

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD670193>

EDN: TFNTZA

Роль искусственного интеллекта и новых методов визуализации в ранней диагностике рака поджелудочной железы: научный обзор

Ф.Т. Мусаева¹, Е.Р. Суменова¹, А.Х. Исламгулов², З.М. Кумыкова¹, Т.С. Элипханова³,
А.И. Ушаева⁴, А.С. Хасиева³, Е.С. Озерова⁵, Д.А. Хуснутдинова⁶, А.А. Набиуллина⁶,
Я.Ю. Кулинская⁴, Р.Р. Якупова², А.А. Мустафин²

¹ Северо-Осетинская государственная медицинская академия, Владикавказ, Россия;

² Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия;

³ Майкопский государственный технологический университет, Майкоп, Россия;

⁴ Российский университет медицины, Москва, Россия;

⁵ Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия;

⁶ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Протоковая аденокарцинома поджелудочной железы является наиболее распространённым типом рака поджелудочной железы, который в 80–85% случаев отличается прогрессирующим течением или наличием отдалённых метастатических очагов. Несмотря на успехи в изучении протоковой аденокарциномы поджелудочной железы, она по-прежнему имеет неблагоприятный прогноз ввиду поздней диагностики и ограниченных возможностей лечения на поздних стадиях заболевания. В последние годы применяют обработку изображений с помощью искусственного интеллекта для её диагностики, которая показала многообещающие результаты. В данном обзоре обобщены современные литературные данные и оценена роль искусственного интеллекта в области визуализации и ранней диагностики протоковой аденокарциномы поджелудочной железы, а также выявлены нерешённые вопросы, требующие проведения дальнейших исследований. Поиск публикаций проведён в поисковых системах PubMed, Google Scholar и eLibrary. Его осуществляли с помощью следующих ключевых слов на русском и английском языках: «ранняя диагностика рака поджелудочной железы», «искусственный интеллект», «протоковая аденокарцинома поджелудочной железы», «медицинская визуализация», «наночастицы», «pancreatic cancer», «artificial intelligence», «early diagnosis pancreatic ductal adenocarcinoma», «pancreatic cancer imaging». В области раннего выявления протоковой аденокарциномы поджелудочной железы с помощью технологий искусственного интеллекта наблюдают значительный прогресс. Современные подходы включают стратификацию риска до визуализации и увеличение объёма анализируемых данных с помощью оценки электронных медицинских карт. Несмотря на значительные успехи, внедрение технологий искусственного интеллекта в клиническую практику всё ещё сопряжено с различными проблемами. В свою очередь, их совместное использование с биомаркерами представляет перспективное направление для дальнейших исследований, способное улучшить терапию различных злокачественных новообразований, включая протоковую аденокарциному поджелудочной железы.

Ключевые слова: рак поджелудочной железы; искусственный интеллект; ранняя диагностика; протоковая аденокарцинома поджелудочной железы; глубокое обучение; медицинская визуализация; обзор.

Как цитировать:

Мусаева Ф.Т., Суменова Е.Р., Исламгулов А.Х., Кумыкова З.М., Элипханова Т.С., Ушаева А.И., Хасиева А.С., Озерова Е.С., Хуснутдинова Д.А., Набиуллина А.А., Кулинская Я.Ю., Якупова Р.Р., Мустафин А.А. Роль искусственного интеллекта и новых методов визуализации в ранней диагностике рака поджелудочной железы: научный обзор // Digital Diagnostics. 2025. Т. 6, № 2. С. 317–330. DOI: 10.17816/DD670193 EDN: TFNTZA

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD670193>

EDN: TFNTZA

Role of Artificial Intelligence and Novel Visualization Techniques in the Early Diagnosis of Pancreatic Cancer: A Review

Ferida T. Musaeva¹, Elizaveta R. Sumenova¹, Almaz Kh. Islamgulov², Zalina M. Kumyкова¹, Tamila S. Elipkhanova³, Alina I. Ushaeva⁴, Amina S. Khasieva³, Ekaterina S. Ozerova⁵, Dina A. Khusnutdinova⁶, Alina A. Nabiullina⁶, Yana Yu. Kulinskaya⁴, Roksana R. Yakupova², Arthur A. Mustafin²

¹ North Ossetian State Medical Academy, Vladikavkaz, Russia;

² Bashkir State Medical University, Ufa, Russia;

³ Maikop State Technological University, Maikop, Russia;

⁴ Russian University of Medicine, Moscow, Russia;

⁵ The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia;

⁶ Kazan Federal University, Kazan, Russia

ABSTRACT

Pancreatic ductal adenocarcinoma is the most common pancreatic cancer. It is characterized by a progressive course or distant metastases in 80%–85% of cases. Despite advances in understanding of pancreatic ductal adenocarcinoma, the disease is consistently linked to poor prognosis due to late diagnosis and limited treatment options in advanced stages. Recently, image processing using artificial intelligence has been introduced for pancreatic ductal adenocarcinoma diagnosis and demonstrated promising results. This review summarizes current scientific data, evaluates the role of artificial intelligence in imaging and early detection of pancreatic ductal adenocarcinoma, and identifies issues that warrant further investigation. The search for publications was conducted using PubMed, Google Scholar, and eLibrary. The following Russian and English search keywords were used: ранняя диагностика рака поджелудочной железы (early diagnosis of pancreatic cancer), искусственный интеллект (artificial intelligence), протоковая аденокарцинома поджелудочной железы (pancreatic ductal adenocarcinoma), медицинская визуализация (medical visualization), наночастицы (nanoparticles), pancreatic cancer, artificial intelligence, early diagnosis pancreatic ductal adenocarcinoma, and pancreatic cancer imaging. Significant progress in early detection of pancreatic ductal adenocarcinoma using artificial intelligence technologies was observed. Current approaches include pre-imaging risk stratification and increased data volume by analyzing electronic medical records. Despite substantial achievements, the clinical implementation of artificial intelligence technologies remains challenging. The use of artificial intelligence along with biomarkers is a promising direction and may enhance theranostics of various malignancies, including pancreatic ductal adenocarcinoma.

Keywords: pancreatic cancer; artificial intelligence; early diagnosis; pancreatic ductal adenocarcinoma; deep learning; medical visualization; review.

To cite this article:

Musaeva FT, Sumenova ER, Islamgulov AKh, Kumyкова ZM, Elipkhanova TS, Ushaeva AI, Khasieva AS, Ozerova ES, Khusnutdinova DA, Nabiullina AA, Kulinskaya YaYu, Roksana Yakupova RR, Mustafin AA. Role of Artificial Intelligence and Novel Visualization Techniques in the Early Diagnosis of Pancreatic Cancer: A Review. *Digital Diagnostics*. 2025;6(2):317–330. DOI: 10.17816/DD670193 EDN: TFNTZA

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD670193>

EDN: TFNTZA

人工智能与新型影像学方法在胰腺癌早期诊断中的作用：文献综述

Ferida T. Musaeva¹, Elizaveta R. Sumenova¹, Almaz Kh. Islamgulov², Zalina M. Kumykova¹, Tamila S. Elipkhanova³, Alina I. Ushaeva⁴, Amina S. Khasieva³, Ekaterina S. Ozerova⁵, Dina A. Khusnutdinova⁶, Alina A. Nabiullina⁶, Yana Yu. Kulinskaya⁴, Roksana R. Yakupova², Arthur A. Mustafin²

¹ North Ossetian State Medical Academy, Vladikavkaz, Russia;

² Bashkir State Medical University, Ufa, Russia;

³ Maikop State Technological University, Maikop, Russia;

⁴ Russian University of Medicine, Moscow, Russia;

⁵ The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia;

⁶ Kazan Federal University, Kazan, Russia

摘要

胰腺导管腺癌是最常见的胰腺癌类型，在80 – 85%的病例中呈现出进展性病程或伴有远处转移灶。尽管对胰腺导管腺癌的研究已取得一定进展，但由于诊断较晚以及晚期治疗手段有限，该病的预后仍然不良。近年来，人工智能图像处理技术已开始应用于胰腺导管腺癌的诊断，并显示出良好前景。本综述汇总了当前文献资料，分析并评估人工智能在影像学及胰腺导管腺癌早期诊断中的作用，同时指出尚待深入研究的问题。文献检索是在PubMed、Google Scholar和eLibrary等数据库中进行的。文献检索是通过以下俄文和英文关键词进行的：“ранняя диагностика рака поджелудочной железы”（胰腺癌早期诊断）、“искусственный интеллект”（人工智能）、“протоковая аденокарцинома поджелудочной железы”（胰腺导管腺癌）、“медицинская визуализация”（医学影像）、“наночастицы”（纳米颗粒）、“pancreatic cancer”（胰腺癌）、“artificial intelligence”（人工智能）、“early diagnosis pancreatic ductal adenocarcinoma”（胰腺癌早期诊断）、“pancreatic cancer imaging”（胰腺癌影像学检查）。在利用人工智能技术实现胰腺导管腺癌早期识别的研究领域，已取得显著进展。当前方法包括影像前的风险分层，以及通过电子病历评估实现分析数据量的扩大。尽管已取得显著进展，人工智能技术在临床实践中的应用仍面临诸多问题。人工智能技术与生物标志物的联合应用构成了一个值得进一步研究的前景方向，有望改善多种恶性肿瘤（包括胰腺导管腺癌）的诊疗一体化水平。

