

На правах рукописи

Арутюнова Ксения Андреевна

**ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ
ГИПОВАСКУЛЯРНЫХ И ГИПЕРВАСКУЛЯРНЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ
ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ НА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТОМОГРАММАХ**

3.1.25. Лучевая диагностика (медицинские науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Москва – 2026 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А.В. Вишневского» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Научный руководитель:

Кармазановский Григорий Григорьевич – доктор медицинских наук, профессор, академик РАН

Официальные оппоненты:

Камышанская Ирина Григорьевна – доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры лучевой диагностики медицинского института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского университета» (СПбГУ)

Медведева Бэла Михайловна – доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, врач-рентгенолог отделения рентгенодиагностики отдела лучевых методов диагностики опухолей консультативно-диагностического центра федерального государственного бюджетного учреждения Министерства здравоохранения Российской Федерации Национального медицинского исследовательского центра онкологии имени Н.Н. Блохина

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации».

Защита диссертации состоится «___» _____ 2026 г. на заседании диссертационного совета 21.1.044.02 на базе ФГБУ «НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского» Минздрава России (117997, г. Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского» Минздрава России (117997, г. Москва, ул. Большая Серпуховская, д. 27) и на сайте www.vishnevskogo.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета
кандидат медицинских наук

Кондратьев Евгений Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Образования поджелудочной железы (ПЖ) обладают разным гистологическим строением, степенями злокачественности и особенностями контрастирования на компьютерной томографии (КТ).

По паттернам контрастирования опухоли ПЖ разделяют на 2 группы: гиповаскулярные и гипervasкулярные. Но, конечно, есть образования, контрастирование которых не соответствует привычным параметрам, и они изоденсны относительно нормальной паренхимы железы.

К наиболее часто встречающемуся гиповаскулярному образованию ПЖ относится протоковая аденокарцинома. Наиболее распространенное гипervasкулярное образование ПЖ – нейроэндокринная опухоль. Оно требует дифференциальной диагностики с интрапанкреатической долькой селезенки, метастазами в ПЖ, солидным вариантом серозной цистаденомы, опухолями близлежащих органов.

Рак ПЖ, один из наиболее частых, имеет неблагоприятный прогноз и обычно приводит к летальному исходу. Больные с этим диагнозом требуют неотложного лечения, в том числе хирургического, если это возможно на данной стадии. Риск рецидива и смертность увеличивается при задержке лечения, что делает раннюю диагностику опухоли ПЖ решающим фактором для успешного хирургического лечения.

В Российской Федерации рак ПЖ является четвертой причиной смертности от всех видов рака. Также удельный вес морфологических верификаций ниже всего именно у рака ПЖ. КТ часто является первым исследованием, по которому впервые выявляют опухоль и затем оценивают его распространенность, но диагностическая эффективность метода зависит от опыта рентгенологов. Кроме того, примерно 40% опухолей размером менее 2 см не поддаются обнаружению с помощью КТ, что подчеркивает острую потребность в новых методах, дополняющих интерпретацию рентгенологом для повышения чувствительности при обнаружении рака ПЖ.

Панкреатические нейроэндокринные опухоли (НЭО) достаточно редки и составляют около 2% от всех неоплазий ПЖ, однако являются потенциально злокачественными. Несмотря на улучшение качества диагностики и развитие

методов лечения, прогноз у пациентов зависит от степени дифференцировки опухоли.

Согласно российским и международным рекомендациям КТ или магнитно-резонансная томография (МРТ) с внутривенным болюсным контрастированием являются обязательными процедурами при подозрении на аденокарциному или НЭО ПЖ и предоперационном обследовании. КТ позволяет определить локализацию опухоли и провести стадирование.

Искусственный интеллект и машинное обучение – быстро развивающиеся отрасли, которые не обошли стороной и здравоохранение. Области их применения расширяются с каждым годом, как и возможности внедрения в повседневный рабочий процесс.

Практическое применение искусственного интеллекта (ИИ) актуально из-за образовавшегося кадрового дефицита и увеличившимся количеством исследований, заболеваний.

Машинное обучение продемонстрировало хорошую работу в выявлении заболеваний, таких как диабетическая ретинопатия, туберкулез, рак молочной желез, нарушения ритма сердца.

Все это дает основание полагать, что для выявления злокачественных поражений ПЖ можно разработать алгоритм машинного обучения, который сможет решить вышеперечисленные проблемы.

Уже с 2018 года стали появляться научные работы, посвященные применению алгоритмов машинного обучения при гипо- и гиперваскулярных образованиях ПЖ, однако результаты являются крайне разнообразными из-за использования различных видов нейросетей и наборов данных для разных целей.

Таким образом, мало изучены возможности алгоритмов машинного обучения в сегментации ПЖ и ее образований, сопоставимость полученных результатов с результатами врачей-рентгенологов, применимость алгоритмов на разных наборах данных. Разработка алгоритмов глубокого машинного обучения является одной из актуальных клинических и научных задач и требует изучения точности в сравнении с врачами-рентгенологами с разным опытом и оценки воспроизводимости полученных результатов в рутинной практике.

Цель исследования

Повышение эффективности выявления образований ПЖ с помощью алгоритмов машинного обучения по данным КТ.

Задачи исследования

1. Разработать алгоритм создания и разметки набора данных компьютерных томограмм для обучения сверточных нейронных сетей с целью выполнения трехмерной сегментации и оценки ткани поджелудочной железы, выявления патологических образований.

2. Провести анализ качества разметки данных КТ исследований поджелудочной железы с гипо- и гиперваскулярными образованиями поджелудочной железы. Выявить факторы, влияющие на качество разметки данных, оценить текстурные характеристики краев поджелудочной железы на КТ-снимках.

3. Определить степень совпадения сегментационных масок поджелудочной железы и патологических образований в ней, размеченных врачом и системой компьютерного зрения.

4. Оценить диагностическую ценность алгоритма искусственного интеллекта в выявлении образований поджелудочной железы.

Научная новизна исследования

Впервые проведена оценка точности врача-рентгенолога и ИИ в сегментации гиперваскулярных и гиповаскулярных образований поджелудочной железы, оценена диагностическая и прогностическая точность и воспроизводимость результатов в условиях НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского. Впервые построен подробный алгоритм сегментации и обучения нейросетей.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные результаты позволят: разработать методологию создания и разметки набора данных компьютерных томограмм для обучения сверточных нейронных сетей с целью выполнения трехмерной сегментации гиперваскулярных и гиповаскулярных образований поджелудочной железы. Результаты диссертационного исследования использованы для разработки модели ИИ и внедрены в практическую работу отделения рентгенологии и магнитно-резонансных методов исследования ФГБУ «НМИЦ хирургии имени А.В. Вишневского», а также опубликованы в центральной печати, представлены на съездах и конференциях.

