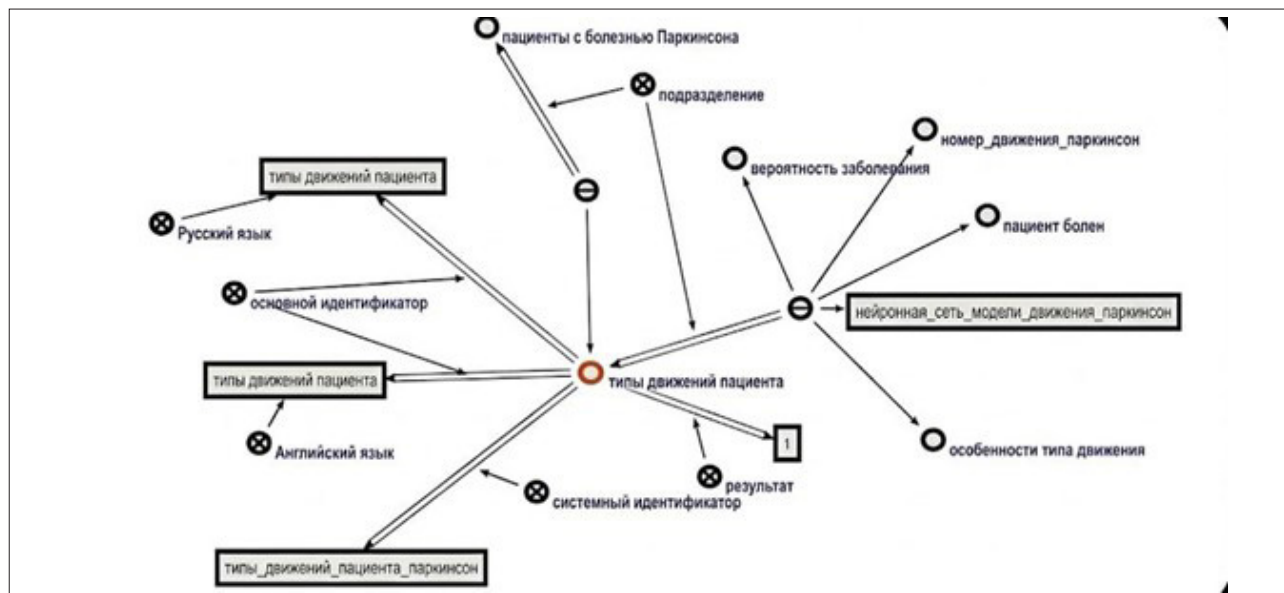


Рисунок 3. SCg-узлы, представленные в базе знаний веб-интерфейса OSTIS

Основываясь на характеристиках результатов прогнозирования, платформа OSTIS предлагает множество инструментов для визуализации и анализа данных [4]. Это позволяет пользователям вникать в данные, создавать аналитические отчеты или проводить дополнительные исследования. На рисунке 3 показаны

SCg-узлы в хранилище знаний OSTIS.

Модуль терапии БП с цифровым двойником

Долгосрочное лечение болезни Паркинсона требует непрерывной, адаптивной и индивидуальной те-

рации. Для решения этой проблемы разработан блок электронной терапии (модули пациента и врача, принятие решений, цифровой двойник на НС), который дополняет диагностическую систему динамической поддержкой терапевтических решений (рисунок 4). Это дополнение использует временные данные о ходе болезни пациента, прогностическое моделирование результатов лечения и предложения индивидуальных вмешательств для клинической поддержки. Цифровой двойник (Twin) – это динамическое цифровое представление пациента с диагностированной БП и риском ее развития. В отличие от статичных моделей, цифровой двойник сохраняет в памяти информацию о состоянии пациента с течением времени, которая постоянно обновляется благодаря взаимодействию с носимыми устройствами, вводу данных пользователем и системным прогнозам. Twin объединяет сенсорные данные (речевые паттерны, информацию о походке), клинические данные, историю лечения и результаты нейронного анализа в единый временной профиль. Блок реализован в виде гибридной системы, которая сочетает в себе рекуррентную нейронную сеть на основе GRU

(анализирует временные и последовательные взаимосвязи при прогрессировании симптомов) и компонент семантической памяти системы OSTIS (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 цифровой двойник как обучением, основанным на данных, так и знаниями, полученными под руководством человека.

На рисунке 4 представлена структура, описывающая поток данных взаимодействия врача с пациентом. Поток записывается в цифровой двойник в режиме реального времени, происходит поиск и обработка временных данных, моделирование прогнозов развития БП, формирование новых данных для лечения с поддержкой врача. Данный модуль (цифровой двойник) работает в трехшаговом режиме, обеспечивая замкнутый цикл обратной связи для интеллектуальной терапевтической поддержки.