关键词：胰腺癌；人工智能；早期诊断；胰腺导管腺癌；深度学习；医学影像；综述。

引用本文：

Musaeva FT, Sumenova ER, Islamgulov AKh, Kumykova ZM, Elipkhanova TS, Ushaeva AI, Khasieva AS, Ozerova ES, Khusnutdinova DA, Nabiullina AA, Kulinskaya YaYu, Roksana Yakupova RR, Mustafin AA. 人工智能与新型影像学方法在胰腺癌早期诊断中的作用：文献综述. *Digital Diagnostics*. 2025;6(2):317–330. DOI: 10.17816/DD670193 EDN: TFNTZA

收到: 27.02.2025

接受: 10.04.2025

发布日期: 29.05.2025

ВВЕДЕНИЕ

Рак поджелудочной железы (РПЖ) — злокачественное новообразование (ЗНО) пищеварительного тракта, характеризующееся быстрой прогрессией, инвазивностью, отсутствием ярко выраженных симптомов на ранних стадиях заболевания, а также склонностью к рецидивам после хирургического лечения [1]. Протоковая аденокарцинома поджелудочной железы (ПАПЖ) является наиболее распространённым типом РПЖ, который в 80–85% случаев отличается прогрессирующим течением или наличием отдалённых метастатических очагов. Кроме того, 5-летняя выживаемость при РПЖ составляет 12% — наименьший показатель среди всех видов ЗНО, что подчёркивает важную роль ранней диагностики и лечения пациентов [2].

Несмотря на успехи в изучении ПАПЖ, она по-прежнему имеет неблагоприятный прогноз ввиду поздней диагностики и ограниченных возможностей лечения на поздних стадиях заболевания. Сложность раннего выявления в сочетании с ожидаемым ростом заболеваемости, обусловленным такими факторами риска, как ожирение и сахарный диабет у лиц старше 50 лет, создаёт предпосылки к увеличению распространённости данной патологии [3, 4]. В 2023 году в Соединённых Штатах Америки (США) зарегистрировано 62 210 новых случаев ПАПЖ, а количество летальных исходов в 2022 году — 49 380 человек [3]. Из 57 600 зафиксированных в 2020 году случаев у 55% уже выявлены метастатические поражения [4]. На долю ПАПЖ приходится 2 и 5% всех случаев рака и смертей от него в США соответственно, что подчёркивает острую необходимость более раннего выявления данной патологии [5]. В 2019 году в России РПЖ в структуре онкологической заболеваемости составил у мужчин и женщин 3,4 и 3,0% соответственно. За 10 лет наблюдают увеличение заболеваемости на 11,4 и 25% у мужчин и женщин соответственно. Абсолютное число вновь установленного диагноза РПЖ в 2019 году — 19 930 случаев [6].

В настоящее время Рабочая группа по профилактическим медицинским услугам США (United States Preventive Services Task Force, USPSTF) не рекомендует проводить скрининг бессимптомных взрослых пациентов на ПАПЖ из-за низкой распространённости данной патологии в общей популяции и недостаточных доказательств того, что он может способствовать улучшению показателей выявления, снижению заболеваемости или смертности [7]. Однако существуют руководства, рекомендуемые проведение визуализации и динамического наблюдения для пациентов из групп высокого риска [8]. Кроме того, в настоящее время проводят рандомизированное контролируемое исследование, изучающее роль скрининга у пациентов с впервые выявленной гипергликемией и сахарным диабетом для раннего обнаружения ПАПЖ с использованием компьютерной томографии (КТ) (NCT04662879) [9]. Тем не менее в связи с отсутствием специфических биомаркёров и существующими

ограничениями КТ и магнитно-резонансной томографии (МРТ) в отношении выявления ПАПЖ размером менее 2 см ранняя диагностика данной патологии остаётся сложной задачей, даже в группах высокого риска [10].

В последние годы применяют обработку изображений с помощью искусственного интеллекта (ИИ) для диагностики ПАПЖ, и она показывает многообещающие результаты [11]. ИИ включает системы, действующие подобно человеческому интеллекту и обучающие принятию решений. Экспоненциальное развитие технологий ИИ, преимущественно в областях машинного обучения (МО) и глубокого обучения (ГО), стремительно привлекает интерес клиницистов к созданию новых интегрированных, надёжных и эффективных методов диагностики с целью оказания медицинской помощи. ГО — значительный шаг вперёд относительно решений проблем, связанных с накоплением, обработкой и дифференцировкой больших объёмов данных. На протяжении многих лет медицинское сообщество не могло решить существующие проблемы. Однако ГО отлично помогает выявлять сложные структуры в высокоразмерных данных и его возможно применять во многих областях науки. Кроме того, его системы обучаемы и способны работать на основе исходных данных, например чисел, текста или даже их комбинаций [12]. Обученные модели, полученные с помощью технологий ИИ, могут обрабатывать входные медицинские изображения и выдавать аналитические результаты в течение нескольких секунд, сокращая период диагностики до минимума. Исследования показали, что системы ИИ демонстрируют сопоставимые с медицинскими экспертами результаты при выявлении ПАПЖ, а в некоторых случаях даже превосходят их [11, 13]. Значительные преимущества в скорости анализа данных также способствуют улучшению диагностики и лечения, снижая нагрузку на медицинский персонал [11, 13].

Последние достижения в области технологий визуализации и анализа изображений с помощью ИИ позволяют повысить чувствительность и специфичность ранней диагностики ПАПЖ. К таким достижениям относят специфичные для ЗНО трейсеры позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), ультразвуковые контрастные вещества и методы обработки и анализа данных визуализации, реализуемые посредством алгоритмов ИИ [13].

МЕТОДОЛОГИЯ ПОИСКА ДАННЫХ

Мы провели поиск публикаций в таких поисковых системах, как PubMed, Google Scholar и eLibrary. Его осуществляли с помощью ключевых слов на русском и английском языках: «ранняя диагностика рака поджелудочной железы», «искусственный интеллект», «протоковая аденокарцинома поджелудочной железы», «медицинская визуализация», «наночастицы», «pancreatic cancer», «artificial intelligence», «early diagnosis pancreatic ductal adenocarcinoma», «pancreatic cancer imaging». Временной

интервал поиска — с 2003 по 2025 год. В исследование включали статьи, опубликованные преимущественно за последние 5 лет, однако в случае высокой научной значимости — более ранние работы. При необходимости мы проводили дополнительный поиск иной релевантной литературы, касающейся клинико-прогностического значения новых методов визуализации в ранней диагностике РПЖ.

Мы независимо друг от друга провели анализ заголовков и аннотаций статей, после чего извлекли полный текст релевантных исследований. В процессе подготовки обзора использован следующий алгоритм для отбора источников:

- до начала поиска — исключали дубликаты;
- в процессе поиска — анализировали названия и аннотации отобранных статей, проверяя их соответствие теме обзора и наличие полного текста, на данном этапе также исключали тезисы, статьи и работы, не имеющие полного текста;
- полнотекстовые рукописи прошли оценку на соответствие критериям включения.

Среди критериев включения выделяли: полнотекстовые литературные обзоры, опубликованные в рецензируемых научных журналах, метаанализы, систематические обзоры, рандомизированные контролируемые или экспериментальные исследования *in vitro*, *in vivo*, а также клинические случаи на русском или английском языках, содержащие вышеуказанные ключевые слова. В итоге в настоящий обзор включено 60 источников.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОТОКОВОЙ АДЕНОКАРЦИНОМЫ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

КТ с подсчётом фотонов представляет собой новейшее достижение в области КТ, обеспечивая расширение возможностей визуализации и улучшение диагностического потенциала. В отличие от традиционной КТ, благодаря наличию фотонных детекторов, данный метод диагностики позволяет подсчитывать количество фотонов и их взаимодействие между собой [14]. Такой подход даёт несколько ключевых преимуществ, включая более высокое соотношение контрастности и шума, улучшенное пространственное разрешение и повышенную видимость очагов поражения при более низких показателях мощности (50 кВ), достигаемые за счёт улучшенного ответа от вводимого рентгенконтрастного вещества, что имеет большое значение для визуализации и дифференцировки паренхимы поджелудочной железы как в норме, так и при наличии ПАПЖ, которая чаще всего относительно изоденсивна. Предыдущие исследования показали, что использование

низкой мощности (например, 40 кВ) повышает видимость ПАПЖ, в частности при размере ≤ 3 см [15]. Кроме того, до 44% опухолей (особенно размером ≤ 2 см), не выявленных при проведении обычной КТ, являются изоденсивными по отношению к паренхиме поджелудочной железы [16, 17].

