

## **АННОТАЦИЯ**

**диссертационной работы Базарбекова Икрама Медеуұлы «Исследование моделей и методов искусственного интеллекта для диагностики заболеваний с нарушением когнитивных функций», представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе: 8D06102 - «Компьютерная и программная инженерия»**

### **Актуальность**

Заболевания, сопровождающиеся нарушением когнитивных процессов, представляют собой обширный класс нейродегенеративных расстройств, являющихся одной из главных медико-социальных проблем современности. В рамках данного класса патологий доминирующее положение занимает болезнь Альцгеймера (БА), на долю которой приходится до 70% всех клинических случаев деменции. В связи с этим в настоящей диссертационной работе болезнь Альцгеймера выбрана в качестве базовой модели для исследования и разработки методов диагностики, результаты которого могут быть в дальнейшем экстраполированы на другие виды когнитивных расстройств.

БА является наиболее распространенной причиной деменции, затрагивающей миллионы людей во всем мире. По прогнозам ВОЗ (Всемирной организации здравоохранения), число заболевших утроится к 2050 году. Существующие методы диагностики, такие как МРТ (магнитно-резонансная томография), ПЭТ (позитронно-эмиссионная томография), КТ (компьютерная томография), ЭЭГ (электроэнцефалография), МЭГ (магнитоэнцефалография) и анализ спинномозговой жидкости обеспечивают высокую точность, но являются дорогостоящими, инвазивными или малодоступными для массового скрининга. Стандартные когнитивные тесты, такие как MMSE (Mini-mental state examination), MoCA (Montreal cognitive assessment) часто недостаточно чувствительны на ранних стадиях. В связи с этим, возрастает потребность в поиске новых цифровых биомаркеров.

Известно, что моторный контроль, а именно мелкая моторика письма, начинает ухудшаться задолго до проявления явных когнитивных симптомов. Применение методов искусственного интеллекта к анализу кинематики почерка открывает новые возможности для создания объективных и масштабируемых диагностических инструментов. Однако внедрение глубокого обучения в клиническую практику часто ограничивается нехваткой размеченных наборов данных. Таким образом, разработка методов, позволяющих эффективно обучать модели искусственного интеллекта (ИИ) на ограниченных выборках, в том числе с использованием синтетических данных, является крайне актуальной задачей.

Так, актуальность данного исследования обусловлена ростом числа пациентов с БА и ограничениями существующих инструментов скрининга. Стандартные методы визуализаций, такие как ПЭТ, требуют использования радиоактивных индикаторов и имеют ограниченную доступность, в то время как МРТ может быть противопоказана пациентам с металлическими

имплантатами или клаустрофобией. Кроме того, отсутствуют стандартизированные механизмы для непрерывного динамического наблюдения за прогрессированием заболевания. Таким образом, существует острая необходимость в экономически эффективных, неинвазивных и объективных цифровых биомаркерах, которые могут быть внедрены в первичном звене здравоохранения для выявления лиц из группы риска до наступления значительных неврологических повреждений.

Основной **целью** данной работы является исследование и оценка методов ранней диагностики БА на основе искусственного интеллекта. Она предполагает интеграцию новых источников сенсорных данных, в частности кинематики почерка, со сложными архитектурами глубокого обучения и методами аугментации данных для повышения точности, чувствительности и клинической доступности диагностики данного заболевания.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1) Провести критический обзор и обобщение современных методов ИИ и машинного обучения (МО), используемых в различных инструментальных методах исследования, включая МРТ, ПЭТ, ЭЭГ, МЭГ и данные сенсоров;

2) Разработать архитектуру и прототип сенсорного устройства для фиксации кинематических характеристик графомоторной активности, отражающих нарушения моторного контроля;

3) Сформировать экспериментальную выборку, проведя сбор кинематических параметров почерка в клинических условиях у репрезентативных групп испытуемых, включающих пациентов с диагностированной болезнью Альцгеймера и здоровых добровольцев;