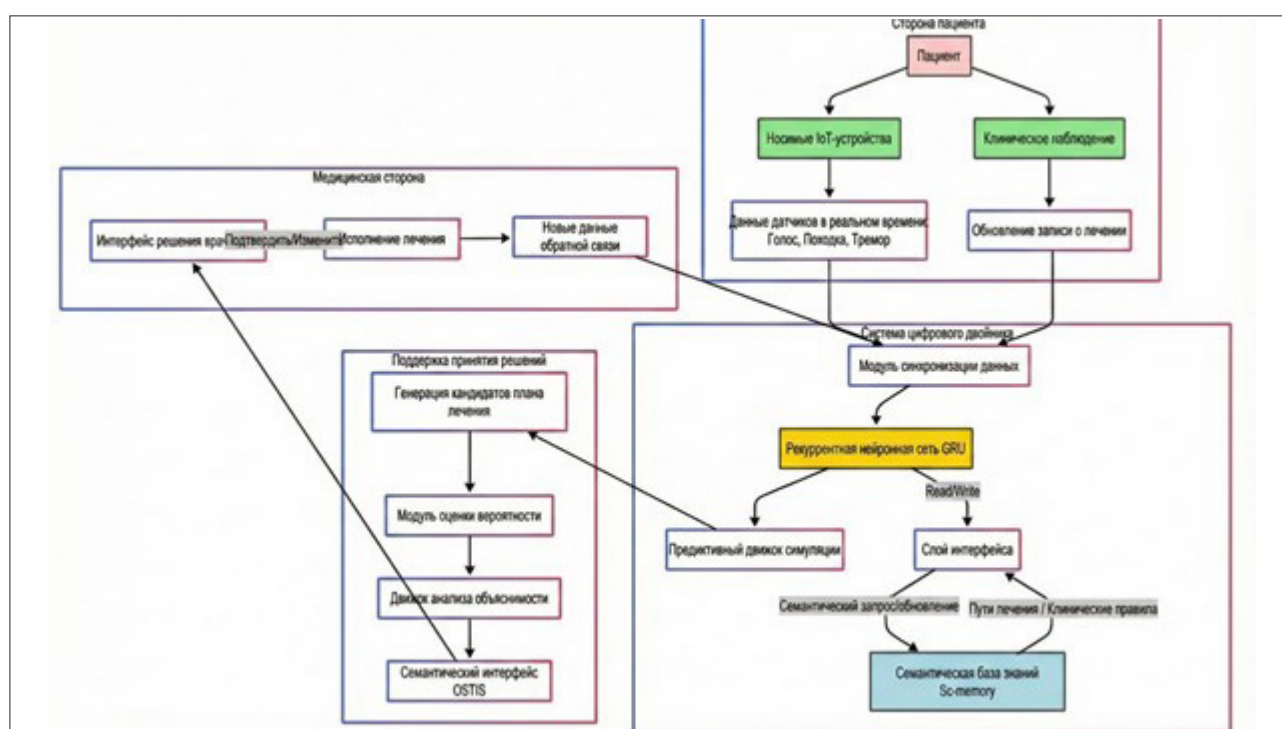


Рисунок 4. Блок электронной терапии БП на нейронной сети

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, что включает в себя оценку речи и двигательных функций с отметками времени; предыдущие назначения (лекарства, дозировки, планы физиотерапевтических процедур); прошлые прогнозы модели и одобренные врачом вмешательства. Это представлено в виде

семантического подграфа, позволяющего параллельно выполнять как логические рассуждения, так и нейронный вывод.

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 (например, коррекцию медикаментоз-

ного лечения, логопедические занятия); оценку вероятности двигательных или когнитивных нарушений. Структура модели включает механизмы привлечения внимания, позволяющие выделить важные временные эпизоды (резкие изменения симптомов после предшествующей терапии), тем самым улучшая ее прогностические возможности. При каждом запуске моделирования генерируется набор возможных терапевтических стратегий, каждая из которых сопоставляется с вероятностной оценкой (вероятность улучшения симптомов, риск побочных эффектов и т.д.).

3. *Выходные данные и семантическое объяснение.* Лучшие рекомендации по лечению представляются через семантический веб-интерфейс OSTIS с сопроводительными пояснениями: ожидаемая динамика и вероятность улучшения симптомов; какие предыдущие решения повлияли на рекомендации; как модель оценивала потенциальную пользу (например, система может предложить уменьшить дозу агониста дофамина из-за прогнозируемого риска ухудшения речи, ссылаясь как на анализ временных паттернов нейронной модели, так и на семантические данные, указывающие на предшествующие побочные эффекты).