Ещё одним направлением развития является разработка молекулярных контрастных средств для проведения КТ, не содержащих йод. Так, наночастицы можно использовать в рамках различных методов визуализации путём включения в них материалов или функциональных групп, соответствующих физическим принципам, лежащим в основе каждого метода, что позволяет применять их при проведении КТ, МРТ и ультразвукового исследования (УЗИ). Наиболее изученными считают наночастицы золота, известные своими оптическими свойствами и применяемые в фототермической терапии для избирательного уничтожения раковых клеток с помощью излучения, и наночастицы оксида железа, используемые при проведении МРТ и таргетной терапии, обеспечивая достижение как диагностических, так и лечебных целей [18]. Однако КТ с подсчётом фотонов, благодаря своей способности визуализировать К-край поглощения¹ элементов в диапазоне от 25 до 150 кВ, может обнаруживать наночастицы (например, золота или гадолиния) даже в очень низких концентрациях, что способствует раннему выявлению первичных новообразований и метастазов. Кроме того, использование наночастиц основано на их взаимодействии с определёнными молекулярными мишенями ПАПЖ, открывая перспективы для более эффективной тераностики² [19]. Несмотря на потенциал наночастиц в рамках раннего выявления ПАПЖ, их использование ограничено обнаружением определённых маркёров в биоматериалах, что не позволяет применять их в качестве агентов визуализации, специфичных для данной патологии [20, 21].

Молекулярная визуализация с использованием ПЭТ продолжает вызывать большой интерес с точки зрения диагностики ПАПЖ. В клинической практике наиболее используемым радиофармацевтическим лекарственным препаратом (РФЛП) является ¹⁸F-фтордезоксиглюкоза (¹⁸F-ФДГ), однако Национальная всеобъемлющая онкологическая сеть (National Comprehensive Cancer Network, NCCN) не рекомендует его применять в диагностике ПАПЖ [22]. Как и при других видах ЗНО, обнаружение малых поражений с помощью ПЭТ, совмещённой с КТ (ПЭТ/КТ), и ¹⁸F-ФДГ представляет весьма сложную задачу, что связано с относительно низким отношением сигнала к шуму, обусловленным слабой визуализацией небольших опухолей на фоне высокой активности паренхимы поджелудочной железы, особенно при наличии воспалительных

¹ К-край поглощения — резкое увеличение коэффициента поглощения рентгеновского или γ -излучения, которое происходит, когда энергия излучения превышает энергию связи электрона на К-оболочке атома (самой внутренней оболочке).

² Тераностика — это междисциплинарный подход в медицине, сочетающий диагностику и лечение в рамках единой технологии или препарата.

изменений [13]. Именно поэтому актуальным становится поиск альтернативных препаратов, а также методов, способствующих повышению эффективности ранней диагностики ПАПЖ.

Гистопатологически ПАПЖ — гиповаскулярная опухоль, состоящая из мелких трубчатых (протоковых) структур, расположенных в плотной фиброваскулярной строме, имеющая инфильтративный характер роста [13, 23]. При многих ЗНО, включая ПАПЖ, раково-ассоциированные фибробласты в повышенном количестве продуцируют белок активации фибробластов [23]. Разработано несколько РФЛП, нацеленных на данный белок, в частности ^{68}Ga -FAPi (Fibroblast Activation Protein Inhibitor), который ингибирует его действие [24]. Многочисленные исследования показали возможность проведения ПЭТ/КТ с ^{68}Ga -FAPi при ПАПЖ и его преимущество в сравнении с ^{18}F -ФДГ [25–27]. Однако ^{68}Ga -FAPi имеет то же потенциальное ограничение, что и ^{18}F -ФДГ, а именно сложность в разграничении воспаления и опухолевой ткани [28]. Тем не менее исследования, изучающие использование ^{68}Ga -FAPi при проведении ПЭТ/КТ для диагностики ПАПЖ, смоделированной в эксперименте на мышах, продемонстрировали многообещающие результаты в контексте раннего выявления опухолей по сравнению с ^{18}F -ФДГ [29]. Предварительные клинические данные также свидетельствуют о возможности его применения для раннего выявления ЗНО и трансформации муцинозных поражений поджелудочной железы [30, 31]. Несмотря на необходимость дополнительных исследований для определения эффективности и экономической целесообразности применения ^{68}Ga -FAPi при проведении ПЭТ/КТ, в будущем данный РФЛП может сыграть важную роль в отборе пациентов с РПЖ на ранней стадии. Кроме того, исследуют дополнительные РФЛП, направленные на интегрин, рецептор эпидермального фактора роста и экстрадомен В фибронектина. Так, интегрин — поверхностная молекула клеток, выполняющая функцию рецептора фибронектина, играющая роль посредника во взаимодействии клеток и способствующая пролиферации и ангиогенезу, содержание которой повышено при многих ЗНО [32, 33]. Рецептор эпидермального фактора роста — трансмембранный гликопротеин, играющий ключевую роль в неоангиогенезе и пролиферации опухолевых клеток [34]. Экстрадомен В фибронектина — гликопротеин, обнаруженный во внеклеточном матриксе многих ЗНО, включая ПАПЖ [35]. Тем не менее исследование данных РФЛП находится на ранней стадии, что требует дополнительного изучения с целью определения их эффективности в отношении ранней диагностики ПАПЖ.

Молекулярная ультразвуковая визуализация показала свою перспективность в ранней диагностике ПАПЖ. Некоторые исследовательские группы сфокусировали своё внимание на разработке микропузырьков, нацеленных на специфические биомаркеры эндотелия сосудов при ПАПЖ [36]. При исследовании ПАПЖ, смоделированной в эксперименте на мышах, проведение

контрастно-усиленного УЗИ с использованием микропузырькового контрастного агента, нацеленного на рецептор фактора роста эндотелия сосудов типа 2, позволяет обнаружить небольшие очаги опухоли диаметром менее 3 мм [37]. Антиген дифференцировки тимоцитов 1 является молекулярным маркером, содержание которого повышено при ПАПЖ, а проведение контрастно-усиленного УЗИ *in vivo* с одноцепочечным антителом-лигандом, специфичным к антигену дифференцировки тимоцитов 1, позволяет обнаружить ПАПЖ как в ортотопической, так и в трансгенной мышинной модели [38].

Всё больше данных свидетельствует о существенной роли метаболической трансформации в патогенезе ПАПЖ. Мутации в онкогене *KRAS*, встречающиеся в 90% случаев данной патологии, стимулируют гликолиз в новообразовании, что сопровождается повышенной активностью многочисленных гликолитических ферментов, включая лактатдегидрогеназу А, усилением аэробного гликолиза и накоплением лактата, что способствует росту опухоли [39]. В свою очередь, при ПАПЖ снижена экспрессия генов, кодирующих аланин-аминотрансферазы, детерминирующие превращение пирувата в аланин [40]. Такое метаболическое изменение можно выявить неинвазивно с помощью гиперполяризованной МРТ с использованием ^{13}C -меченных соединений — нового метода молекулярной визуализации, обладающего чувствительностью и химической специфичностью в отношении исследования метаболических процессов, которые ранее были недоступны для диагностики [41–43].

Гиперполяризация, достигаемая с помощью метода динамической ядерной поляризации, обеспечивает повышение чувствительности (увеличение сигнала в 10 000 раз) для визуализации ^{13}C -меченых биомолекул, которые отличаются отсутствием токсичности по отношению к организму [41]. Выявлено, что проведение гиперполяризованной МРТ с ^{13}C -пируватом позволяет обнаруживать и отслеживать развитие ПАПЖ в трансгенных мышинных моделях [40, 42]. В частности, в поджелудочной железе наблюдали постепенное снижение соотношения сигналов ^{13}C -аланина/ ^{13}C -лактата при прогрессировании заболевания — от предшественников интраэпителиальной неоплазии поджелудочной железы до ПАПЖ. Недавнее клиническое исследование показало возможность выполнения гиперполяризованной МРТ с ^{13}C -пируватом для количественной оценки метаболической функции в здоровой поджелудочной железе и при развитии ПАПЖ до и после системной терапии [43]. Эти исследования подчёркивают потенциал данного метода в повышении эффективности диагностических и лечебных подходов у пациентов с высоким риском её развития. Следует отметить, что гиперполяризованная МРТ с использованием ^{13}C -пирувата успешно прошла клинические испытания, продемонстрировав безопасность при сравнении с ПЭТ/КТ с ^{68}Ga -FAPi46, использовавшейся в качестве исходного метода молекулярной визуализации [43].