Методология и методы исследования

На амбулаторном этапе пациентам будет выполняться мультиспиральная компьютерная томография органов брюшной полости с внутривенным

контрастным усилением по модифицированному низкодозовому протоколу (100 kV) и по стандартному протоколу (120 kV). Пациенты с гиперваскулярными и гиповаскулярными образованиями поджелудочной железы при компьютерной томографии органов брюшной полости с внутривенным контрастным усилением и наличием морфологической верификации образования будут включены в исследование.

Часть исследований будет размечаться врачами-рентгенологами для создания входного обучающего массива данных для глубокого машинного обучения. Затем будет сравниваться разметка искусственного интеллекта и врачей-рентгенологов на валидационной выборке, врачей-рентгенологов между собой в зависимости от внешних факторов. Будет оценена воспроизводимость и диагностическая ценность разметчика компьютерных томограмм исследования при применении протокола сканирования (120 Kv и 100 Kv) в диагностике гиперваскулярных и гиповаскулярных образований поджелудочной железы.

Положения, выносимые на защиту

1. Создание алгоритма для обучения нейросети построению сегментационных масок поджелудочной железы и ее образований по компьютерным томограммам органов брюшной полости с контрастированием возможно с достаточно высоким результатом, что может помочь в дальнейшем использовать этот алгоритм обучения в создании продукта для предоперационного планирования лечения пациентов с образованиями поджелудочной железы.

2. Использование алгоритмов машинного обучения может помочь в создании помощника врачу-рентгенологу в диагностике образований поджелудочной железы, а также может обеспечить раннюю диагностику новообразований поджелудочной железы.

3. Обучение нейросети в построении сегментационных масок образований в дальнейшем могут использоваться для классификации и разработки автоматического вычисления текстурных характеристик и дооперационной дифференциальной диагностики образований поджелудочной железы.

Внедрение результатов исследования в практику

Разработан алгоритм для обучения нейросети сегментации поджелудочной железы по КТ органов брюшной полости с внутривенным болюсным контрастированием для дальнейшего внедрения в диагностический процесс в отделе лучевых методов диагностики и лечения ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского» Министерства Здравоохранения России.

Апробация диссертационной работы

Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на отечественных и международных конгрессах: на всероссийском национальном конгрессе лучевых диагностов и терапевтов «Радиология» 2022 г., Москва; на конгрессе Российского общества рентгенологов и радиологов 2021 г., Москва; на всероссийском научно-образовательном конгрессе с международным участием «Онкорadiология, лучевая диагностика и терапия» 2023, 2024 гг., Москва; на всероссийской конференции в честь 300-летия РАН «Организация и цифровизация здравоохранения» 2024 г., Москва.

Апробация работы состоялась в ФГБУ «Национальный Медицинский Исследовательский Центр хирургии им. А. В. Вишневского» Министерства Здравоохранения России на заседании государственной экзаменационной комиссии по представлению научного доклада об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации) 18 июня 2024 г.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в наборе и составлении базы данных пациентов, сегментации поджелудочной железы и выявленных образований поджелудочной железы, аналитической и статистической обработке полученных данных. Автор проанализировал 96 источников отечественной и зарубежной литературы, самостоятельно систематизировал полученный в ходе исследования набор данных.

Публикации по теме диссертации

По результатам диссертационной работы было опубликовано 5 печатных работ в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 106 страницах машинописного текста, состоит из введения, 3 глав, выводов, практических рекомендаций, приложений, списка литературы, который включает 16 отечественных и 113 иностранных источников. Представленный материал иллюстрирован 13 рисунками и 17 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методы исследования

Для решения поставленных задач в исследование включили 256 пациентов, им выполнялось КТ-исследование с контрастным веществом. У 60 пациентов были гиперваскулярные образования ПЖ, у 54 – гиповаскулярные образования, 142 пациента были с неизменным органом. Производилась сегментация ткани всей ПЖ в артериальную и венозную фазы контрастирования по данным КТ-томограмм и отдельно образований: в артериальную фазу для гиперваскулярных, в венозную фазу для гиповаскулярных. После сегментации часть исследований использовались для обучения нейросети, а остальные для тестирования. Для обучения и тестирования также использовалось 281 исследование из уже размеченных баз данных в открытом доступе. Схема дизайна исследования представлена на рисунке 1.

