

АННОТАЦИЯ

На диссертационную работу Рыспаевой Марьи Куанышевны на тему «Искусственный интеллект для обнаружения рака груди с использованием глубоких сверточных нейронных сетей» на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D06102 – «Информационные технологии и робототехника»

Актуальность темы исследования. Рак молочной железы (РМЖ) является одной из наиболее значимых онкологических проблем современного здравоохранения и занимает первое место среди злокачественных новообразований у женщин. По данным международной статистики ежегодно выявляется свыше двух миллионов новых случаев РМЖ, а число смертей в 2022 году превысило 700 тысяч. В Республике Казахстан ежегодно регистрируется более 5 тысяч новых случаев РМЖ, при этом сохраняется проблема поздней диагностики: по оценкам, в 10-15% случаев заболевание выявляется на поздних стадиях, что ухудшает прогноз и повышает стоимость лечения. Ключевая роль в раннем выявлении РМЖ принадлежит методам медицинской визуализации, включая ультразвуковое исследование (УЗИ) и маммографию. Однако интерпретация изображений зависит от человеческого фактора и качества протоколов, что стимулирует развитие методов искусственного интеллекта (ИИ), в частности сверточных нейронных сетей (CNN), показавших высокую эффективность в задачах автоматизированной классификации медицинских изображений и обнаружения патологий. В практических сценариях применение CNN в диагностике РМЖ существенно ограничивается дефицитом и дисбалансом клинических данных, при котором злокачественные случаи представлены значительно реже, а формирование качественной разметки требует значительных экспертных ресурсов.

Традиционные методы аугментации (повороты, отражения, масштабирование) лишь частично компенсируют дисбаланс и не обеспечивают требуемого клинического разнообразия. Поэтому практической задачей является повышение чувствительности CNN-классификаторов к злокачественному классу. В качестве вспомогательного инструмента рассматриваются генеративные состязательные сети (GAN), позволяющие формировать реалистичные синтетические медицинские изображения и восполнять дефицит миноритарного класса.

В рамках настоящей диссертации генеративный синтез рассматривается не как самостоятельная цель, а как механизм повышения качества автоматизированного обнаружения РМЖ с использованием CNN. Для медицинских данных критично применение устойчивых схем обучения (WGAN-GP) и анализ влияния TL и источников предобучения (ImageNet, RadImageNet) на устойчивость синтеза и итоговые показатели downstream-классификации. В настоящей работе задача обнаружения РМЖ формулируется как задача бинарной классификации медицинских изображений на классы *benign* и *malignant* (image-level classification), при

которой нейронная сеть выявляет наличие признаков злокачественного новообразования на уровне всего изображения.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью разработки и экспериментальной валидации подхода, повышающего эффективность обнаружения РМЖ за счёт синтетического расширения обучающей выборки и роста чувствительности CNN к злокачественному классу.

Целью докторской диссертации является разработка и экспериментальная валидация метода автоматизированного обнаружения РМЖ на медицинских изображениях с использованием CNN, устойчивого к дефициту и дисбалансу данных за счёт синтетического расширения обучающей выборки с применением генеративной модели DGAN-WP-TL.

Задачи диссертационного исследования:

1. Провести анализ современных методов применения сверточных нейронных сетей и генеративных моделей в задачах обнаружения рака молочной железы в условиях дефицита и дисбаланса данных.

2. Обосновать применение генеративных моделей для синтетического расширения обучающих медицинских данных.

3. Разработать генеративную модель DGAN-WP-TL с двухветвевой архитектурой критика для генерации синтетических изображений миноритарного класса.

4. Разработать метод обучения CNN-классификаторов, основанный на управляемом формировании обучающей выборки за счёт варьирования доли синтетических данных.

5. Разработать методику оценки синтетических данных и провести экспериментальную апробацию предложенного подхода с анализом влияния синтетического расширения на качество классификации.

Объект исследования: системы автоматизированной диагностики рака молочной железы на основе глубоких сверточных нейронных сетей.