СТРАТИФИКАЦИЯ РИСКА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА БЕЗ УЧЁТА ДАННЫХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

ИИ — это общий термин, охватывающий обширный спектр вычислительных технологий, которые позволяют компьютерам реализовывать решение задач, обычно требующих человеческого интеллекта. МО является подмножеством ИИ, а ГО — это специализированный подход МО, использующий свёрточные нейронные сети и получивший значительное распространение в медицинской визуализации благодаря своей способности автоматически изучать существующие данные, анализировать допущенные ошибки и делать более точные прогнозы, в отличие от МО, которое зачастую требует ручного извлечения изучаемых признаков. Модели МО требуют ручного преобразования медицинских изображений в числовые показатели (контроля со стороны человека-эксперта), в то время как ГО способно напрямую обрабатывать исходные изображения. Ключевые элементы моделирования, используемые при ГО, включают сбор и предварительную обработку данных, выбор модели и разработку архитектуры, обучение и проверку, а также оценку эффективности применяемой модели [12].

D. Placido и соавт. [44, 45] использовали методы ГО для анализа клинических данных 6 млн пациентов, в том числе 24 тыс. с ПАПЖ, из Датского национального регистра пациентов и 3 млн, в частности 3900 пациентов с данным диагнозом, из базы данных Управления по делам ветеранов США (United States Veterans Affairs, US-VA). Цель исследования состояла в определении возможности прогнозирования развития РПЖ в течение 36 мес. после постановки первоначального диагноза на основе сведений, извлечённых из электронных медицинских карт, таких как диагностические коды и характеристики анамнеза заболевания. Модель с наилучшими показателями имела значение площади под кривой (Area Under the Curve, AUC) — 0,879 (0,877–0,880), однако в случае её применения к данным базы Управления по делам ветеранов США зафиксировано его снижение до 0,710 (0,708–0,712). Авторы полагают, что такая разница в эффективности, вероятно, связана с различиями в практике ведения клинических карт и системах кодирования диагнозов, а также с разными периодами обращения за медицинской помощью. Тем не менее некоторые симптомы и коды заболеваний за 0–6 мес. до постановки диагноза ПАПЖ, включая неуточнённую желтуху, заболевания желчевыводящих путей и поджелудочной железы, абдоминальные и тазовые боли, потерю массы тела, сахарный диабет и возникновение новообразований органов желудочно-кишечного тракта, совпадают в разных группах населения. Данное исследование является перспективным, поскольку демонстрирует, как использование электронных медицинских

данных может помочь в информировании клиницистов о вероятности развития различных патологий. Оно может выявить малозаметные тенденции с течением времени или определить факторы риска на ранней стадии, которые специалисту трудно распознать при осмотре пациента, особенно в условиях отсутствия постоянного лечащего врача. Возможно, будущие модели ИИ, включающие лабораторные и физикальные данные, такие как концентрация глюкозы, тенденции изменения массы тела, извлечённые из данных медицинских карт, повысят эффективность ранней диагностики ПАПЖ и позволят своевременно выявлять группы риска для целенаправленного воздействия на потенциально модифицируемые факторы [44, 45].

Основным препятствием для разработки надёжных моделей и систем на основе технологий ИИ остаётся вариабельность качества медицинских данных, содержащихся в электронных медицинских картах, а также ограниченный и небезопасный доступ к большим объёмам персональных данных пациентов. Большая часть медицинских сведений представлена в неструктурированном виде, содержит неточности и избыточные данные, что затрудняет проведение эффективного и точного анализа, необходимого для создания полноценных моделей на основе технологий ИИ [12, 13, 45].

Визуализация необходима для диагностики, определения стадии и планирования лечения ПАПЖ. Однако КТ и МРТ имеют ограниченную диагностическую точность в отношении выявления опухолей размером менее 2 см (69 и 82% соответственно), поэтому радиомику и методы ГО возможно рассматривать в качестве инструментов, способных повысить эффективность выявления ПАПЖ на ранних стадиях [46]. Так, для обнаружения ПАПЖ используют модель сегментации U-Net и её варианты для выделения и изоляции поджелудочной железы от других структур на соответствующих срезах КТ [47]. Классификационная модель определяет наличие или отсутствие ЗНО в поджелудочной железе. Входными данными для этих классификаторов являются сфокусированные области поджелудочной железы (области интересов), выделенные на изображениях КТ с помощью модели сегментации, а выходными — числовой балл, указывающий на вероятность злокачественного поражения. Успех данного подхода зависит от двух ключевых факторов: качества сегментации поджелудочной железы и производительности классификаторов, однако именно первое имеет решающее значение для точного обнаружения патологических изменений. Последние достижения в области ГО, в частности внедрение таких моделей сегментации медицинских изображений, как MedSAM (Medical Segment Anything Model), предоставили возможность правильно сегментировать поджелудочную железу на изображениях КТ [48]. Производительность классификаторов зависит от объёма и разнообразия обучающих данных [49]. Классификатор должен учитывать различные характеристики опухоли, в частности ПАЖП, (размер, форма, стадия)

на изображениях и особенности исследуемых пациентов (возраст, пол и раса). Несколько исследований в области МО и ГО с использованием данных визуализации показали перспективность раннего выявления ПАЖП [50–53].

S. Mukherjee и соавт. [50] провели исследование, результаты которого продемонстрировали, что модели МО на основе радиомических признаков могут идентифицировать и количественно определять паттерны, характерные для ранней стадии ПАПЖ, на её сегментированных снимках. В частности, модель МО, разработанная с помощью машины опорных векторов, позволила выявить визуально незаметные признаки ПАПЖ на преддиагностических изображениях КТ, полученных в портально-венозную фазу и выполненных по другим показаниям в период от 3 до 36 мес. до окончательного установления клинического диагноза ПАПЖ [51]. Медианное время между преддиагностической КТ в тестовой подгруппе и диагностикой ПАПЖ составило 386 дней (97–1092). Важно отметить, что в процессе предварительной клинической интерпретации полученные результаты КТ признаны отрицательными в отношении ПАПЖ. Кроме того, разработанная модель машины опорных векторов продемонстрировала высокую специфичность как на независимом внутреннем наборе данных, так и на общедоступном, включающем результаты КТ поджелудочной железы, Национального института здоровья США (National Institutes of Health-Pancreas CT, NIH-PCT) [52]. Модель значительно превзошла результаты врачей-рентгенологов в отношении идентификации ПАПЖ по данным КТ [50]. Кроме того, авторы оценивали надёжность модели машины опорных векторов на основе радиомических признаков для обнаружения визуально незаметных признаков ПАПЖ по данным преддиагностической КТ путём моделирования распространённых вариаций в параметрах получения изображений и этапах радиомического анализа с использованием методов их искажения. Результаты продемонстрировали устойчивость данной модели к изменениям условий, что свидетельствует об её надёжности [53].

Данная исследовательская группа также разработала полностью автоматизированную модель ИИ на основе свёрточной нейронной сети для раннего обнаружения ПАПЖ [54]. Для её создания авторы выбрали автоматизированный подход, основанный на объёмной сегментации с помощью ИИ, предложенный ранее [55, 56]. Она создана с использованием разнообразного набора данных (~3000 результатов КТ), который является одним из самых больших. Следует отметить, что исследователи исключали изображения КТ с билиарными стентами, поскольку такие устройства создают помехи и ИИ расценивает их как опухолевые образования [57]. Автоматизированная трёхмерная модель свёрточной нейронной сети с высокой точностью выявляла ПАПЖ по данным КТ вне зависимости от её изоденсивности. Несмотря на то что она обучена с помощью набора данных, включающего изображения КТ с более крупными новообразованиями, модель смогла выявлять ПАПЖ на преддиагностических снимках в среднем

за 475 дней (15–16 мес.) до постановки диагноза [54]. Она также продемонстрировала высокую эффективность в группах высокого риска, включающих пациентов с сахарным диабетом, что может увеличить долю резектабельных ПАПЖ в 3 раза по сравнению с текущими показателями [58]. Выявлено, что эффективность её использования не зависела от таких параметров как демографическая характеристика пациентов, технические характеристики сканера и используемые протоколы визуализации [54].