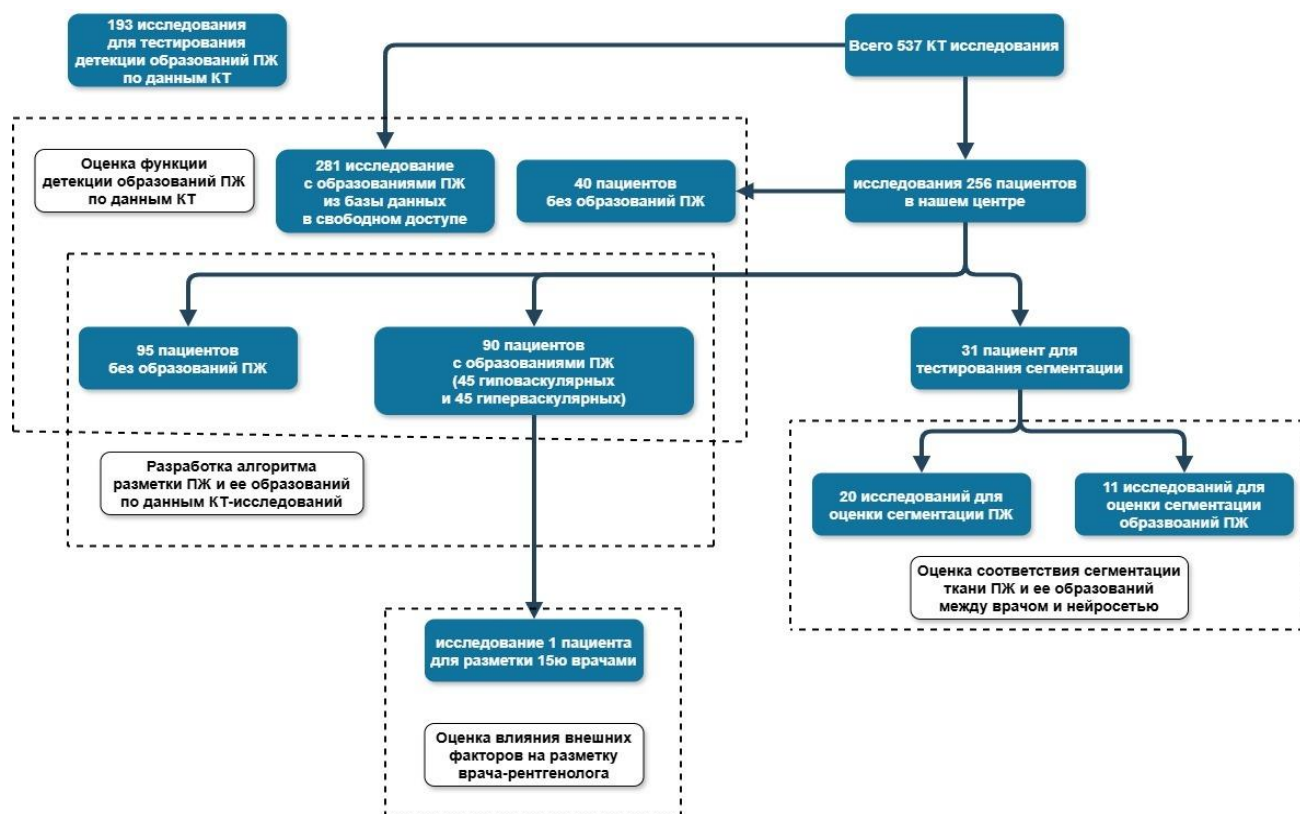


Рисунок 1 – Дизайн исследования

Тестовые выборки для алгоритмов сегментации распределились следующим образом:

- без патологических образований – 7 исследований;

- с гиповаскулярными образованиями – 9 исследований (3 случая в хвосте, 1 в теле, 5 в головке ПЖ);

- с гипervasкулярными образованиями – 15 исследований (13 в головке, 2 в теле).

Критериями включения в исследование являлись:

- наличие гипervasкулярного образования ПЖ, определяемого по паттернам контрастного накопления на КТ-изображениях;

- наличие гиповаскулярного образования ПЖ по данным КТ-исследования;

- наличие предоперационного КТ органов брюшной полости и забрюшинного пространства, выполненного с внутривенным контрастированием в полном объёме, включающем как минимум артериальную и венозную фазы.

Критериями исключения были:

- отсутствие артериальной и венозной фаз исследования;

- наличие в анамнезе хирургического вмешательства на ПЖ, что могло бы повлиять на анатомию и структуру органа.

Методика сегментации поджелудочной железы и ее гипо- и гипervasкулярных образований по данным компьютерной томографии

Сегментацию полученных изображений производили в модуле просмотра DICOM-изображений Philips IntelliSpace Portal (Philips Medical Systems, Cleveland), для сегментации использовали инструмент, определяющий контуры органа по типу «магнитного лассо», выгружались маски в формате Stl. В дальнейшем производили корректировку масок и экспорт в подходящий формат с помощью другого программного обеспечения 3D Slicer (Рисунок 2). С помощью него же проводили выгрузку сегментационных масок в файловый формат NIfTI.

Чтобы уменьшить влияние субъективного фактора разметки и облегчить большой объем работы сегментацию проводили 2 врача-рентгенолога (опыт работы более 5 лет) с выделением границ ПЖ на артериальной и венозной фазах каждого исследования в вышеописанном программном пакете IntelliSpace Portal V. компании Philips. Выделяли всю паренхиму ПЖ, если в ней было образование, его включали в общую разметку, но исключали общий желчный проток, видимые кровеносные сосуды и жировое пространство вокруг ПЖ. Затем проводили сегментацию образований ПЖ на КТ изображениях, использовались портальная фаза – для гиповаскулярных образований, артериальная фаза – для гипervasкулярных.

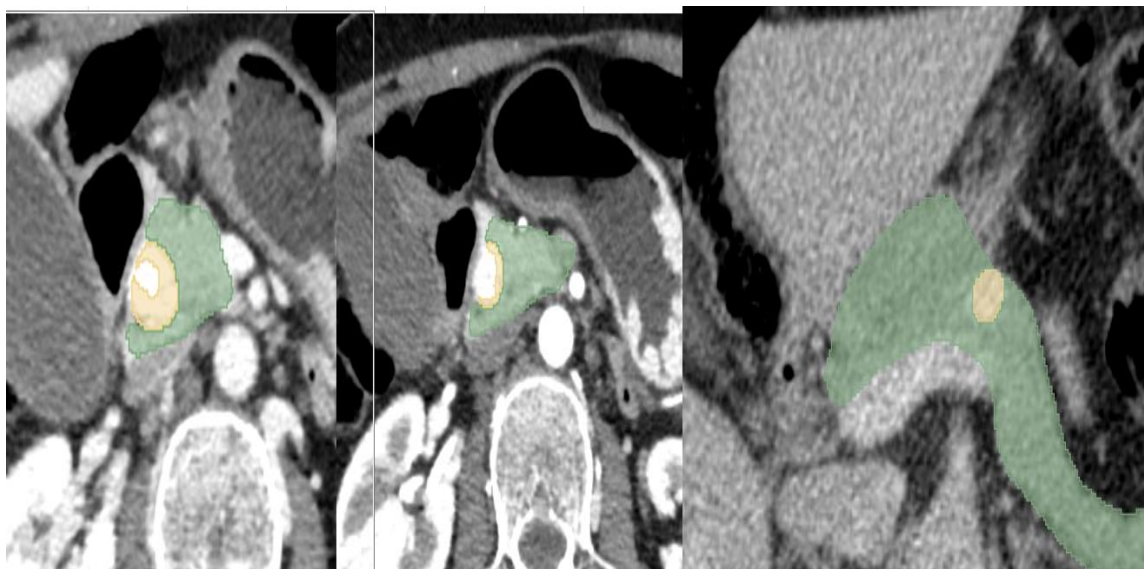


Рисунок 2 – Примеры сегментационных масок образований ПЖ на КТ, которые с помощью программного обеспечения 3D Slicer пришлось корректировать и доразмечать

Оценка разницы ручной сегментации поджелудочной железы между разными врачами-рентгенологами с выявлением наиболее критических зон

В исследование были привлечены шестнадцать врачей-рентгенологов, специализирующихся на абдоминальной визуализации, с опытом работы в данной области от 1 до 7 лет. Каждый специалист, независимо от стажа, проводил анализ результатов по одному и тому же КТ-исследованию одного пациента. Для оценки использовались изображения в двух ключевых фазах контрастного усиления – артериальной и венозной, что обеспечивало полноту визуализации сосудистых структур и паренхимы ПЖ.

Задача рентгенологов заключалась в оценке построенных трёхмерных моделей сегментационных масок ПЖ в трёх взаимно перпендикулярных проекциях: аксиальной, фронтальной и сагиттальной. Такой подход позволял комплексно оценить форму и контуры органа, исключить искажения, возникающие при анализе только в одной плоскости, и повысить объективность заключений.