Предмет исследования: закономерности повышения диагностической эффективности CNN-классификаторов рака молочной железы при обучении на ограниченных и несбалансированных медицинских данных в условиях их генеративного синтетического расширения.

Методы исследования. В диссертационном исследовании использованы методы ИИ и глубокого обучения, основанные на архитектурах CNN и GAN. Для анализа и обработки медицинских изображений применялись методы обучения с переносом (transfer learning) с использованием предобученных моделей. В ходе исследования использовались методы математического и вычислительного моделирования, экспериментальные методы обучения нейронных сетей, а также методы генеративного синтетического расширения обучающих выборок. Для оценки эффективности предложенных подходов применялись методы статистического анализа и метрики качества генерации и классификации медицинских изображений.

Положения, выносимые на защиту:

1. генеративная модель DGAN-WP-TL с двухветвевой структурой критика, в которой объединяются предобученные и доменно-адаптированные признаки, что обеспечивает более точную оценку реалистичности синтетических изображений и повышает качество их генерации.

2. метод обучения CNN-классификатора РМЖ, в котором реализовано управляемое формирование обучающей выборки за счёт варьирования доли синтетических данных, что позволяет контролируемо изменять распределение данных и повышать диагностическую чувствительность модели.

3. методика оценки синтетических данных, основанная на сочетании распределительных, перцептивных и структурных метрик, а также анализе их влияния на результаты классификации, что позволяет оценивать их диагностическую значимость.

Основные результаты исследования. В результате проведённого диссертационного исследования разработан и экспериментально валидирован метод автоматизированного обнаружения рака молочной железы на медицинских изображениях, устойчивый к дефициту и дисбалансу данных, основанный на совместном использовании CNN и генеративного синтеза данных. Предложен подход, в котором генеративная модель применяется не как самостоятельная цель, а как вспомогательный инструмент целенаправленного синтетического расширения обучающих выборок для повышения чувствительности CNN к злокачественному классу.

Разработан и теоретически обоснован метод DGAN-WP-TL, основанный на архитектуре Wasserstein GAN с градиентным штрафом (WGAN-GP) и механизмах обучения с переносом (transfer learning), предназначенный для устойчивой генерации синтетических злокачественных (malignant) медицинских изображений в условиях ограниченных и несбалансированных выборок. Реализован конвейер формирования синтетически расширенной обучающей выборки и последующего обучения CNN-классификаторов, ориентированный на повышение качества downstream-классификации.

Проведён комплекс вычислительных экспериментов на наборах BUSI и CBIS-DDSM, а также выполнена междоменная проверка устойчивости подхода на данных Alzheimer MRI. Установлено, что использование синтетических данных, сформированных методом DGAN-WP-TL, обеспечивает устойчивое улучшение клинически значимых метрик обнаружения злокачественных случаев (в первую очередь Recall и F1-score, а также AUC) по сравнению с обучением на исходных несбалансированных выборках.

Выполнены абляционные исследования влияния параметров обучения генеративной модели, включая коэффициент градиентного штрафа λ , а также проанализировано влияние источников предобученных весов (ImageNet и RadImageNet) на устойчивость генерации и вклад синтетических данных в последующую классификацию. Показано, что улучшение downstream-классификации определяется не только минимизацией распределительных метрик генерации, а достигается при оптимальном балансе реалистичности и внутриклассового разнообразия синтетических изображений.

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к автоматизированному обнаружению рака молочной железы, включающего генерацию, использование и оценку синтетических медицинских данных. Предложена генеративная модель DGAN-WP-TL с двухветвевой архитектурой критика, в которой за счёт интеграции предобученного и доменно-адаптированного признаков пространств обеспечивается более точная аппроксимация распределения медицинских изображений и устойчивость обучения генеративной модели. Разработан метод обучения CNN-классификаторов, в котором реализовано управляемое формирование обучающей выборки за счёт варьирования доли синтетических данных миноритарного класса, что позволяет целенаправленно изменять распределение данных и повышать диагностическую чувствительность модели. Разработана методика оценки синтетических данных, основанная на сочетании распределительных, перцептивных и структурных метрик, а также анализе их влияния на результаты классификации, что позволяет выявлять коллапс мод и оценивать диагностическую значимость синтетических изображений.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии научных представлений о применении методов ИИ, в частности CNN и GAN, для задач автоматизированного анализа медицинских изображений. В работе предложен и теоретически обоснован подход, в котором генеративная модель используется как вспомогательный инструмент синтетического расширения обучающих выборок с целью повышения эффективности классификации в условиях дефицита и дисбаланса данных.

