

На правах рукописи

Канахина Лия

**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МЫШЦ ПЕРЕДНЕЙ БРЮШНОЙ СТЕНКИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО
ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ПРЕДОПЕРАЦИОННОЙ ПОДГОТОВКЕ У
ПАЦИЕНТОВ С ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОЙ ВЕНТРАЛЬНОЙ ГРЫЖЕЙ W3**

3.1.9. Хирургия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Москва — 2025

Работа выполнена на кафедре оперативной хирургии и клинической анатомии им. И.Д. Кирпатовского медицинского института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Научный руководитель:

Протасов Андрей Витальевич – доктор медицинских наук, профессор

Официальные оппоненты:

Матвеев Николай Львович - доктор медицинских наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Институт биомедицины (МБФ), кафедра экспериментальной и клинической хирургии, заведующий кафедрой

Шестаков Алексей Леонидович - доктор медицинских наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), кафедра госпитальной хирургии №2, профессор кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «___» _____ 20__ г. в «___» на заседании диссертационного совета ПДС 0300.024 при ФГАОУ ВО «Российский Университет Дружбы Народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)» по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФГАОУ ВО «Российский Университет Дружбы Народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)» и на сайте <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета
ПДС 0300.024,
кандидат медицинских наук**

Гительзон Екатерина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Послеоперационные вентральные грыжи (ПОВГ) являются одним из наиболее распространённых осложнений лапаротомий. По данным литературы, частота их формирования варьирует от 10 до 30%, достигая 31% у пациентов групп риска (Strigård K. et al., 2016). Около 50% случаев выявляются в течение первых двух лет, 74% – в течение трёх лет после операции (Strigård K. et al., 2016). ПОВГ существенно снижают качество жизни пациентов, повышают риск осложнений и требуют сложных реконструктивных вмешательств (Михин И. В., и соавт., 2014).

Этиология ПОВГ многофакторна: технические ошибки при закрытии лапаротомной раны, осложнения послеоперационного периода (инфекция, серома, гематома) (Жебровский В.В. и соавт., 2002; Белоконев В.И. и соавт., 2005), нарушения ремоделирования внеклеточного матрикса, дисбаланс коллагена, повышенная активность матриксных металлопротеиназ (Белоконев В.И. и соавт., 2005; Ступин В.А. и соавт., 2009; Klinge U. et al., 2001; Klinge U. et al., 2006), а также общие факторы — ожирение, сахарный диабет, ХОБЛ, состояния с повышенным внутрибрюшным давлением (Славин Л.Е. и соавт., 2005; Sorensen L.T. et al., 2005).

Патогенез ПОВГ связан с нарушением процессов заживления переднебоковой стенки живота, что сопровождается дегенеративными изменениями апоневроза, истончением и фиброзом, атрофией и латерализацией прямой и широких мышц живота. Эти изменения снижают прочность и эластичность мышечно-апоневротического каркаса, и его компенсаторные возможности (Culbertson E.J. et al., 2013, DuBay D.A. et al., 2005).

Согласно классификации Европейского общества герниологов (EHS), дефекты категории W3 (шириной более 10 см) сопровождаются выраженной ретракцией мышц и снижением эластичности тканей (Strigård K. и соавт., 2016), что затрудняет реконструкцию и требует специальной дооперационной подготовки. Клиническое значение имеет утрата домена — длительное нахождение значительной части органов в грыжевом мешке. Для её количественной оценки применяется индекс Tanaka, значения свыше 25% ассоциированы с высоким риском интраабдоминальной гипертензии и компартмент-синдрома (Tanaka E.Y. et al., 2016).

Интраабдоминальная гипертензия (≥ 12 мм рт. ст.) и абдоминальный компартмент-синдром (≥ 20 мм рт. ст. при органной дисфункции) (Kirkpatrick A.W. et al., 2016) являются наиболее опасными осложнениями при репозиции содержимого. Дополнительно описан «четвертичный синдром», характеризующийся ригидностью передней брюшной стенки и выраженной утратой домена, что требует персонифицированной тактики ведения (Quintela C. et al., 2021).

В последние годы изучаются методы дооперационной подготовки, направленные на повышение растяжимости мышц и профилактику компартмент-синдрома. Одним из таких методов является введение ботулинического токсина типа А (БТ-А) в широкие мышцы, что снижает их ригидность и облегчает закрытие дефекта без натяжения (Elstner K.E. et al., 2017). Однако отсутствуют единые рекомендации по

показаниям, дозировке и срокам введения.

В этой связи актуально применение алгоритмов искусственного интеллекта для анализа данных КТ. Автоматизированное извлечение морфометрических и текстурных признаков мышц позволяет объективизировать их состояние, повысить точность стратификации риска и стандартизировать выбор тактики дооперационной подготовки у пациентов с ПОВГ категории W3.