Данный этап работы был направлен на комплексную визуальную валидацию результатов сегментации, что является важным компонентом оценки эффективности автоматизированных систем в клинических условиях.

Было проведено сравнение масок сегментации по точности совпадения с эталоном с помощью индекса Дайса и вычисления разницы в объемах, как в

целом для всего объема органа, так и для его отделов. Индекс Дайса (DSC) был рассчитан по формуле:

$$DSC = \frac{2|X \cap Y|}{|X| + |Y|}, \quad (1)$$

где $|X|$ и $|Y|$ – мощности двух множеств (т.е. количество элементов в каждом множестве).

Разница в объемах была посчитана после вычисления количества вокселей каждой маски сегментации. Затем зоны сегментации всех 5 масок были проанализированы с помощью радиомики. Для текстурного анализа было использовано расширение Radiomics, таким образом, были получены характеристики 1-го порядка наиболее вариабельных участков разметок.

Оценка возможностей системы компьютерного зрения по компьютерным томограммам с внутривенным контрастированием в сегментации паренхимы поджелудочной железы и ее образований

Для получения сегментационных масок ПЖ и образований использовалась рабочая станция «Philips Brilliance Portal». 2 врача-рентгенолога независимо друг от друга с опытом работы 3 и 12 лет проводили сегментацию всего объема ПЖ и опухоли с помощью трехмерной области интереса (3D ROI) в артериальную и портальную фазы исследования (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Процесс сегментации паренхимы поджелудочной железы в артериальную фазу исследования КТ на рабочей станции «Philips Brilliance Portal»

Для обучения использовалась современная архитектура нейросети U-Net++ (см. Рисунок 4), разработанная специально для задач точной и структурно согласованной сегментации медицинских изображений. Эта нейросетевая модель является улучшенной модификацией классической архитектуры U-Net, зарекомендовавшей себя как «золотой стандарт» в задачах сегментации в биомедицинской визуализации.

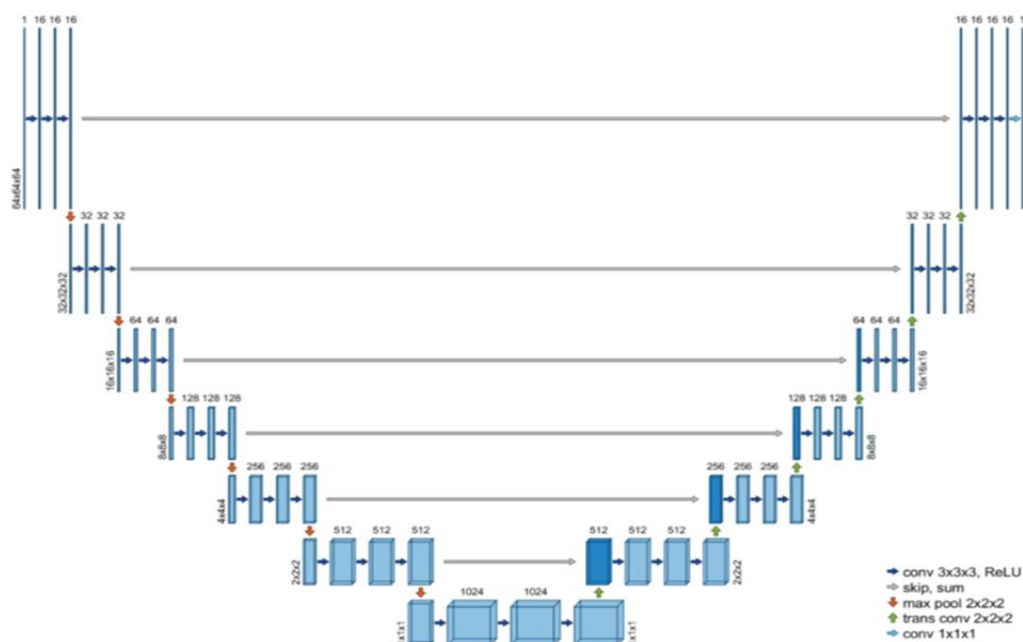


Рисунок 4 – Архитектура сети U-net

Оценка возможностей алгоритмов системы компьютерного зрения по компьютерным томограммам с внутривенным контрастированием в детекции образований поджелудочной железы

Для обучения и проверки системы КЗ в детекции образований ПЖ по данным КТ были загружены исследования 95 пациентов без образований ПЖ и 90 – с образованиями, из выборки для обучения сегментации нейросети U-net++, а также исследования 40 пациентов со здоровой железой и 281 исследование из открытой базы данных The Medical Decathlon с образованиями ПЖ. КТ-срезы, на которых была сегментационная маска ПЖ, были загружены в другую нейросеть DenseNet121 – всего было обработано 29252 КТ-среза, из них 24980 с нормальной паренхимой ПЖ и 4272 с признаками образования в ней.

В результате система КЗ выдала результат в виде классификации (1 – есть образование, 0 – нет образования). Были подсчитаны общая точность и количество ложноположительных и ложноотрицательных разметок нейросетью.

В качестве метрик оценки качества разметки нейросети использовались диагностическая точность и чувствительность.

Для количественной оценки эффективности модели, предназначенной для автоматического выявления образований ПЖ на КТ-изображениях, были использованы стандартные метрики качества классификации, а также графические методы анализа динамики обучения модели (Таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики основных метрик качества модели и графического анализа

Метрика	Назначение
Accuracy	Общая корректность классификации
Precision	Точность определения «опухоли» среди всех помеченных случаев
Recall	Способность обнаружить все истинные опухоли
AUC	Неспецифический показатель качества классификации
ROC-кривая	Визуальное представление TPR vs FPR
Графики	Анализ динамики обучения: точность, полнота, потери

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данного раздела диссертационной работы нами проведена оценка зависимости точности разметки паренхимы поджелудочной железы врачом-рентгенологом в зависимости от внешних факторов.

Оценка влияния внешних факторов на разметку врача рентгенолога представлена в таблицах 2-11.