К. Cao и соавт. [59] разработали модель ГО под названием PANDA (Pancreatic Cancer Detection With Artificial Intelligence), для высокоточной диагностики различных поражений поджелудочной железы с помощью КТ. Данная модель не только определяет наличие поражения, но и способна сегментировать, а также классифицировать в соответствии с его подтипом. Её обучение проведено с использованием набора данных одного центра, включающего результаты КТ 3208 пациентов, а проверка — на данных многоцентровой когорты из 6239 пациентов, собранной из 10 различных медицинских учреждений. Модель PANDA в отношении выявления поражений поджелудочной железы продемонстрировала превосходные результаты, достигнув значение AUC в диапазоне 0,986–0,996. В данном исследовании также приняли участие 33 врача-радиолога с разным опытом работы — от ординаторов до специалистов в области визуализации поджелудочной железы. Они интерпретировали данные КТ без контрастирования 291 пациента. В сравнении с их результатами модель PANDA продемонстрировала превосходство в диагностике ПАПЖ с чувствительностью и специфичностью выше на 34,1 и 6,3% соответственно. Помимо этого, 15 специалистов в области визуализации поджелудочной железы интерпретировали результаты КТ с контрастным усилением тех же пациентов. Даже при использовании только бесконтрастных снимков, модель PANDA превзошла их по чувствительности и специфичности на 13,0 и 0,5% соответственно. При внешней валидации с помощью наборов данных из Китая, Тайваня и Чехии модель PANDA сохраняла высокие значения AUC. Кроме того, результаты субанализа в отношении ПАПЖ малого размера (<2 см) продемонстрировали высокую чувствительность — 92,2%. Исследователи также протестировали модель на наборе данных, включающем результаты КТ 20 530 пациентов, где особенно высок риск снижения эффективности, обусловленный большим количеством малозаметных изменений. И в этом случае модель PANDA показала устойчиво высокие результаты в отношении выявления ранних стадий ПАПЖ: чувствительность и специфичность — более 96 и 99,9% соответственно. Авторы предположили, что данная модель может стать перспективным инструментом для широкомасштабного скрининга ПАПЖ, используя обширные базы данных, включающие результаты неконтрастной КТ, которые регулярно получают по различным клиническим показаниям [59].

Другие исследователи использовали методы ГО с целью выявления других видов новообразований поджелудочной железы. В частности, H.J. Park и соавт. [60] разработали трёхмерную модель ГО, позволяющую идентифицировать семь различных типов солидных и кистозных новообразований поджелудочной железы, включая ПАПЖ, нейроэндокринную опухоль и внутрипротоковую папиллярную муцинозную опухоль. Она обучена с использованием данных КТ пациентов, перенёсших резекцию поджелудочной железы, и пациентов без её аномалии. Производительность модели сравнивали с результатами двух опытных врачей-радиологов. В первом тестовом наборе модель ГО достигла значения AUC 0,91, что сопоставимо с показателями, отражающими эффективность врачей-радиологов, (AUC — 0,92–0,95). Во втором тестовом наборе эффективность модели была ниже по сравнению с врачами-радиологами (AUC — 0,87 против 0,95–0,96, $p < 0,001$), однако данный подход всё ещё представляет собой значительный шаг вперёд в отношении автоматического обнаружения опухолей поджелудочной железы размером до 1 см.

P.T. Chen и соавт. [11] разработали модель с помощью ГО для выявления ПАПЖ по данным КТ с контрастным усилением в портально-венозную фазу, которая обладала следующими показателями эффективности: чувствительность и специфичность — 89,9 и 95,9% соответственно, а также значение AUC — 0,96. В рамках проведённого исследования не выявлено значительной разницы между чувствительностью модели ГО и заключением радиолога — 90,2 и 96,1% соответственно, $p=0,11$. Её эффективность сохранена при использовании внешнего валидационного набора данных, включающего 1473 изображения КТ (669 пациентов с ПАПЖ, 804 — контрольная группа) учреждений Тайваня: чувствительностью и специфичностью — 89,7 и 92,8% соответственно и значение AUC — 0,95. В случае опухолей размером менее 2 см, которые могут быть пропущены в клинической практике, модель ГО обладала приемлемой чувствительностью — 74,7%.

ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОТОВОЙ АДЕНОКАРЦИНОМЫ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Результаты исследований, рассмотренных в нашем обзоре, демонстрируют значительный прогресс в области ранней диагностики ПАПЖ с использованием технологий ИИ. Тем не менее их внедрение в клиническую практику требует тщательную проспективную и многоцентровую валидацию. Процесс оценки должен охватывать различные группы пациентов и медицинские учреждения, с целью обеспечения надёжности технологий. Исследования в области визуализации поджелудочной железы

с интеграцией ИИ сталкиваются с рядом проблем. Основной из них является нехватка больших наборов данных с открытым исходным кодом (>10 тыс. пациентов), которые необходимы для эффективного обучения и проверки моделей на основе технологий ИИ. Большинство разработанных систем не имеют открытого исходного кода и не обладают прозрачностью в отношении процессов обучения, используемых наборов данных и параметров модели, что ставит под угрозу воспроизводимость описанных результатов, заставляя многие учреждения разрабатывать собственные модели с использованием небольших наборов данных, которые зачастую не могут показать схожую эффективность. В свою очередь, наличие больших наборов данных с открытым исходным кодом позволило бы сравнить существующие модели, способствуя объективной оценке их эффективности и возможности модернизации исходных параметров. Другой проблемой является вариативность качества существующих баз данных с открытым исходным кодом для визуализации поджелудочной железы, что снижает их ценность в контексте создания надёжных и эффективных моделей на основе технологий ИИ. Кроме того, ограничения, связанные с политикой возмещения расходов, интеграцией ИИ в клинические рабочие процессы, а также необходимостью всестороннего обучения и подготовки конечных пользователей, включая врачей-радиологов и других специалистов, являются значительными препятствиями для широкого внедрения технологий ИИ в контексте визуализации поджелудочной железы.

Несмотря на то что в некоторые модели ГО интегрированы карты распределения зон, позволяющие выделить на изображениях КТ важные области, влияющие на принятие решений, они предлагают субъективную интерпретацию и не раскрывают в явном виде обоснование проделанной работы. Перспективным направлением является использование интерпретируемых систем ИИ, которые классифицируют важные визуальные признаки в текстовые объяснения. Другой подход к улучшению состоит в предоставлении моделям ИИ возможности количественной оценки и вывода диагностической неопределённости. Такие методы, как байесовские нейронные сети, Монте-Карло и глубокие ансамбли, оценивают степень достоверности результатов ИИ при составлении прогнозов. Точная количественная оценка может способствовать более эффективной интерпретации прогнозов ИИ, сосредоточившись на неоднозначных случаях, в которых модель не уверена, возможно из-за нетипичных проявлений или некачественных изображений. Большинство современных подходов зависят исключительно от данных КТ и не учитывают другие информативные клинические переменные, такие как пол, возраст, анамнез заболевания и индекс массы тела. Кроме того, интеграция моделей ИИ с новыми биомаркерами представляет перспективную область, способную повысить точность и эффективность раннего выявления ПАПЖ. Будущие исследования

должны быть направлены на разработку моделей ГО, которые могли бы оценить эти переменные и более точно диагностировать данную патологию.

РИСКИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В МЕДИЦИНСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Применение ИИ в диагностике заболеваний, включая РПЖ, открывает новые возможности для раннего выявления патологии и оптимизации процессов визуализации. Однако несмотря на значительные достижения в области ГО и компьютерного зрения, внедрение технологий ИИ в клиническую практику сопряжено с рядом вызовов. Основные риски и ограничения связаны с точностью диагностики, качеством обучающих данных, интерпретируемостью моделей, а также этическими и юридическими аспектами использования технологии [11].

Точность и надёжность диагностики

Одной из ключевых проблем использования ИИ в медицинской визуализации является риск ложноположительных и ложноотрицательных результатов [7]. Модели могут ошибочно классифицировать доброкачественные образования как злокачественные или, наоборот, не выявить опухоль на ранних стадиях, что может привести к задержке лечения. Ложноположительные результаты, в свою очередь, могут стать причиной избыточной диагностики и ненужных инвазивных процедур, что повышает нагрузку на пациентов и систему здравоохранения [44].

Ещё одним важным ограничением является зависимость работы ИИ от качества данных. Для обучения алгоритмов используют медицинские изображения, однако различия в технических характеристиках оборудования, параметрах сканирования и стандартах визуализации в разных клиниках могут снижать точность диагностики [50].

Ограничения в обучении и применении моделей искусственного интеллекта

Для корректной работы моделей ИИ необходимо обучение на больших объёмах данных, но в медицинской сфере доступ к таким данным ограничен [59]. В большинстве случаев наборы данных для обучения имеют несбалансированный характер, а именно: в них может преобладать количество изображений, полученных на поздних стадиях ПАПЖ, тогда как случаи ранней её стадии встречаются реже [12, 59]. Это приводит к тому, что модели менее точно распознают именно те опухоли, которые особенно важно выявлять на ранних этапах.

Кроме того, медицинские изображения, используемые в обучении моделей, отличаются по качеству и формату, поскольку зависят от типа оборудования и параметров настройки томографов [54]. Это создаёт проблемы

при переносе обученной модели в реальную клиническую практику: модель, эффективно работающая на данных одной больницы, может показывать снижение точности при анализе изображений, полученных из другой клиники.

Ещё одной проблемой является так называемая проблема «чёрного ящика». Большинство моделей ГО принимают решения без возможности объяснения причин, по которым они пришли к тому или иному выводу. Это затрудняет их использование в клинической практике, так как врачи не могут проверить, на каких признаках основано заключение ИИ. Для медицинского применения особенно важно, чтобы решения моделей были интерпретируемыми и понятными для специалистов [12].

Этические и юридические вопросы

Юридическая ответственность за ошибки, допущенные моделями ИИ, остаётся нерешённой проблемой [50]. В случае ошибочного диагноза ответственность может ложиться на врача, разработчиков моделей или медицинское учреждение, что затрудняет массовое внедрение технологии.