Цель исследования

Разработка метода оценки состояния мышечно-апоневротического слоя передней брюшной стенки живота у пациентов с послеоперационной вентральной грыжей категории W3 на основании анализа данных компьютерной томографии с применением алгоритмов искусственного интеллекта.

Задачи исследования

1. Разработать протокол для количественного (текстурного) анализа мышечно-апоневротического слоя передней брюшной стенки по данным КТ у пациентов с различными категориями послеоперационных вентральных грыж с помощью алгоритмов искусственного интеллекта.
2. Выполнить сравнение морфометрических характеристик мышечно-апоневротического слоя передней брюшной стенки живота по данным компьютерной томографии у пациентов трёх групп: без патологии передней брюшной стенки (контрольная группа), с послеоперационной вентральной грыжей категории W2 и W3.
3. Оценить степень выраженности текстурных изменений в мышечно-апоневротическом слое передней брюшной стенки в исследуемых группах и выявить текстурные КТ-признаки, ассоциированные с утратой эластичности и снижением функциональной состоятельности брюшной стенки.
4. Определить клиническую значимость выделенных КТ-признаков в формировании показаний к дооперационному введению ботулинического токсина типа А в мышцы переднебоковой стенки живота с использованием алгоритмов искусственного интеллекта.

Научная новизна исследования

1. Впервые выполнен комплексный анализ морфометрических и текстурных характеристик мышц переднебоковой стенки живота у пациентов с послеоперационными вентральными грыжами категории W2 и W3 по данным компьютерной томографии с привлечением контрольной группы.
2. Впервые установлены количественные признаки, ассоциированные с выраженной утратой эластичности и функциональной несостоятельностью мышечно-апоневротического слоя, значимые для обоснования показаний к дооперационной подготовке.
3. Разработан и впервые апробирован протокол оценки состояния переднебоковой стенки живота на основе данных КТ, адаптированный к задачам хирургического планирования у пациентов с послеоперационными вентральными грыжами категории W3.

4. Предложен новый подход, основанный на применении алгоритмов искусственного интеллекта для сегментации и анализа мышц переднебоковой стенки живота, позволивший построить прогностическую модель обоснования дооперационного введения ботулинического токсина типа А.
5. Впервые выявлена статистически значимая взаимосвязь между характером структурных изменений мышц переднебоковой стенки живота, категорией грыжевого дефекта согласно классификации EHS и наличием показаний к дооперационному применению ботулинического токсина типа А.

Теоретическая и практическая значимость

Проведённое исследование позволило выявить морфофункциональные изменения мышечно-апоневротического слоя при ПОВГ категории W3: асимметрию площади и толщины мышц, снижение плотности и формирование текстурной неоднородности. Вместе с тем, по данным вейвлет - и Габор-анализа структура мышц у пациентов W3 характеризовалась большей стабильностью по сравнению с группой W2, что отражает особенности ремоделирования тканей.

Практическая значимость работы заключается в создании протокола количественной оценки состояния мышечно-апоневротического слоя на основе КТ с использованием морфометрических индексов (Defect Ratio, CSI, доля удаляемого сегмента), обладающих высокой прогностической ценностью для обоснования дооперационного введения ботулинического токсина. Разработанная модель машинного обучения (Random Forest, логистическая регрессия, кластеризация) продемонстрировала высокую точность классификации (AUC до 0,95) и позволяет персонализировать выбор тактики подготовки и хирургического лечения пациентов с ПОВГ категории W3.

Методология и методы исследования

В рамках когортного ретроспективного исследования, проведённого на клинической базе ФГБУЗ «Клиническая больница № 85» Федерального медико-биологического агентства России и ЧУЗ «Клиническая больница «РЖД-Медицина» имени Н.А. Семашко», был выполнен анализ архивных данных компьютерной томографии и хирургических протоколов 90 пациентов, обследованных и/или оперированных в период с января 2020 года по сентябрь 2024 года. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени П. Лумумбы» (протокол № 5/13 от 13 мая 2025 г.).

В качестве основного метода использовалась компьютерная томография с последующей морфометрической и текстурной обработкой изображений. Изучались объёмные и линейные параметры брюшной полости, ширина грыжевых ворот, объём грыжевого мешка, окружность брюшной стенки, угол расхождения прямых мышц, площадь поверхности и доля удаляемого сегмента. На основании полученных данных рассчитывались производные морфометрические индексы: индекс Tanaka, коэффициент дефекта (Defect Ratio), индекс разделения компонентов (CSI), а также авторский показатель «доля удаляемого сегмента».