Таблица 2 – Результаты корреляционного анализа значений исследуемых показателей с возрастом рентгенолога

Показатель	ρ [95% ДИ]	p
Артериальная фаза		
DICE (сравнение с эталоном)	-0,02 [95% ДИ: -0,53; 0,5]	0,938
Разница с эталонным значением	0,01 [95% ДИ: -0,5; 0,52]	0,964
Венозная фаза		
DICE (сравнение с эталоном)	-0,05 [95% ДИ: -0,55; 0,47]	0,86
Разница с эталонным значением	-0,08 [95% ДИ: -0,57; 0,45]	0,764

Таблица 3 – Значения исследуемых показателей в зависимости от наличия опыта разметки

Показатель	Опыт разметки		p
	Нет	Есть	
Артериальная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	84,7 (83,7; 87)	86,6 (84,2; 86,8)	0,768
Разница с эталонным значением	-11462,5 (-16886; -8380,5)	-11472 (-20480; -3888)	0,953
Венозная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	86 (84,3; 86,4)	87,4 (86,7; 88,3)	0,04
Разница с эталонным значением	-6632,5 (-12002; -1405,5)	3693 (1800; 5139)	0,129

Таблица 4 – Значения исследуемых показателей в зависимости от возраста рентгенолога

Показатель	Возраст рентгенолога		p
	23-28 лет	28-40 лет	
Артериальная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	86,5 (84,3; 87,1)	84,3 (83,2; 84,7)	0,371
Разница с эталонным значением	-10014 (-16883; -4891)	-16297 (-17082; -12716)	0,513
Венозная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	86,4 (86,2; 87,2)	85,8 (83,9; 86,8)	0,44
Разница с эталонным значением	-27 (-7828; 4777,5)	-6049 (-21891; -1256)	0,254

Таблица 5 – Значения исследуемых показателей в зависимости от пола рентгенолога

Показатель	Пол рентгенолога		p
	Женский	Мужской	
Артериальная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	84,7 (83,4; 86,6)	86,9 (86; 87,6)	0,28
Разница с эталонным значением	-12716 (-17884,5; -5894,5)	-10840,5 (-13724; -6779,5)	0,851
Венозная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	86,1 (84,8; 86,5)	88,3 (87,8; 88,5)	0,026
Разница с эталонным значением	-6049 (-13250,5; 1941,5)	2575,5 (-454; 3436,5)	0,412

Таблица 6 – Значения исследуемых показателей в зависимости от занятости рентгенолога

Показатель	Занятость		p
	Женский	Мужской	
Артериальная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	84,3 (83,2; 84,7)	86,7 (86,5; 87,8)	0,113
Разница с эталонным значением	-16297 (-18687; -10209)	-8860 (-11058,8; 656,5)	0,145
Венозная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	86,3 (83,9; 86,7)	87,3 (86,2; 88,3)	0,145
Разница с эталонным значением	-7216 (-13176; -1256)	2575,5 (-940,5; 3607,5)	0,328

Таблица 7 – Значения исследуемых показателей в зависимости от удовлетворенности местом работы

Показатель	Удовлетворенность		p
	Удовлетворен	Не удовлетворен	
Артериальная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	84,7 (84,3; 87)	84,9 (82,1; 87,1)	0,571
Разница с эталонным значением	-11472 (-17884,5; -5894,5)	-11267,5 (-16669; -6487)	0,949
Венозная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	86,3 (85,7; 87)	86,6 (85,8; 87,2)	0,661
Разница с эталонным значением	-6049 (-10604; 4416)	-1555 (-6863,2; -104,2)	0,851

Таблица 8 – Значения исследуемых показателей в зависимости от продолжительности свободного времени

Показатель	Свободное время		p
	До 2 часов	От 2 часов и более	
Артериальная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	86,5 (83,8; 86,7)	84,7 (84; 87,6)	0,779
Разница с эталонным значением	-12716 (-18781; -8860)	-10840,5 (-16894,5; -3627,5)	0,779
Венозная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	86,1 (84,8; 86,6)	86,5 (86,2; 87,6)	0,463
Разница с эталонным значением	-1854 (-17608; 272)	-1349 (-7420; 4716)	0,281

Таблица 9 – Результаты корреляционного анализа значений исследуемых показателей с продолжительностью свободного времени

Показатель	τ_B [95% ДИ]	p
Артериальная фаза		
DICE (сравнение с эталоном)	0,09 [95% ДИ: -0,33; 0,5]	0,674
Разница с эталонным значением	0,09 [95% ДИ: -0,37; 0,55]	0,674
Венозная фаза		
DICE (сравнение с эталоном)	0,24 [95% ДИ: -0,15; 0,64]	0,247
Разница с эталонным значением	0,22 [95% ДИ: -0,26; 0,7]	0,293

Таблица 10 – Значения исследуемых показателей в зависимости от наличия долговых обязательств

Показатель	Долговые обязательства		p
	Нет	Есть	
Артериальная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	85,6 (84,2; 86,7)	84,7 (83,2; 89)	0,953
Разница с эталонным значением	-10840,5 (-15402; -8380,5)	-18687 (-28528; -3888)	0,44
Венозная фаза			
DICE (сравнение с эталоном)	86,2 (85,6; 86,7)	86,7 (86,3; 87,4)	0,513
Разница с эталонным значением	-1555 (-6924; 3220)	-8032 (-13176; 3351)	0,679

Таблица 11 – Результаты корреляционного анализа значений исследуемых показателей с оценкой стоимости проведения разметки

Показатель	τ_B [95% ДИ]	p
Артериальная фаза		
DICE (сравнение с эталоном)	0,18 [95% ДИ: -0,24; 0,6]	0,377
Разница с эталонным значением	0,03 [95% ДИ: -0,25; 0,32]	0,876
Венозная фаза		
DICE (сравнение с эталоном)	-0,12 [95% ДИ: -0,53; 0,29]	0,568
Разница с эталонным значением	-0,18 [95% ДИ: -0,55; 0,19]	0,377

Статистически значимых зависимостей выявлено не было, кроме опыта работы врача рентгенолога и пола для венозной фазы исследования.

Оценка зон гипер- и гипоразметки паренхимы поджелудочной железы в отличие от эталона.

Произведено сравнение 15 сегментационных масок 15 врачей-рентгенологов в артериальную и в венозную фазы КТ-исследования одного пациента. Для наглядности и выделения «критичных» зон были построены 3D-модели гипо- и гиперразметки. Гипоразметка включает в себя воксели, которые включил в маску при разметке каждый из 15 врачей, гиперразметка включает в себе все воксели, которые хотя бы единожды были размечены врачом (Рисунок 5, Рисунок 6).