Другим важным аспектом является защита персональных данных. Использование ИИ требует обработки больших объёмов медицинской информации, включая снимки КТ и МРТ, электронные медицинские карты и генетические данные. При этом существует риск утечки конфиденциальной информации, что требует строгого соблюдения норм защиты данных, таких как «Общий регламент по защите данных» (General Data Protection Regulation, GDPR) в Европе и «Закона о переносимости и подотчётности медицинского страхования» (Health Insurance Portability and Accountability Act, HIPAA) в США [33].

Также стоит учитывать возможность появления предвзятости (Bias) в системах ИИ. Если в процессе обучения модель использовала данные, содержащие гендерные, расовые или социальные искажения, то это может привести к снижению точности диагностики у отдельных групп пациентов. Например, модель, обученная преимущественно на данных пациентов европейского происхождения, может показывать меньшую эффективность при диагностике ПАПЖ у пациентов азиатского или африканского происхождения [13, 44].

Ограничения внедрения технологий искусственного интеллекта в клиническую практику

Несмотря на перспективность применения ИИ, его интеграция в медицинские рабочие процессы встречает сопротивление со стороны врачей. Многие специалисты выражают скептицизм по поводу точности моделей и их способности заменять экспертную оценку. Для успешного внедрения технологии необходимо обучение медицинского персонала и демонстрация реальной клинической пользы ИИ [12, 13].

Ещё одним ограничением является несовместимость многих существующих больничных систем с новыми моделями ИИ и использование различных протоколов получения изображений [12]. Их внедрение требует адаптации информационных систем, что требует значительных финансовых и организационных затрат. Кроме того, пока не разработаны унифицированные протоколы интеграции ИИ в диагностический процесс, что затрудняет его использование в повседневной практике [13].

Дополнительные затраты также связаны с разработкой и валидацией моделей. Медицинские учреждения и стартапы, занимающиеся их разработкой, сталкиваются с высокими затратами на получение клинически валидных данных, проведение тестирований и сертификацию моделей. Это ограничивает доступность технологии и препятствует её внедрению в менее обеспеченные клиники.

Применение технологий ИИ в медицинской визуализации открывает широкие перспективы, однако их интеграция в клиническую практику сопряжена с рядом серьёзных вызовов. Необходимо учитывать риски ложных диагнозов, зависимость от качества данных, проблемы интерпретируемости решений, а также этические и юридические аспекты. Для успешного внедрения технологии требуется стандартизация подходов к обучению и тестированию моделей ИИ, развитие методов объяснимого ИИ, обеспечение конфиденциальности данных и адаптация регуляторных норм [12, 13].