Эти рекомендации не являются самостоятельными предписаниями, а предназначены для оказания помощи врачам в принятии решений. Каждый предлагаемый план можно редактировать, отклонять или подтверждать через веб-интерфейс.

Разработанная система электронной диагностики

и терапии пациентов с БП передана в РНПЦ психического здоровья для адаптации и практического применения.

Заключение

1. В проведенном исследовании на основе разработанной модели распознавания болезни Паркинсона и обученной нейронной сети представлена подсистема электронной диагностики с использованием технологий Интернета вещей, подтвержденная патентом на изобретение. Для представления знаний о БП разработана онтология, использующая возможности системы OSTIS. Интеграция результатов распознавания БП с базой знаний OSTIS не только способствует мобильной диагностике пациентов, но и улучшает процесс принятия решений по индивидуальному уходу за пациентами.

2. Разработан модуль электронной терапии пациентов с БП, основанный на цифровом двойнике, реализованном на нейронной сети, который дополняет диагностическую подсистему подсистемой поддержки терапевтических решений. Этот модуль реализован в виде гибридной структуры, которая включает рекуррентную нейронную сеть на основе GRU (изучает временные и последовательные взаимосвязи при прогрессировании симптомов) и компонент семантической памяти системы OSTIS (хранит пути принятия решений, реакции на лечение и контекстно-зависимые правила в виде SC-графических форм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sveinbjornsdottir, S. The clinical symptoms of Parkinson's disease / Sigurlaug Sveinbjornsdottir // Journal of Neurochemistry. 2016. Vol. 139, № S1. P. 318–324. DOI: 10.1111/jnc.13691.
2. Upadhyay, S. S. Discriminating Parkinson and healthy people using phonation and cepstral features of speech / Savitha S. Upadhyay, A. N. Cheeran // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 143. P. 197–202. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.376.
3. Voiceprint recognition of Parkinson patients based on deep learning / Z. Xu, J. Wang, Y. Zhang, X. He // arXiv. 2018. Dec. P. 1–10. DOI: 10.48550/arXiv.1812.06613.
4. Development of Parkinson patient generated data collection platform using FHIR and IoT devices / D. Y. Kim, S. H. Hwang, M. G. Kim [et al.] // Studies in Health Technology and Informatics. 2017. Vol. 245. 141–145.
5. Anter, A. M. E-health Parkinson disease diagnosis in smart home based on hybrid intelligence optimization model / A. M. Anter, Z. Zhang // Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics 2019 / ed.: A. Hassanien, K. Shaalan, M. Tolba. Springer, 2020. Vol. 1058 : Advances in Intelligent Systems and Computing. P. 153–162. DOI: 10.1007/978-3-030-31129-2_15.
6. Organization of online learning using the intelligent metasystem of open semantic technology for intelligent systems / A. Kintonova, A. Sabitov, I. Povkhan [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 1, № 2 (121). P. 29–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.272952.
7. Vishniakou, U. A. IT Diagnostics of Parkinson's disease based on the analysis of voice markers and machine learning / U. A. Vishniakou, Y. Xia // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 3. С. 102–110. DOI: 10.35596/1729-7648-2023-21-3-102-110.
8. Vishniakou, U. Models and algorithms for the diagnosis of Parkinsons disease and their realization on the Internet of Things network / U. Vishniakou, Y. Xia // Global Journals of Research in Engineering. 2024. Vol. 24 (J1). P. 43–49. DOI: 10.34257/GJREJVOL24IS1PG43.
9. A Comparative analysis of speech signal processing algorithms for Parkinson's disease classification and the use of the tunable Q-factor wavelet transform / C.O. Sakar, G. Serbes, A. Gunduz [et al.] // Applied Soft Computing. 2019. Vol. 74. P. 255–263. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.10.022.
10. Патент 048311, G10L 15/01 (2013.01) G10L 25/00 (2006.01) G16Y 40/20 (2020.01). Способ диагностики болезни Паркинсона в сети Интернет вещей, основанный на анализе голосовых маркеров : № а 202392267 : заяв-

лено 21.07.2023 : опубликовано 13.11.2024 / Вишняков В. А., Ся Ивей ; заявитель Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. 12 с. URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/59103/1/Pat_048311.pdf (дата обращения: 17.06.2026).