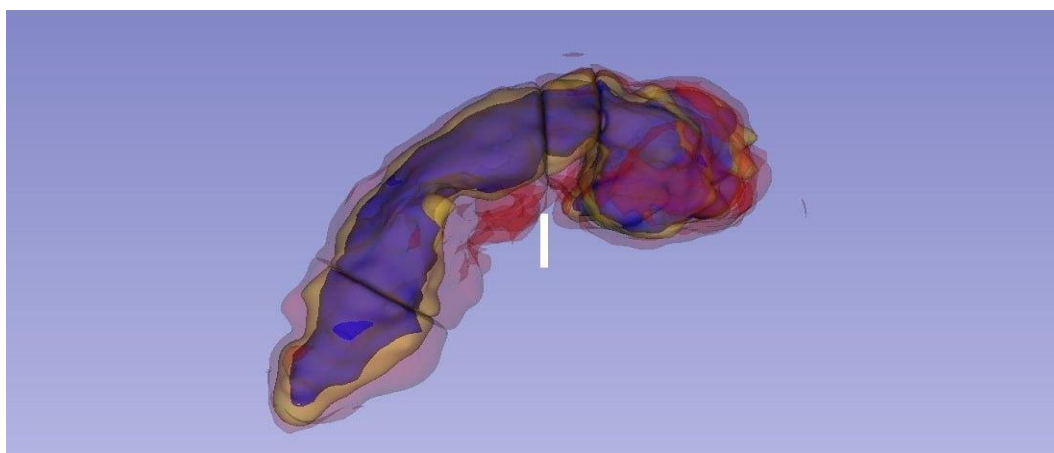


Рисунок 5 – 3D-модель сегментационных масок поджелудочной железы, размеченных по КТ-изображениям в артериальную фазу исследования врачами-рентгенологами *Примечание:* Синим цветом обозначена модель гипоразметки ПЖ, желтым – эталонная модель, красным – гиперразметка ПЖ.

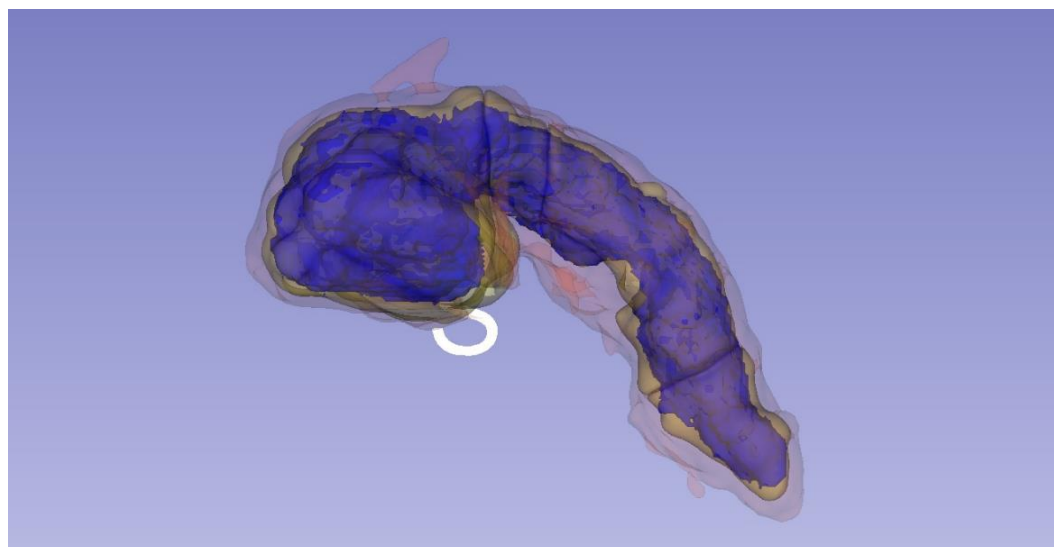


Рисунок 6 – 3D-модель сегментационных масок поджелудочной железы, размеченных по КТ-изображениям в портальную фазу исследования врачами-рентгенологами *Примечание:* Синим цветом обозначена модель гипоразметки ПЖ, желтым – эталонная модель, красным – гиперразметка ПЖ.

Так как обучение нейросети сегментации ПЖ и ее образований подразумевает в дальнейшем совместное использование модели вместе с методологией текстурного анализа мы провели анализ зон различий гипер- и гипоразметки с эталоном.

В качестве меры выраженности отклонений текстурных параметров в зонах гипо- и гиперразметки от эталонных значений использовалось абсолютное отклонение от эталонного значения масштабированное на его абсолютное значение:

$$\frac{|\text{значениев зоне гипо / гиперразметки} - \text{значение эталона}|}{|\text{значение эталона}|} \quad (2)$$

На рисунках 7 и 8 представлены результаты оценки особенностей зон гипо- и гиперразметки по сравнению с эталоном в отношении текстурных параметров.

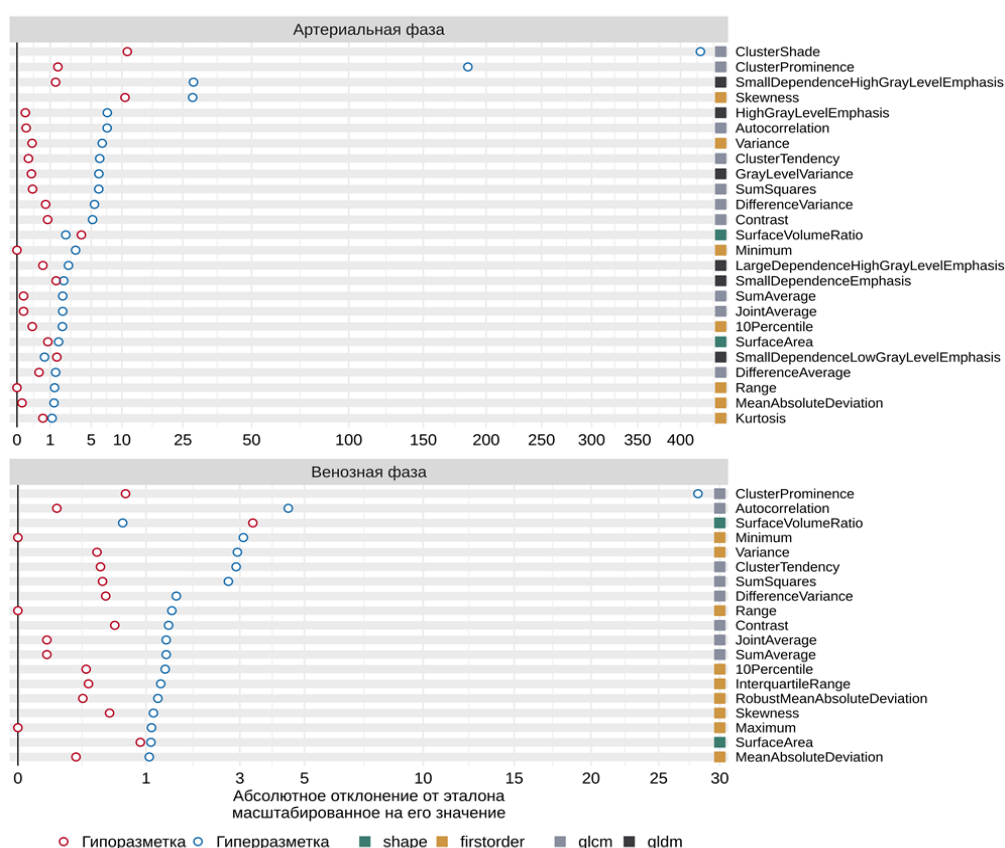


Рисунок 7 – Абсолютные отклонения от эталонных значений текстурных параметров масштабированные на их значения