Анализ структуры мышечно-апоневротического слоя включал изучение

площади, толщины, длины и плотности мышц, а также текстурных характеристик (mean gray, контраст, однородность, корреляция, параметры вейвлет- и Габор-анализа). Для статистической обработки использовались критерии Стьюдента, Манна–Уитни и Краскела–Уоллиса, а также корреляционный анализ по Спирмену. Дополнительно применялись методы машинного обучения (Random Forest, логистическая регрессия, кластеризация K-Means и DBSCAN, метод главных компонент), позволившие построить прогностическую модель и оценить значимость изученных признаков в формировании показаний к дооперационному введению ботулинического токсина типа А.

Положения, выносимые на защиту

1. Применение алгоритмов искусственного интеллекта позволяет стандартизировать оценку состояния передней брюшной стенки и автоматизировать извлечение клинически значимых признаков из КТ-изображений, необходимых для принятия хирургического решения.
2. Морфометрические характеристики мышц передней брюшной стенки, определённые по данным компьютерной томографии, достоверно различаются у пациентов с послеоперационными вентральными грыжами категории W2 и W3 и отражают степень выраженности анатомо-функциональной несостоятельности передней брюшной стенки.
3. Структурные (текстурные) изменения мышечно-апоневротического слоя передней брюшной стенки достоверно различаются в исследуемых группах и могут служить критериями оценки степени патологического ремоделирования и функциональной состоятельности брюшной стенки при планировании реконструктивного вмешательства.
4. Интеграция количественного КТ-анализа с применением искусственного интеллекта в клиническую практику способствует улучшению качества дооперационного планирования, снижению частоты осложнений и повышению эффективности хирургического лечения пациентов с выраженной утратой домена (послеоперационной вентральной грыжей W3).

Степень достоверности и обоснованности результатов работы

Объём проведённых исследований основан на достаточном клиническом материале, включающем пациентов с послеоперационными вентральными грыжами категорий W2 и W3, а также контрольную группу. Стандартизация критериев включения и исключения, унифицированный протокол проведения компьютерной томографии и единые подходы к морфометрическому и текстурному анализу обеспечили высокую воспроизводимость полученных данных. Научные положения и выводы подкреплены убедительными фактическими результатами, представленными в таблицах и рисунках, что подтверждает их наглядность и достоверность. Статистическая обработка данных проводилась с использованием современных программных средств (StatTech, Python). Достоверность результатов обеспечена применением параметрических и непараметрических методов статистики при уровне значимости $p < 0,05$. Таким образом, достоверность и обоснованность результатов

исследования подтверждается достаточным клиническим материалом, стандартизированным протоколом анализа, использованием современных методов статистической обработки и согласованностью полученных данных с литературными источниками

Внедрение результатов исследования

Материалы диссертационного исследования внедрены в учебный процесс на кафедре оперативной хирургии и клинической анатомии им. И.Д. Кирпатовского медицинского института Российского университета дружбы народов им. П. Лумумбы при преподавании разделов, посвящённых анатомии и клинической оценке переднебоковой стенки живота, герниологии и дооперационному планированию в абдоминальной хирургии.

Основные положения работы внедрены в практическую деятельность хирургического отделения ФГБУЗ КБ №85 ФМБА России г. Москвы при оценке пациентов с послеоперационными вентральными грыжами категории W3 для обоснования показаний к дооперационной подготовке и выбора хирургической тактики.

Апробация материалов диссертации

Ключевые результаты и положения диссертационного исследования прошли обсуждение на заседаниях кафедры оперативной хирургии и клинической анатомии им. И.Д. Кирпатовского, медицинского института Российского университета дружбы народов им. П. Лумумбы. Основные результаты исследования представлены на XVII Всероссийском форуме с международным участием «Инновационные технологии в хирургии» (Воронеж, 2024), XVIII Всероссийском национальном конгрессе лучевых диагностов и терапевтов «РАДИОЛОГИЯ–2024» (Москва, 2024), конференции молодых учёных «Виноградовские чтения» (Москва, 2024), I Международном научно-практическом форуме «Волжские берега» (Саратов, 2024), а также на IX Всероссийском съезде анатомов, гистологов и эмбриологов России «Фундаментальная и прикладная морфология в XXI веке» (Оренбург, 2025).