Полученные результаты расширяют теоретические основы применения GAN в медицинской визуализации за счёт обоснования их роли в формировании синтетических обучающих данных, ориентированных на повышение чувствительности CNN-классификаторов к редким злокачественным паттернам. Показана возможность применения unconditional-генерации медицинских изображений для балансировки обучающих выборок, что снижает зависимость моделей от объёма размеченных данных и формирует методологические основы интеграции генеративных моделей и CNN в задачах автоматизированного обнаружения патологий.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в возможности применения разработанного метода DGAN-WP-TL для повышения эффективности автоматизированного анализа медицинских изображений в задачах обнаружения рака молочной железы. Использование синтетических данных, генерируемых предложенной моделью, позволяет уменьшить влияние дисбаланса обучающих выборок, повысить чувствительность CNN к редким злокачественным паттернам и улучшить надежность классификации медицинских изображений.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем компьютерной поддержки принятия врачебных решений (Computer-Aided Diagnosis, CAD), а также в научно-исследовательских и

образовательных проектах в области медицинской визуализации, машинного обучения и ИИ.

Внедрение результатов исследовательской работы. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры программного обеспечения НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», что подтверждается Актом о практическом применении результатов диссертационного исследования Рыспаевой М.К. на тему «Искусственный интеллект для обнаружения рака груди с использованием глубоких свёрточных нейронных сетей» от 03.03.2026 г.

Апробация результатов диссертационного исследования. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Программного обеспечения» НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», а также на следующих международных научных конференциях, материалы которых индексируются в IEEE Xplore и Scopus:

– Международная конференция IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), г. Астана, Казахстан, 2023, 2025 гг.;

– Международная конференция IEEE AITU: Digital Generation Conference, г. Астана, Казахстан, 2024 г.

В международных изданиях с ненулевым импакт-фактором, входящим в базу данных Scopus – 1 статья. Вклад автора состоит в формулировке научной гипотезы, сборе и предварительной обработке данных, разработке и технической реализации экспериментальной части исследования, интерпретации полученных результатов и подготовке публикации:

1. Multi-domain synthetic medical image generation and dataset balancing with DGAN-WP-TL // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization. – 2025. – Vol. 13(1). – P. 2556687. <https://doi.org/10.1080/21681163.2025.2556687>

Статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования РК – 5 статей. В рамках данных публикаций автор является разработчиком исследовательской концепции и методологии анализа данных. Непосредственно участвовал в сборе данных, интерпретации результатов, формулировке выводов и подготовке научных статей к публикации:

1. GAN-based medical image generation for rare pathologies using transfer learning and RadImageNet weights // Международный журнал информационных и коммуникационных технологий. – 2025. – Т. 6, № 3. – P. 254–269. <https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.23.3.015>

2. Impact of loss function on synthetic breast ultrasound image generation // Scientific Journal of Astana IT University. – 2025. – № 24. – P. 99–112. <https://doi.org/10.37943/24MMIK3887>

3. Evaluation of StyleGAN2 and StyleGAN3 for synthetic medical image generation on BUSI and CBIS-DDSM datasets // Bulletin of Shakarim University.