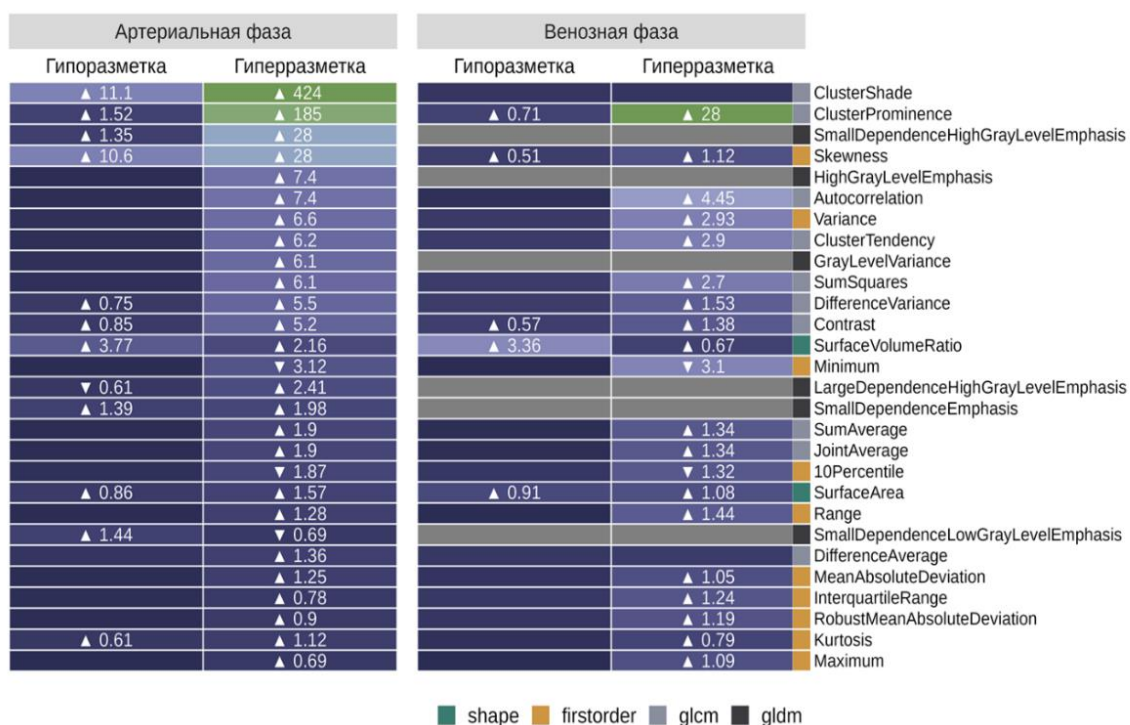


Рисунок 8 – Абсолютные отклонения от эталонных значений текстурных параметров масштабированные на их значения

Вышеупомянутые текстурные характеристики с высоким отклонением могут коррелировать с большим количеством ошибок в разметке, то есть большим отклонением от эталона в большую или меньшую сторону.

Оценка значимости отступа от границы эталона для извлечения текстурных характеристик.

Для этого с помощью ПО “3D slicer” мы строили сегментационные маски с прибавлением по границе по 1 мм до 5 мм и убавлением по 1 мм до 5 мм, а затем сравнивали соответствие текстурных характеристик с эталоном с помощью коэффициента внутриклассовой корреляции. Результаты представлены в Таблице 12.

Таблица 12 – Значения коэффициента внутриклассовой корреляции для каждого отступа от границы

Фаза исследования	Отступ от границы, мм									
	-5	-4	-3	-2	-1	+1	+2	+3	+4	+5
Артериальная	0,451	0,766	0,766	0,874	0,931	0,859	0,761	0,773	0,744	0,631
Венозная	0,581	0,767	0,869	0,962	0,993	0,994	0,969	0,698	0,725	0,648

Если условно взять порог в 0,9 (превосходная надежность), то согласно значениям коэффициента внутриклассовой корреляции: для артериальной фазы

КТ-исследования нежелательна недоразметка границы ПЖ более чем на 2 мм и гиперразметка более чем на 1 мм; для портальной фазы КТ-исследования нежелательна недоразметка границы ПЖ более чем 3 мм и гиперразметка более чем на 2 мм.

Результаты определения точности сегментации паренхимы поджелудочной железы системой компьютерного зрения по данным компьютерной томографии

В данном разделе диссертационной работы мы получали сегментационные маски первой тестовой выборки из 20 исследований, предсказанные нейросетью и сравнивали их с размеченными двумя врачами-рентгенологами. Точность сегментационных масок отражена с помощью коэффициента сходства Соренсена-Дайса в таблице 13.

Таблица 13 – Точность сегментационных масок валидационной выборки в артериальную и портальную фазы КТ-исследований

Артериальная фаза		Венозная фаза	
Код исследования	Dice	Код исследования	Dice
AC_6_arterial_0000	0.888404	AC_3_portal_0000	0.85250807
NE1004B_arterial_0000	0.89127517	NE2001B_portal_0000	0.8021831
NE2002B_arterial_0000	0.9144513	NE2003B_portal_0000	0.71730375
NE2007B_arterial_0000	0.77658075	NE2007B_portal_0000	0.80178666
NEN_12_arterial_0000	0.8162483	PAN_24P	0.75077814
NEN_3_arterial_0000	0.85119045	PAN_25P	0.8327945
NEN_4_arterial_0000	0.8861745	ac_11 p	0.85354805
PAN_24A	0.75725454	nen_24 p	0.80727273
PAN_33A	0.86548376	pan_15 p	0.78777623
PAN_36A	0.77671176	pan_3 p	0.82777375

Средняя точность сегментации нейросетью в сравнении с врачом-рентгенологом поджелудочной железы в артериальную фазу исследования составила – 0.8467, в портальную фазу исследования – 0.8033.

Результаты определения точности сегментации образований поджелудочной железы системой компьютерного зрения по данным компьютерной томографии

В данном разделе диссертационной работы мы получали сегментационные маски второй тестовой выборки из 11 исследований, предсказанные нейросетью и сравнивали их с размеченными двумя врачами-рентгенологами. Точность сегментационных масок отражена с помощью коэффициента сходства Соренсена-Дайса в таблице 14.