4) Исследовать и количественно оценить специфические кинематические различия в почерке (например, скорость, ускорение и тремор) между пациентами с БА и когнитивно здоровыми людьми из контрольной группы;

5) Реализовать и оценить метод генерации синтетических данных на основе математического моделирования патологических паттернов для решения проблемы ограниченных клинических наборов данных путем генерации синтетических данных, основанных на физических моделях и имитирующих симптомы БА;

6) Провести сравнительное исследование нейросетевых архитектур на основе рекуррентных и трансформерных моделей (LSTM, LSTM с механизмом внимания, Transformer Encoder), а также спроектировать гибридную архитектуру глубокого обучения CNN-BiLSTM и определить наилучшее качество классификации среди всех исследованных подходов в задаче выявления когнитивного снижения на ранней стадии.

**Объектом исследования** является процесс диагностики и мониторинга нейродегенеративных заболеваний, связанных с нарушением когнитивных функций.

**Предметом исследования** являются модели искусственного интеллекта, методы генерации синтетических данных для аугментации обучающих

выборки, а также кинематические цифровые биомаркеры, полученные с помощью сенсорных инструментов для письма, используемых для когнитивной оценки.

**Методологическую основу работы** составляет сбор и анализ кинематических данных, полученных с инерциальных датчиков (IMU) в процессе выполнения письменных заданий. Для предварительной обработки сигналов и расчета биомеханических параметров использованы методы цифровой фильтрации и математического моделирования. Проблема ограниченности выборки решена методом стохастической генерации синтетических данных. Основным инструментом классификации является разработанная гибридная нейросетевая архитектура CNN-BiLSTM, позволяющая выявлять пространственно-временные паттерны патологии. Верификация моделей проведена методом кросс-валидации с оценкой метрик точности, чувствительности и площади под ROC-кривой.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1) Архитектура и техническое исполнение сенсорного инструмента (Smart Pen) на базе инерциального модуля, обеспечивающего высокочастотную регистрацию (100 Гц) кинематики движения руки в 6 степенях свободы, что позволяет объективизировать скрытые нарушения мелкой моторики, недоступные для стандартных методов оценки.

2) Метод формирования 18-канального признакового пространства на основе биомеханических временных рядов ИМУ-сигналов, включающего производные и интегральные кинематические характеристики (рывок, скорость, угловые ускорения, ориентация), статистический анализ которого подтверждает диагностическую значимость выявленных межгрупповых различий между пациентами с болезнью Альцгеймера и здоровыми испытуемыми ( $p < 0,05$ ).

3) Метод генерации синтетических данных на основе математического моделирования патологических паттернов, включающий алгоритмы стохастической инъекции шума (для имитации тремора) и нелинейной временной деформации (для имитации брадикинезии), применение которого позволяет компенсировать дефицит клинической выборки и предотвратить переобучение модели.

4) Гибридная архитектура глубокой нейронной сети (CNN-BiLSTM), реализующая синергию сверточных слоев для детекции локальных аномалий (микротремора) и двунаправленных рекуррентных слоев для анализа темпоральной динамики (когнитивных пауз), что обеспечивает прогностическую точность AUC 0.96, значимо превосходя классические алгоритмы машинного обучения.

#### **Основные результаты исследования:**

1) Выполнен сравнительный анализ современных методов диагностики нейродегенеративных заболеваний, выявивший существенные ограничения текущих подходов (высокая стоимость нейровизуализации, субъективность клинических шкал) и обосновавший необходимость разработки доступных

инструментальных средств скрининга, основанных на объективном анализе тонкой моторики.

2) Разработано сенсорное устройство для регистрации кинематических параметров почерка, включающее комбинированный инерциальный датчик (акселерометр, гироскоп) и специализированное программное обеспечение, что позволяет проводить неинвазивный сбор данных в естественных условиях письма, исключая стрессовое воздействие на пациента, характерное для лабораторных тестов.