Technical Sciences Series. – 2025. – № 4(20). – P. 89–96.
[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-11](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-11)

4. The Impact of Gradient Penalty Parameter on the Performance of Deep Convolutional Generative Adversarial Network with Wasserstein Penalty in Mammography // Университет еңбектері – Труды университета. – 2025. – № 4. – P. 427–434. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2025_4_427

5. Синтез и классификация ультразвуковых изображений рака молочной железы с использованием генеративно-сопоставительной сети Вассерштейна и трансферного обучения // Вестник КазАТК. – 2025. – № 141(6). – P. 222–231. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-141-6-222-231>

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, выборе методологического подхода к автоматизированному обнаружению рака молочной железы на основе CNN с использованием методов синтетического расширения данных. Автором выполнен анализ современных методов классификации медицинских изображений и генеративных моделей, разработан и теоретически обоснован метод DGAN-WP-TL, основанный на архитектуре Wasserstein GAN с градиентным штрафом и механизмах трансферного обучения. Автором осуществлена программная реализация разработанного метода, подготовка и обработка экспериментальных данных, обучение и тестирование моделей на наборах медицинских изображений BUSI, CBIS-DDSM и Alzheimer MRI, а также проведение вычислительных экспериментов и анализ полученных результатов с использованием метрик качества генерации и классификации. Все основные научные результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

Публикации по теме диссертационного исследования. По теме диссертационного исследования было опубликовано 9 (девять) научных трудов, из них 5 (пять) статей в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования РК, 1 (одна) статья в международном научном издании, входящих в базу Scopus, 3 (три) статьи в материалах международных научных конференций, которые индексируются в IEEE Xplore и Scopus, Также получены 3 (три) авторских свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертационной работы составляет 116 страниц (30 рисунков и 41 таблица).

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, а также раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первом разделе представлен аналитический обзор современного состояния исследований по обнаружению РМЖ с использованием методов ИИ. Рассмотрены медицинские аспекты ранней диагностики РМЖ,

применение CNN в задачах медицинской визуализации, а также проблема ограниченности и дисбаланса клинических данных. Отдельное внимание уделено генеративным моделям для синтеза медицинских изображений и существующим подходам в интеграции генеративных и классификационных методов.

Во втором разделе изложены методологические и математические основы разработки метода обнаружения РМЖ. Рассмотрены архитектуры CNN и их адаптация к задаче классификации РМЖ, использование обучения с TL и предобученных весов ImageNet и RadImageNet, а также математическая модель генеративных сетей от классического GAN к WGAN и WGAN-GP. Описаны используемые датасеты и экспериментальные данные, представлена двухветвевая архитектура DGAN-WP-TL с интеграцией генеративной модели и feature extractor в дискриминаторе, а также сформулирован подход к классификации опухолей на основе синтетически расширенной обучающей выборки.

В третьем разделе представлены экспериментальные исследования и результаты, направленные на оценку эффективности автоматизированного обнаружения РМЖ с использованием CNN в условиях дефицита и дисбаланса данных. Ключевым элементом раздела является анализ влияния синтетически расширенной обучающей выборки на качество downstream-классификации опухолей, включая оценку изменений клинически значимых метрик Recall, F1-score и AUC. Для обеспечения условий повышения качества классификации выполнена экспериментальная апробация предложенного метода DGAN-WP-TL, используемого в качестве инструмента синтетического расширения данных. Приведены результаты генерации синтетических изображений для датасетов BUSI и CBIS-DDSM, а также выполнена дополнительная методическая апробация метода на данных Alzheimer MRI. Проведён анализ распределений реальных и синтетических изображений с использованием методов PCA и t-SNE, выполнено сравнение с baseline-архитектурой StyleGAN2, а также исследовано влияние предобученных весов ImageNet и RadImageNet и архитектурных параметров DGAN-WP-TL на устойчивость и качество генерации при малом объёме данных.

В четвёртом разделе выполнен аналитический разбор и обобщение результатов исследования, включая интерпретацию экспериментальных данных, обоснование архитектурных решений, сравнительный анализ с существующими подходами и baseline-архитектурами, а также формулирование ограничений, практических рекомендаций и направлений дальнейших исследований.

В заключении подведены основные итоги диссертационного исследования, сформулированы выводы по результатам выполненной работы и рекомендации, а также обозначены перспективы дальнейшего развития предложенного подхода.

В приложениях представлены вспомогательные материалы, включая акт внедрения и документы, подтверждающие практическое использование результатов диссертационного исследования.