Таблица 14 – Точность сегментационных масок валидационной выборки в артериальную и портальную фазы КТ-исследований

Артериальная фаза		Венозная фаза	
Код исследования	Dice	Код исследования	Dice
NE1006B_arterial_0000	0.49127534	AC_4_portal_0000	0.4021831
NE2001B_arterial_0000	0.7146713	ac_5 p	0.41730375
NE2006B_arterial_0000	0.77611275	ac_8 p	0.70178666
NEN_11_arterial_0000	0.4159433	AC_2_portal_0000	0.45077814
NEN_2_arterial_0000	0.55309045	ac_9 p	0.5327945
		ac_1 p	0.55354805

Средняя точность сегментации нейросетью в сравнении с врачом-рентгенологом поджелудочной железы в артериальную фазу исследования гиперваскулярных образований – 0.6467, гиповаскулярных в портальную фазу исследования – 0.6143.

Оценка функции детекции образований поджелудочной железы системой компьютерного зрения по данным компьютерной томографии

Для оценки функции детекции нейросети мы использовали третий тестовый набор данных из 193 КТ-исследований, среди них было 38 случаев с образованием ПЖ и 155 – без образований. Были представлены результаты предсказаний модели (**predicted_label**) и истинные значения (**true_label**), а также метрики качества модели:

- **AUC (Area Under Curve) = 0.8896;**
- **Accuracy = 0.9255;**
- **Recall = 0.7222;**
- **Precision = 0.8378.**

ВЫВОДЫ

1. Разработанный алгоритм создания и разметки набора данных компьютерных томограмм показал высокую эффективность и может быть рекомендован для обучения сверточных нейронных сетей с целью выполнения трехмерной сегментации и оценки ткани ПЖ, выявления патологических образований.

2. Качество разметки данных для подготовки к обучению нейронных сетей зависит от ряда факторов, основным из которых является опыт работы врача-рентгенолога. Соблюдение алгоритма сегментации позволяет снизить различие в разметке между врачами.

3. Точность внедренного автоматизированного алгоритма сегментации паренхимы поджелудочной и ее образований по данным КТ органов брюшной полости с контрастным усилением сопоставима с точностью ручной сегментации врача-рентгенолога.

4. Автоматизированный поиск патологических образований ПЖ на основе искусственной нейронной сети показал высокую эффективность: точность 92,55%, чувствительность 72,22%, специфичность 96,97%. Система компьютерного зрения может в большинстве случаев находить патологию в органе, что позволяет снизить число пропусков образований поджелудочной железы.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Оценку исследований компьютерных томограмм с последующей разметкой образований и паренхимы ПЖ следует выполнять врачам-рентгенологам со стажем не менее 3-х лет и с опытом работы в абдоминальной радиологии. При разметке ткани ПЖ по данным КТ для сохранения точности радиомических показателей при анализе структуры паренхимы железы не следует отступать от края ПЖ в артериальную фазу КТ-исследования внутрь более чем на 2 мм и снаружи более чем на 1 мм, в портальную фазу – внутрь более чем 3 мм и снаружи более чем на 2 мм.

2. Артериальная и венозная фазы КТ исследований являются наиболее оптимальными для оценки изменений ПЖ и соответствующей разметки. Также следует не вовлекать в разметку желчный проток и прилежащие сосуды, но зону патологии ПЖ включить в сегментационную маску паренхимы.

3. Гиповаскулярное образование ПЖ имеет наилучшую визуализацию в портальную фазу исследования, гипervasкулярное образование – в артериальную.

Использование соответствующих фаз обязательно при разметке данных образований на компьютерных томограммах. Следует производить оценку DICOM-изображений и масок перед обучением нейросети врачами-специалистами.

4. Для повышения точности диагностики образований ПЖ по данным КТ следует использовать систему компьютерного зрения.

Алгоритм

Разработан алгоритм создания и разметки набора данных компьютерных томограмм для обучения сверточных нейронных сетей с целью выполнения трехмерной сегментации и оценки ткани ПЖ, выявления патологических образований:

а) рекомендуется сначала отобрать набор КТ-исследований здоровых пациентов и с образованиями ПЖ для обучения сегментировать ПЖ, затем второй набор КТ-исследований с патологией для дообучения сегментировать образования ПЖ;

б) разметку рекомендуется перед обучением нейросети корректировать через ПО 3D Slicer;

в) в разметку паренхимы ПЖ не рекомендовано включать сосудистые структуры, прилежащие органы, но имеет смысл включать образование;

г) допустима погрешность отступа от края ПЖ в артериальную фазу КТ-исследования внутрь более чем на 2 мм и снаружи более чем на 1 мм, в портальную фазу – внутрь более чем 3 мм и снаружи более чем на 2 мм.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Радиомика при заболеваниях печени и поджелудочной железы. Обзор литературы / **К. А. Замятина**, М. В. Годзенко, Г. Г. Кармазановский, А. Ш. Ревешвили // *Анналы хирургической гепатологии*. – 2022. – Т. 27, № 1. – С. 40–47. – DOI: 10.16931/1995-5464.2022-1-40-47.

2. Современная лучевая диагностика и интеллектуальные персонализированные технологии в гепатопанкреатологии / Г. Г. Кармазановский, Е. В. Кондратьев, И. С. Груздев, В. С. Тихонова, М. Ю. Шантаревич, **К. А. Замятина** [и др.] // *Вестник Российской академии медицинских наук*. – 2022. – Т. 77, № 4. – С. 245–253. – DOI: 10.15690/vramn2053.

3. Глубокое машинное обучение в сегментации гипо- и гиперваскулярных образований поджелудочной железы по КТ-изображениям (обзор литературы) / **К. А. Замятина**, Е. В. Кондратьев, А. В. Жарикова [и др.] // *Диагностическая и*

интервенционная радиология. – 2023. – Т. 17, № S3.1. – С. 79–91. – DOI: 10.25512/DIR.2023.17.3(1).11.

4. Оценка диагностической ценности глубокого машинного обучения для автоматизированной сегментации паренхимы поджелудочной железы и ее гипо- и гиперваскулярных образований по КТ-изображениям с помощью U-NET нейросети / **К. А. Замятина**, А. В. Жарикова, Е. В. Кондратьев [и др.] // Медицинская визуализация. – 2024. – Т. 28, № 3. – С. 12–21. – DOI: 10.24835/1607-0763-1483.

5. Влияние точности разметки зон интереса на воспроизводимость показателей радиомики компьютерных томограмм / Е. В. Кондратьев, С. А. Шмелева, А. А. Усталов, **К. А. Замятина** [и др.] // Диагностическая и интервенционная радиология. – 2025. – Т. 19, № 2. – С. 55–60.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИИ – искусственный интеллект

КЗ – компьютерное зрение

КТ – компьютерная томография

МРТ – магнитно-резонансная томография

НЭО – нейроэндокринные опухоли

ПЖ – поджелудочная железа