3) Собрана экспериментальная база данных 3D-кинематики почерка, отличающаяся высокой разрешающей способностью и включением динамических параметров (рывок, микро-тремор), что обеспечивает необходимую репрезентативность выборки для выявления скрытых паттернов нейродегенерации и верификации моделей глубокого обучения.

4) Применен метод аугментации данных для обучения нейронных сетей в условиях малых выборок, основанный на математическом моделировании патологических моторных паттернов (тремора и брадикинезии) с использованием стохастических алгоритмов и нелинейной деформации временной шкалы, что позволяет компенсировать дефицит клинических примеров и повысить обобщающую способность моделей.

5) Проведено сравнительное исследование нейросетевых архитектур на основе рекуррентных и трансформерных моделей: базовая LSTM достигла AUC 0,7779, модель LSTM+Attention – AUC 0,9597, Transformer Encoder – AUC 0,9268; спроектирована и валидирована гибридная архитектура CNN-BiLSTM, продемонстрировавшая наилучшие результаты среди всех исследованных подходов (AUC 0,963, Recall 0,930), что подтверждает превосходство гибридных архитектур над как классическими алгоритмами машинного обучения, так и рекуррентными нейросетями.

6) Выявлен комплекс кинематических показателей, состоящий из параметров рывка, тремора и ускорения, который позволяет диагностировать ранние стадии когнитивных нарушений с чувствительностью 93.4 процента, опережая по эффективности стандартные клинические тесты.

**Научная новизна исследования** заключается в разработке гибридной архитектуры нейронной сети (CNN-BiLSTM) для анализа динамических временных рядов кинематики почерка, а также метода генерации синтетических выборок на основе математического моделирования патологических симптомов (тремора и брадикинезии), которые дополнили впервые сформированную уникальную экспериментальную базу данных размеченных сигналов мелкой моторики при обучении сети. Данный подход позволяет компенсировать дефицит клинических данных и достичь высокой прогностической точности (AUC 0.96) по сравнению с классическими методами машинного обучения.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в научном обосновании эффективности применения методов глубокого обучения для диагностики нейродегенеративных заболеваний в условиях ограниченных выборок данных. В работе доказано, что метод

комбинированного обучения, основанный на совместном использовании реальных клинических записей и синтетических данных, позволяет компенсировать дефицит медицинской статистики. Установлено, что математическое моделирование физической природы симптомов, а именно тремора и брадикинезии, обеспечивает необходимую репрезентативность обучающей выборки, что гарантирует высокую точность и устойчивость прогностических моделей. Существенным вкладом в теорию является обоснование целесообразности использования гибридной архитектуры нейронных сетей для анализа кинематики почерка. Установлено, что объединение сверточных слоев для поиска локальных признаков и рекуррентных слоев для анализа временной динамики позволяет выявлять скрытые нарушения моторики, которые невозможно обнаружить однокомпонентными методами. Ряд исследований в области нейропсихологии и анализа цифровых биомаркеров показал, что временные параметры моторного выполнения письма такие как скорость, латентность, вариабельность ускорения являются более чувствительными индикаторами ранних когнитивных нарушений по сравнению со статическими графическими характеристиками.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке и реализации прикладного инструментария для автоматизированной диагностики когнитивных нарушений.

Во-первых, разработано сенсорное устройство, функционирующее на базе инерциальных измерительных модулей. Данное устройство представляет собой экономически эффективное и мобильное решение, позволяющее проводить неинвазивный массовый скрининг населения в условиях первичного звена здравоохранения, не требуя от медицинского персонала специальной технической подготовки.

Во-вторых, разработаны и экспериментально валидированы модели глубокого обучения, реализующие предложенные алгоритмы обработки и классификации биомеханических временных рядов ИМУ-сигналов. Эффективность подтверждена экспериментально: достигнута точность распознавания патологии 93,4%, что превышает показатели традиционных методов машинного обучения.