REFERENCES

1. Sveinbjornsdottir S. The clinical symptoms of Parkinson's disease. *Journal of Neurochemistry*. 2016;139Suppl1:318–324. <https://doi.org/10.1111/jnc.13691>.
2. Upadhy S.S., Cheeran A.N. Discriminating Parkinson and healthy people using phonation and cepstral features of speech. *Procedia Computer Science*. 2018;143:197–202. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.376>.
3. Xu Z., Wang J., Zhang Y., He X. Voiceprint recognition of Parkinson patients based on deep learning. *arXiv*. 2018;Dec:1–10. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.06613>.
4. Kim D.Y., Hwang S.H., Kim M.G., Song J.H., Lee S.W., and Kim I.K. Development of Parkinson patient generated data collection platform using FHIR and IoT devices. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2017;245:141–145.
5. Anter A.M., Zhang Z. E-health Parkinson disease diagnosis in smart home based on hybrid intelligence optimization model. In: Hassanien A, Shaalan K, Tolba M, eds. *Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics 2019*. Vol 1058. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer; 2020:153–162. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31129-2_15.
6. Kintonova A., Sabitov A., Povkhan I., Khaimulina D., and Gabdreshov G. Organization of online learning using the intelligent metasystem of open semantic technology for intelligent systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023;1(2(121)):29–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272952>.
7. Vishniakou U.A., Xia Y. IT diagnostics of Parkinson's disease based on the analysis of voice markers and machine learning. *Doklady BGUIR [BSUIR Reports]*. 2023;21(3):102–110. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-3-102-110>.
8. Vishniakou U., Xia Y. Models and algorithms for the diagnosis of Parkinson's disease and their realization on the Internet of Things network. *Global Journals of Research in Engineering*. 2024;24(J1):43–49. <https://doi.org/10.34257/GJREJVOL24IS1PG43>.
9. Sakar C.O., Serbes G., Gunduz A., Tunc H.C., Nizam H., Sakar B.E., and et al. A comparative analysis of speech signal processing algorithms for Parkinson's disease classification and the use of the tunable Q-factor wavelet transform. *Applied Soft Computing*. 2019;74:255–263. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.10.022>.
10. Vishniakou U.A., Xia Y. inventors; Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, assignee. Patent 048311, G10L 15/01 (2013.01) G10L 25/00 (2006.01) G16Y 40/20 (2020.01). Sposob diagnostiki bolezni Parkinsona v seti internet veshchei, osnovannyi na analize golosovykh markerov [Method for diagnosing Parkinson's disease in the Internet of Things network based on the analysis of voice markers] : Eurasian patent application EA 202392267 A1. November 13, 2024. Available at: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/59103/1/Pat_048311.pdf (accessed 17th June 2026) (in Russian).

U. A. VISHNIAKOU

MOBILE SYSTEM WITH A DIGITAL TWIN FOR THE DIAGNOSIS AND SUPPORT OF THERAPY OF PATIENTS WITH NEUROLOGICAL DISEASES

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The neural network for diagnosis is trained on international data from patients with neurological diseases (ND). The neural network (NN) is dynamically updated with data on the condition of a particular patient to support therapy. An IoT device (smartphone) collects patient data (voice, movement), initiating their preprocessing and feature extraction. This data is transmitted via the local Flask framework to a server using Open Semantic Technology for Intelligent Systems (OSTIS), a platform that processes and interprets patient information. An NN-based forecasting agent on the server, using a trained neural network, performs the patient's diagnosis, which is transmitted to the doctor. Treatment of ND requires continuous, adaptive and individual therapy. The NN-based electronic therapy unit, which includes modules for patient and doctor, decision-making and the patient's digital twin, expands the diagnostic system to support therapeutic decision-making. The block searches for the patient's previous condition; predictive modeling: course of treatment, drug therapy; explanation for the doctor. The block structure includes: a recurrent neural network based on GRU, a component of the semantic memory of the OSTIS system, context-sensitive rules in the form of SC-graphical forms.

Keywords: IoT, neural network models, graph of disease knowledge, electronic diagnostics and therapy, digital twin

**Вишняков Владимир Анатольевич**

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь.

Доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры инфокоммуникационных технологий БГУИР. Область научных интересов: информационное управление и безопасность, электронный бизнес, интеллектуальные системы управления, сети IoT, нейронные сети, блокчейн. Член двух докторских Советов по защите диссертаций. Автор более 560 научных работ, в том числе 9 монографий (2 на английском языке), 4 учебных пособий с грифом Министерства образования Республики Беларусь, 1 учебного пособия с грифом УМО, 8-томного учебного комплекса «Информационный менеджмент», 215 научных статей, 21 авторского свидетельства и 3 патентов.

Uladzimir Anatolyevich Vishnyakou

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk, Republic of Belarus.

Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor at the Department of Infocommunication Technologies, BSUIR. Research interests: information management and security, e-business, intelligent control systems, IoT networks, neural networks, and blockchain. Member of two doctoral Dissertation Defense Councils. Author of over 560 scientific papers, including 9 monographs (2 in English), 5 textbooks, 8-volume educational complex "Information Management", 215 scientific articles, 21 author's certificates, and 3 patents.

E-mail: vish@bsuir.by

E-mail: vish2002@list.ru