Только при комплексном подходе, включающем высокое качество данных, интерпретируемые модели и безопасную инфраструктуру, ИИ сможет занять достойное место в системе медицинской диагностики и значительно повысить эффективность раннего выявления ПАПЖ [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В области раннего выявления ПАПЖ с помощью технологий ИИ наблюдают значительный прогресс. Современные подходы включают в себя стратификацию риска до визуализации и увеличение объёма анализируемых данных с помощью оценки электронных медицинских карт. Они зачастую основаны на применении методов ГО. Несмотря на значительные успехи, внедрение технологий ИИ в клиническую практику всё ещё сопряжено с различными проблемами. Одновременно с этим появились новые РФЛП, технологии визуализации и биомаркёры, однако их роль в ранней диагностике РПЖ требует дальнейшего изучения в рамках клинических исследований. Кроме того, существенный прогресс в ранней диагностике РПЖ, особенно с применением технологий ИИ, невозможен без проведения исследований на основе высококачественных и репрезентативных данных. В свою очередь, совместное использование моделей ИИ и биомаркёров, представляет перспективное направление для дальнейших исследований, способное улучшить тераностику² различных ЗНО, включая ПАПЖ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Ф.Т. Мусаева, З.М. Кумыкова, А.И. Ушаева, А.С. Хасиева — сбор и анализ литературных данных, написание и редактирование текста рукописи; Е.Р. Суменова, Я.Ю. Кулинская, Р.Р. Якупова, А.А. Мустафин — сбор и анализ литературных данных, подготовка и написание текста рукописи; А.Х. Исламагулов — подготовка и редактирование текста рукописи; Т.С. Элипханова — анализ литературных данных, написание отдельных разделов рукописи; Е.С. Озерова — участие в интерпретации данных и подготовке заключительной части статьи; Д.А. Хаснутдинова — редактирование текста рукописи; А.А. Набиуллина — разработка концепции работы, координация работы авторов. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена в соответствии с процедурой fast-track. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: F.T. Musaeva, Z.M.Kumykova, A.I. Ushaeva, A.S. Khasieva: published data search and analysis, writing—original draft, writing—review & editing; E.R. Sumenova, Ya.Yu. Kulinskaya, R.R. Yakupova, A.A. Mustafin: published data search and analysis, writing—original draft; A.Kh. Islamagulov: writing—review & editing; T.S. Elipkhanova: published data analysis, writing—original draft (certain manuscript sections); E.S. Ozerova: formal analysis, preparation of the final section of the article; D.A. Khusnutdinova: writing—review & editing; A.A. Nabiullina: conceptualization, supervision. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the fast-track procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house science editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Mizrahi JD, Surana R, Valle JW, Shroff RT. Pancreatic cancer. *The Lancet*. 2020;395(10242):2008–2020. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30974-0 EDN: WVRHTG
2. Siegel RL, Miller KD, Wagle NS, Jemal A. Cancer statistics, 2023. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2023;73(1):17–48. doi: 10.3322/caac.21763 EDN: SUTYDV
3. Nakaoka K, Ohno E, Kawabe N, et al. Current status of the diagnosis of early-stage pancreatic ductal adenocarcinoma. *Diagnostics*. 2023;13(2):215. doi: 10.3390/diagnostics13020215 EDN: LBLCMY
4. Kolbeinsson HM, Chandana S, Wright GP, Chung M. Pancreatic cancer: a review of current treatment and novel therapies. *Journal of Investigative Surgery*. 2022;36(1):2129884. doi: 10.1080/08941939.2022.2129884 EDN: PSHZLV
5. Zhao ZY, Liu W. Pancreatic cancer: a review of risk factors, diagnosis, and treatment. *Technology in Cancer Research & Treatment*. 2020;19. doi: 10.1177/1533033820962117 EDN: QJRZSL
6. Sidorov DV, Egorov VI, Moshurov RI, et al. A case of 10-year survival after modified appleby surgery for locally advanced pancreatic ductal adenocarcinoma. *P.A. Herzen Journal of Oncology*. 2021;10(5):39–43. doi: 10.17116/onkolog20211005139 EDN: PDPRKV
7. US Preventive Services Task Force. Screening for pancreatic cancer. *JAMA*. 2019;322(5):438–444. doi: 10.1001/jama.2019.10232
8. Goggins M, Overbeek KA, Brand R, et al. Management of patients with increased risk for familial pancreatic cancer: updated recommendations from the International Cancer of the Pancreas Screening (CAPS) Consortium. *Gut*. 2019;69(1):7–17. doi: 10.1136/gutjnl-2019-319352 EDN: EENUQI
9. Chari ST, Maitra A, Matrisian LM, et al. Early detection initiative: a randomized controlled trial of algorithm-based screening in patients with new onset hyperglycemia and diabetes for early detection of pancreatic ductal adenocarcinoma. *Contemporary Clinical Trials*. 2022;113:106659. doi: 10.1016/j.cct.2021.106659 EDN: XDWSVA
10. Kang JD, Clarke SE, Costa AF. Factors associated with missed and misinterpreted cases of pancreatic ductal adenocarcinoma. *European Radiology*. 2020;31(4):2422–2432. doi: 10.1007/s00330-020-07307-5 EDN: MRFRKF
11. Chen PT, Wu T, Wang P, et al. Pancreatic cancer detection on CT scans with deep learning: a nationwide population-based study. *Radiology*. 2023;306(1):172–182. doi: 10.1148/radiol.220152 EDN: YRPYHK
12. Islamgulov AKh, Bogdanova AS, Sufiiarov DI, et al. Modern capabilities of artificial intelligence technologies in cardiovascular imaging. *Digital Diagnostics*. 2025;6(1):56–67. doi: 10.17816/DD640895 EDN: CFTXVK
13. Podină N, Gheorghe EC, Constantin A, et al. Artificial Intelligence in Pancreatic Imaging: A Systematic Review. *United European Gastroenterol J*. 2025;13(1):55–77. doi: 10.1002/ueg2.12723
14. Chernyak V, Fowler KJ, Kamaya A, et al. Liver imaging reporting and data system (LI-RADS) version 2018: imaging of hepatocellular carcinoma in at-risk patients. *Radiology*. 2018;289(3):816–830. doi: 10.1148/radiol.2018181494
15. Nagayama Y, Tanoue S, Inoue T, et al. Dual-layer spectral CT improves image quality of multiphasic pancreas CT in patients with pancreatic ductal adenocarcinoma. *European Radiology*. 2019;30(1):394–403. doi: 10.1007/s00330-019-06337-y EDN: DJBYZU
16. Decker JA, Becker J, Härting M, et al. Optimal conspicuity of pancreatic ductal adenocarcinoma in virtual monochromatic imaging reconstructions on a photon-counting detector CT: comparison to conventional MDCT. *Abdominal Radiology*. 2023;49(1):103–116. doi: 10.1007/s00261-023-04042-5 EDN: XAXRAR
17. Dane B, Froemming A, Schwartz FR, et al. Photon counting CT clinical adoption, integration, and workflow. *Abdominal Radiology*. 2024;49(12):4600–4609. doi: 10.1007/s00261-024-04503-5 EDN: CXSKER
18. Gavas S, Quazi S, Karpiński TM. Nanoparticles for cancer therapy: current progress and challenges. *Nanoscale Research Letters*. 2021;16(1):173. doi: 10.1186/s11671-021-03628-6 EDN: LMPZGQ
19. Alhussan A, Jackson N, Chow N, et al. In Vitro and in vivo synergetic radiotherapy with gold nanoparticles and docetaxel for pancreatic cancer. *Pharmaceutics*. 2024;16(6):713. doi: 10.3390/pharmaceutics16060713 EDN: SQWTVV
20. Gu X, Minko T. Targeted nanoparticle-based diagnostic and treatment options for pancreatic cancer. *Cancers*. 2024;16(8):1589. doi: 10.3390/cancers16081589 EDN: HPGYGP
21. Zhao T, Zhang R, He Q, et al. Partial ligand shielding nanoparticles improve pancreatic ductal adenocarcinoma treatment via a multifunctional paradigm for tumor stroma reprogramming. *Acta Biomaterialia*. 2022;145:122–134. doi: 10.1016/j.actbio.2022.03.050 EDN: IQTTLE
22. Tempero MA, Malafa MP, Al-Hawary M, et al. Pancreatic adenocarcinoma, version 2.2021, NCCN clinical practice guidelines in oncology. *Journal of the National Comprehensive Cancer Network*. 2021;19(4):439–457. doi: 10.6004/jnccn.2021.0017 EDN: IQZRDE
23. Lunina NA, Safina DR. Intercellular interactions in the tumor stroma and their role in oncogenesis. *Molecular Genetics Microbiology and Virology*. 2022;40(4):3–8. doi: 10.17116/molgen2022400413 EDN: VAJWCW
24. Kratochwil C, Flechsig P, Lindner T, et al. ⁶⁸Ga-FAPIPET/CT: tracer uptake in 28 different kindsof cancer. *Journal of Nuclear Medicine*. 2019;60(6):801–805. doi: 10.2967/jnumed.119.227967
25. Deng M, Chen Y, Cai L. Comparison of ⁶⁸Ga-FAPI and ¹⁸F-FDG PET/CT in the imaging of pancreatic cancer with liver metastases. *Clinical Nuclear Medicine*. 2021;46(7):589–591. doi: 10.1097/rlu.0000000000003561 EDN: ESHJOJ
26. Cheng Z, Zou S, Cheng S, et al. Comparison of ¹⁸F-FDG, ⁶⁸Ga-FAPI, and ⁶⁸Ga-DOTATATE PET/CT in a patient with pancreatic neuroendocrine tumor. *Clinical Nuclear Medicine*. 2021;46(9):764–765. doi: 10.1097/rlu.0000000000003763 EDN: SNHVLD
27. Röhrich M, Naumann P, Giesel FL, et al. Impact of ⁶⁸Ga-FAPI PET/CT imaging on the therapeutic management of primary and recurrent pancreatic ductal adenocarcinomas. *Journal of Nuclear Medicine*. 2020;62(6):779–786. doi: 10.2967/jnumed.120.253062 EDN: FFGVMH
28. Luo Y, Pan Q, Zhang W, Li F. Intense FAPI uptake in inflammation may mask the tumor activity of pancreatic cancer in ⁶⁸Ga-FAPI PET/CT. *Clinical Nuclear Medicine*. 2020;45(4):310–311. doi: 10.1097/rlu.0000000000002914 EDN: JJZLIA
29. Zhang H, An J, Wu P, et al. The Application of [⁶⁸Ga]-Labeled FAPI-04 PET/CT for targeting and early detection of pancreatic carcinoma in patient-derived orthotopic xenograft models. *Contrast Media & Molecular Imaging*. 2022;2022(1):6596702. doi: 10.1155/2022/6596702 EDN: OXIAOQ
30. Pang Y, Zhao L, Shang Q, et al. Positron emission tomography and computed tomography with [⁶⁸Ga]Ga-fibroblast activation protein inhibitors improves tumor detection and staging in patients with pancreatic cancer. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2021;49(4):1322–1337. doi: 10.1007/s00259-021-05576-w EDN: VQMLNS
31. Lang M, Spektor AM, Hielscher T, et al. Static and dynamic ⁶⁸Ga-FAPI PET/CT for the detection of malignant transformation of intraductal papillary mucinous neoplasia of the pancreas. *Journal of Nuclear Medicine*. 2022;64(2):244–251. doi: 10.2967/jnumed.122.264361 EDN: TIHZZY
32. Quigley NG, Steiger K, Hoberück S, et al. PET/CT imaging of head-and-neck and pancreatic cancer in humans by targeting the “Cancer Integrin” αvβ6 with Ga-68-Trivehexin. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2021;49(4):1136–1147. doi: 10.1007/s00259-021-05559-x EDN: CXNHPW
33. Das SS, Ahlawat S, Thakral P, et al. Potential efficacy of ⁶⁸Ga-Trivehexin PET/CT and immunohistochemical validation of αvβ6 integrin expression in patients with head and neck squamous cell carcinoma and pancreatic ductal adenocarcinoma. *Clinical Nuclear Medicine*. 2024;49(8):733–740. doi: 10.1097/RLU.0000000000005278 EDN: GRBMEP
34. Matsumoto H, Igarashi C, Tachibana T, et al. Preclinical safety evaluation of intraperitoneally administered cu-conjugated anti-EGFR antibody NCAB001 for the early diagnosis of pancreatic cancer using PET. *Pharmaceutics*. 2022;14(9):1928. doi: 10.3390/pharmaceutics14091928 EDN: BPRKGA
35. Gao S, Qin J, Sergeeva O, et al. Synthesis and assessment of ZD2-(⁶⁸Ga-NOTA) specific to extradomain B fibronectin in tumor

microenvironment for PET imaging of pancreatic cancer. *Am J Nucl Med Mol Imaging*. 2019;9(5):216–229.

36. Jugniot N, Bam R, Meulilet EJ, et al. Current status of targeted microbubbles in diagnostic molecular imaging of pancreatic cancer. *Bioengineering & Translational Medicine*. 2021;6(1):e10183. doi: 10.1002/btm2.10183 EDN: UKSUKJ

37. Pysz MA, Machtaler SB, Seeley ES, et al. Vascular endothelial growth factor receptor type 2-targeted contrast-enhanced US of pancreatic cancer neovasculature in a genetically engineered mouse model: potential for earlier detection. *Radiology*. 2015;274(3):790–799. doi: 10.1148/radiol.14140568

38. Bam R, Daryaei I, Abou-Elkacem L, et al. Toward the Clinical Development and Validation of a Thy1-Targeted Ultrasound Contrast Agent for the Early Detection of Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *Invest Radiol*. 2020;55(11):711–721. doi:10.1097/RLI.0000000000000697

39. Liu YH, Hu CM, Hsu YS, Lee WH. Interplays of glucose metabolism and KRAS mutation in pancreatic ductal adenocarcinoma. *Cell Death & Disease*. 2022;13(9):1–10. doi: 10.1038/s41419-022-05259-w EDN: IRRGZI

40. Dutta P, Castro Pando S, Mascaro M, et al. Early Detection of pancreatic intraepithelial neoplasias (PanINs) in transgenic mouse model by hyperpolarized ¹³C metabolic magnetic resonance spectroscopy. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(10):3722. doi: 10.3390/ijms21103722 EDN: YBBKHW

41. Ardenkjaer-Larsen JH, Fridlund B, Gram A, et al. Increase in signal-to-noise ratio of > 10,000 times in liquid-state NMR. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2003;100(18):10158–10163. doi: 10.1073/pnas.1733835100

42. Serrao EM, Kettunen MI, Rodrigues TB, et al. MRI with hyperpolarised [¹³C]pyruvate detects advanced pancreatic preneoplasia prior to invasive disease in a mouse model. *Gut*. 2015;65(3):465–475. doi: 10.1136/gutjnl-2015-310114