В-третьих, практическую ценность представляет сформированная аннотированная база данных трехмерных кинематических параметров почерка. Созданный набор данных является уникальным ресурсом для верификации диагностических моделей и может быть использован исследовательскими группами для разработки новых методов анализа нейродегенеративных заболеваний.

**Достоверность полученных результатов** и обоснованность научных положений диссертации подтверждаются корректным применением фундаментального математического аппарата, включающего методы математической статистики, цифровой обработки сигналов и глубокого обучения. Особую значимость имеет использование физически обоснованных моделей кинематики движений, таких как стохастическое моделирование

тремора и нелинейная деформация временной шкалы, что обеспечивает адекватность алгоритмов генерации синтетических данных реальным биомеханическим процессам.

Эмпирической основой исследования послужил верифицированный набор данных, полученный в ходе клинических экспериментов с участием репрезентативной выборки из 215 испытуемых, в том числе 106 пациентов с подтвержденным диагнозом болезни Альцгеймера и 109 здоровых добровольцев. Объем сформированной выборки является достаточным для получения статистически значимых оценок с необходимой доверительной вероятностью. Высокая точность регистрации первичных физических параметров гарантируется аппаратной верификацией разработанного устройства Smart Pen на базе калиброванного инерциального модуля MPU-9250, что обеспечивает воспроизводимость экспериментов.

Оценка эффективности разработанных моделей нейронных сетей проводилась с использованием общепринятых в международной практике стандартизированных метрик, включая чувствительность, специфичность и площадь под ROC-кривой. Для исключения эффекта переобучения и подтверждения устойчивости результатов применялась процедура перекрестной проверки по  $k$ -блокам. Доказательством достоверности также служит проведенный сравнительный анализ, экспериментально подтвердивший преимущество предложенного гибридного подхода над классическими алгоритмами машинного обучения и однокомпонентными нейросетями на идентичных тестовых выборках.

#### **Апробация диссертационной работы**

Основные положения и практические результаты диссертационной работы были представлены, обсуждены и получили положительную оценку на международных научно-технических конференциях.

Результаты данного исследования также были представлены в следующих публикациях:

1) Bazarbekov, I., Almisreb, A., Ipalakova, M., Bazarbekova, M., Daineko, Y. (2026). Sim-to-Real Domain Adaptation for Early Alzheimer's Detection from Handwriting Kinematics Using Hybrid Deep Learning. *Sensors*, 26(1), 298. <https://doi.org/10.3390/s26010298>;

2) Bazarbekov, I., Razaque, A., Ipalakova, M., Yoo, J., Assipova, Z., & Almisreb, A. (2024). A review of artificial intelligence methods for Alzheimer's disease diagnosis: Insights from neuroimaging to sensor data analysis. *Biomedical Signal Processing and Control*, 92, 106023. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106023>;

3) Базарбеков И.М., Ипалакова М.Т., Дайнеко Е.А., Муханов С.Б. Альцгеймер ауруын диагностикалауға арналған robo-pen-нің деректерін өңдеу және талдау: алдын ала нәтижелер. Қазақ-Британ Техникалық Университетінің хабаршысы. 2024; 21(3):78-89. <https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-3-78-89>;

4) Bazarbekov, I.; Ipalakova, M.; Daineko, Y.; Mukhanov, S.; Bazarbekova, M.; Zholdassova, Z.; Turgunova, A.; Kapyshev, G. Design of a smart handwriting

tool for early detection of Alzheimer's disease. In Proceedings of the 2025 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA), Antalya, Turkiye, 7-9 August 2025; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2025; pp. 1-6.

5) Yegemberdiyev, T., Daineko, Y., & Bazarbekov, I. (2025). Efficiency of artificial intelligence in the diagnosis of cognitive disorders. *Procedia Computer Science*, 265, 620–624. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.07.229>;

б) Базарбеков И.М., Ипалакова М.Т., Дайнеко Е.А., Жолдасова Ж.А., Базарбекова М.М., Асипова Ж.М. Свидетельство на право охраны произведения науки №56208 от 31.03.2025 Республики Казахстан. Методология сбора и описания данных моторики письма для анализа когнитивных нарушений.

Во всех перечисленных публикациях соискателю принадлежит ведущая роль в постановке задач, проведении исследований и подготовке основного текста статей.

### **Связь с государственными программами**

Диссертационная работа выполнена в рамках грантового финансирования молодых ученых по проекту «Жас ғалым» (ИРН AP25796437) на тему «Разработка интеллектуальной системы диагностики когнитивных нарушений на основе методов машинного обучения и анализа моторики письма».

Исследования соответствуют стратегическим приоритетам развития Республики Казахстан и вносит вклад в реализацию Концепции развития искусственного интеллекта в Республике Казахстан на 2024-2029 годы в части разработки и внедрения отечественных интеллектуальных систем поддержки принятия врачебных решений и использования технологий машинного обучения для анализа биомедицинских данных. Разработанная гибридная модель нейронной сети и метод аугментации данных способствуют развитию национального потенциала в сфере ИИ.

### **Основное содержание диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Логика построения исследования отражает последовательный переход от анализа существующих научных подходов к разработке собственной инженерно-алгоритмической системы и экспериментальной верификации предложенных решений.

В первом разделе представлен теоретический анализ клинических аспектов нейродегенеративных заболеваний на примере болезни Альцгеймера. Рассмотрены современные инструментальные методы диагностики, включая нейровизуализацию и нейрофизиологические технологии, а также проведён обзор методов машинного обучения, применяемых в медицинской диагностике. Особое внимание уделено анализу кинематических параметров почерка как перспективного цифрового биомаркера раннего когнитивного снижения. Раздел завершается формулировкой научной проблемы и обоснованием необходимости разработки нового подхода.

Во втором разделе описана инженерная реализация сенсорной системы регистрации кинематических параметров почерка. Представлено обоснование выбора аппаратной платформы, архитектуры устройства и принципов интеграции инерциальных модулей. Детализированы этапы проектирования, прототипирования и программной реализации модуля сбора и передачи данных. Также приведена методика проведения эксперимента и характеристика сформированной клинической выборки.

Третий раздел посвящен разработке алгоритмов цифровой обработки сигналов, извлечения диагностически значимых признаков и формированию обучающих наборов данных. Представлены результаты сравнительного анализа кинематических характеристик почерка в группах пациентов и контрольной выборке. Разработан метод генерации синтетических данных на основе математического моделирования патологических моторных паттернов, направленный на компенсацию ограниченности клинической выборки и повышение обобщающей способности моделей.

В четвёртом разделе реализованы и экспериментально исследованы классические и глубокие методы машинного обучения. Выполнена настройка и сравнительный анализ алгоритмов SVM, Random Forest, k-NN и логистической регрессии. Проведено сравнительное исследование нейросетевых архитектур на основе рекуррентных и трансформерных моделей: базовой LSTM, LSTM с механизмом мягкого внимания и Transformer Encoder. Обоснована и разработана гибридная архитектура CNN-BiLSTM для анализа пространственно-временных паттернов биомеханических временных рядов ИМУ-сигналов, продемонстрировавшая наилучшие результаты среди всех исследованных подходов. Проведена оптимизация гиперпараметров и оценка эффективности моделей с использованием стандартизированных метрик качества.

В заключении сформулированы основные результаты исследования, обобщены научные и практические выводы, а также определены перспективные направления дальнейших исследований в области применения методов искусственного интеллекта для диагностики когнитивных нарушений.

Полный объем диссертации составляет 101 страница, включая 21 иллюстрацию, 12 таблиц, а также 2 приложения. Список использованных источников состоит из 132 публикаций.