43. Gordon JW, Chen HY, Nickles T, et al. Hyperpolarized ¹³C metabolic MRI of patients with pancreatic ductal adenocarcinoma. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2023;60(2):741–749. doi: 10.1002/jmri.29162

44. Placido D, Yuan B, Hjaltelin JX, et al. A deep learning algorithm to predict risk of pancreatic cancer from disease trajectories. *Nature Medicine*. 2023;29(5):1113–1122. doi: 10.1038/s41591-023-02332-5 EDN: XZZVPJ

45. Placido D, Yuan B, Hjaltelin JX, et al. Pancreatic cancer risk predicted from disease trajectories using deep learning. *bioRxiv*. 2023. doi: 10.1101/2021.06.27.449937

46. Costache MI, Costache CA, Dumitrescu CI, et al. Which is the best imaging method in pancreatic adenocarcinoma diagnosis and staging — CT, MRI or EUS? *Curr Health Sci J*. 2017;43(2):132–136. doi: 10.12865/CHSJ.43.02.05

47. Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. In: Nava N, Hornegger J, Wells W, Frangi A, editors. *Medical image computing and computer-assisted intervention – MICCAI 2015. Proceedings of 18th International Conference*. Munich, 2015 Oct 5–9. Cham: Springer, 2015. P. 234–241. doi: 10.1007/978-3-319-24574-4_28

48. Ma J, He Y, Li F, et al. Segment anything in medical images. *Nature Communications*. 2024;15(1):654. doi: 10.1038/s41467-024-44824-z EDN: HKOTWW

ОБ АВТОРАХ

* **Исламгулов Алмаз Ханифович;**

адрес: Россия, 450008, Уфа, ул. Ленина, д. 3;

ORCID: 0000-0003-0567-7515;

eLibrary SPIN: 8701-3486;

e-mail: aslmaz2000@rambler.ru

Мусаева Фериди Тофик кызы;

ORCID: 0009-0000-1407-7189;

e-mail: feridamusaeva@yandex.ru

Суменова Елизавета Руслановна;

ORCID: 0009-0001-8159-0860;

e-mail: lsumenova@bk.ru

49. Saakov DV. Improving machine learning algorithm performance with imbalanced data. *Construction Economy*. 2023;4(4):73–77. EDN: PSSFBH

50. Mukherjee S, Patra A, Khasawneh H, et al. Radiomics-based machine-learning models can detect pancreatic cancer on prediagnostic computed tomography scans at a substantial lead time before clinical diagnosis. *Gastroenterology*. 2022;163(5):1435–1446.e3. doi: 10.1053/j.gastro.2022.06.066 EDN: CZMBYK

51. Panda A, Korfiatis P, Suman G, et al. Two-stage deep learning model for fully automated pancreas segmentation on computed tomography: comparison with intra-reader and inter-reader reliability at full and reduced radiation dose on an external dataset. *Medical Physics*. 2021;48(5):2468–2481. doi: 10.1002/mp.14782 EDN: VCSPA H

52. Suman G, Patra A, Korfiatis P, et al. Quality gaps in public pancreas imaging datasets: Implications & challenges for AI applications. *Pancreatolgy*. 2021;21(5):1001–1008. doi: 10.1016/j.pan.2021.03.016 EDN: AOWKU Z

53. Mukherjee S, Korfiatis P, Patnam NG, et al. Assessing the robustness of a machine-learning model for early detection of pancreatic adenocarcinoma (PDA): evaluating resilience to variations in image acquisition and radiomics workflow using image perturbation methods. *Abdominal Radiology*. 2024;49(3):964–974. doi: 10.1007/s00261-023-04127-1 EDN: WDNPKU

54. Korfiatis P, Suman G, Patnam NG, et al. Automated artificial intelligence model trained on a large data set can detect pancreas cancer on diagnostic computed tomography scans as well as visually occult preinvasive cancer on prediagnostic computed tomography scans. *Gastroenterology*. 2023;165(6):1533–1546.e4. doi: 10.1053/j.gastro.2023.08.034 EDN: MTJOWL

55. Mukherjee S, Korfiatis P, Khasawneh H, et al. Bounding box-based 3D AI model for user-guided volumetric segmentation of pancreatic ductal adenocarcinoma on standard-of-care CTs. *Pancreatolgy*. 2023;23(5):522–529. doi: 10.1016/j.pan.2023.05.008 EDN: KZAOWI

56. Khasawneh H, Patra A, Rajamohan N, et al. Volumetric pancreas segmentation on computed tomography: accuracy and efficiency of a convolutional neural network versus manual segmentation in 3D Slicer in the context of interreader variability of expert radiologists. *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2022;46(6):841–847. doi: 10.1097/rct.0000000000001374 EDN: FUBRLQ

57. Suman G, Patra A, Mukherjee S, et al. Radiomics for detection of pancreas adenocarcinoma on CT scans: impact of biliary stents. *Radiology: Imaging Cancer*. 2022;4(1):e210081. doi: 10.1148/rycan.210081 EDN: RTESHA

58. Singh DP, Sheedy S, Goenka AH, et al. Computerized tomography scan in pre-diagnostic pancreatic ductal adenocarcinoma: stages of progression and potential benefits of early intervention: A retrospective study. *Pancreatolgy*. 2020;20(7):1495–1501. doi: 10.1016/j.pan.2020.07.410 EDN: AADXOD

59. Cao K, Xia Y, Yao J, et al. Large-scale pancreatic cancer detection via non-contrast CT and deep learning. *Nature Medicine*. 2023;29(12):3033–3043. doi: 10.1038/s41591-023-02640-w EDN: QPNNNU

60. Park HJ, Shin K, You MW, et al. Deep learning-based detection of solid and cystic pancreatic neoplasms at contrast-enhanced CT. *Radiology*. 2023;306(1):140–149. doi: 10.1148/radiol.220171 EDN: PIFJTB

AUTHORS' INFO

* **Almaz Kh. Islamgulov, MD;**

address: 3 Lenin st, Ufa, Russia, 450008;

ORCID: 0000-0003-0567-7515;

eLibrary SPIN: 8701-3486;

e-mail: aslmaz2000@rambler.ru

Ferida T. Musaeva;

ORCID: 0009-0000-1407-7189;

e-mail: feridamusaeva@yandex.ru

Elizaveta R. Sumenova;

ORCID: 0009-0001-8159-0860;

e-mail: lsumenova@bk.ru

Кумыкова Залина Мухамедовна;

ORCID: 0009-0007-5243-6796;

e-mail: kumykova_2001@mail.ru

Элипханова Тамила Салмановна;

ORCID: 0009-0006-2901-5443;

e-mail: eltamila01@mail.ru

Ушаева Алина Исаевна;

ORCID: 0009-0007-3888-5683;

e-mail: ushaeva21@list.ru

Хасиева Амина Сулумбековна;

ORCID: 0009-0002-8153-4647;

e-mail: khasievaamina999@gmail.com

Озерова Екатерина Сергеевна;

ORCID: 0009-0004-8740-1313;

e-mail: ozerovaekaterina201@gmail.com

Хуснутдинова Дина Айдаровна;

ORCID: 0009-0002-0562-8414;

e-mail: dinakhusnutdinova02848@gmail.com

Набиуллина Алина Айратовна;

ORCID: 0009-0004-4365-444X;

e-mail: a.ayratovnaa@gmail.com

Кулинская Яна Юрьевна;

ORCID: 0009-0000-7187-0044;

e-mail: Yana.Kulinskaya00@mail.ru

Якупова Роксана Руслановна;

ORCID: 0000-0001-5869-607X;

e-mail: roksana.yakupova.01@mail.ru

Мустафин Артур Азатович;

ORCID: 0009-0006-4747-6972;

e-mail: zacartim@mail.com

Zalina M. Kumykova;

ORCID: 0009-0007-5243-6796;

e-mail: kumykova_2001@mail.ru

Tamila S. Elipkhanova;

ORCID: 0009-0006-2901-5443;

e-mail: eltamila01@mail.ru

Alina I. Ushaeva;

ORCID: 0009-0007-3888-5683;

e-mail: ushaeva21@list.ru

Amina S. Khasieva;

ORCID: 0009-0002-8153-4647;

e-mail: khasievaamina999@gmail.com

Ekaterina S. Ozerova;

ORCID: 0009-0004-8740-1313;

e-mail: ozerovaekaterina201@gmail.com

Dina A. Khusnutdinova;

ORCID: 0009-0002-0562-8414;

e-mail: dinakhusnutdinova02848@gmail.com

Alina A. Nabiullina;

ORCID: 0009-0004-4365-444X;

e-mail: a.ayratovnaa@gmail.com

Yana Yu. Kulinskaya;

ORCID: 0009-0000-7187-0044;

e-mail: Yana.Kulinskaya00@mail.ru

Roksana R. Yakupova;

ORCID: 0000-0001-5869-607X;

e-mail: roksana.yakupova.01@mail.ru

Arthur A. Mustafin;

ORCID: 0009-0006-4747-6972;

e-mail: zacartim@mail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author