Публикации

По результатам диссертационного исследования опубликовано 5 научных работ, из которых 4 статьи размещены в рецензируемых изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Личный вклад диссертанта

Автором проведён поиск и анализ литературы по теме исследования, сформулированы цель и задачи работы. Сформирована клиническая база пациентов с послеоперационными вентральными грыжами категорий W2–W3 и контрольная группа, выполнена систематизация данных и создание электронной базы для последующего анализа. Автор принимала активное участие в ведении пациентов: проводила дооперационную подготовку, ассистировала на хирургических вмешательствах, осуществляла послеоперационное наблюдение и динамическое ведение пациентов в течение года. Автором самостоятельно выполнены сегментация и

разметка КТ-изображений, проведены морфометрический и текстурный анализ мышечно-апоневротического слоя переднебоковой стенки живота, а также статистическая обработка данных с применением методов машинного обучения. Автором лично подготовлены основные публикации по результатам исследования, отражающие научные положения диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 20 таблиц и 44 рисунка. В исследовании представлены результаты анализа литературных источников, методологическое обоснование, описание полученных данных, их интерпретация и практические рекомендации. Библиографический список включает 174 источников, из которых 34 на русском и 140 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Результаты работы и их обсуждение. В исследовании были выделены три группы пациентов, по 30 человек в каждой. В первой группе среди 30 пациентов преобладали женщины, их доля составила 60% ($n = 20$). Во второй группе (W2) распределение было равномерным между мужчинами и женщинами. В третьей группе (W3) большинство пациентов составили мужчины – 72% ($n = 21$). Средний возраст пациентов также различался между группами: в первой группе он составил $45,2 \pm 6,8$ лет, во второй группе – $52,7 \pm 7,3$ лет, а в третьей группе – $56,1 \pm 5,9$ лет.

Сравнительный анализ показал различие в характере ранее перенесённых операций между группами. В группе 2 преобладали плановые гинекологические и абдоминальные вмешательства (экстирпация матки с придатками – 23,1 %, нефрэктомия – 15,4 %, гемиколэктомия при опухолях – 23,1 %). В группе 3 на первом месте находились пациенты с тяжёлыми последствиями экстренных лапаротомий на фоне эвентраций или перитонита (40,0 %).

Статистический анализ показал значительные различия объеме грыжевого мешка, в ширине грыжевых ворот и окружности стенок брюшной полости между исследуемыми группами ($p < 0,001$, критерий Краскела–Уоллиса) (таблица 1).

Таблица 1 – Описательная статистика количественных переменных в зависимости от группы

Показатели	Группа		
	Здоровые	W2	W3
Ширина грыжевых ворот (см), Ме [IQR]	linea alba: 2,29 [2,00; 2,70]	6,73 [6,20; 6,92]	11,64 [11,19; 12,04]
Объем грыжевого мешка (см ³), Ме [IQR]	0,00 [0,00; 0,00]	154,47 [77,42; 166,24]	589,16 [535,68; 702,88]

Полученные данные подтверждают закономерное увеличение размеров грыжевых ворот и объема грыжевого мешка с увеличением степени тяжести вентральной грыжи.

У здоровых пациентов медианное значение окружности составило 63,83 см [60,00; 66,00], в группе W2 – 71,71 см [71,11; 73,56], а в группе W3 достигло 78,90 см [78,09; 80,42]. Различия между всеми группами оказались значимыми ($p < 0,001$), за исключением сравнения между группами W2 и W3 ($p = 0,010$). Полученные результаты подтверждают закономерное увеличение окружности брюшной полости по мере прогрессирования вентральной грыжи.

При сравнении угла расхождения между прямыми мышцами в зависимости от группы, нами были установлены статистически значимые различия ($p < 0,001$) (используемый метод: Критерий Краскела–Уоллиса) (рисунок 1).

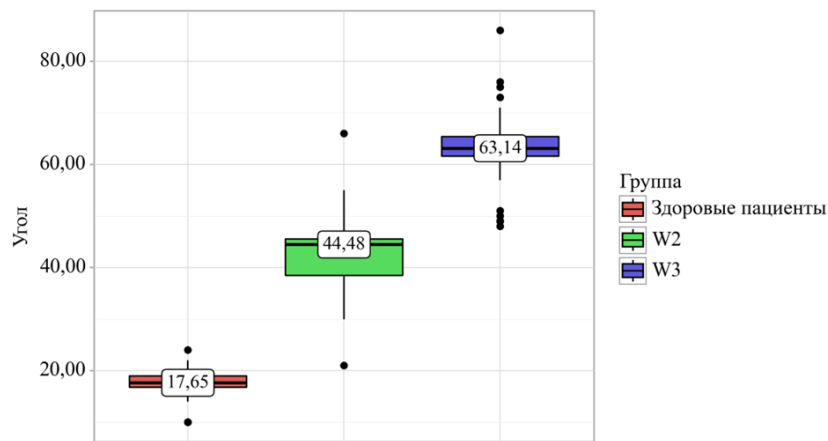


Рисунок 1 – Анализ угла в зависимости от группы

Далее были проанализированы показатели, ранее не применявшиеся в клинической практике – площадь поверхности брюшной полости и площадь потенциально удаляемой ткани. Согласно полученным данным при сравнении площади поверхности в зависимости от группы, нами были установлены статистически значимые различия ($p < 0,001$) (используемый метод: Критерий Краскела–Уоллиса) (рисунок 2).

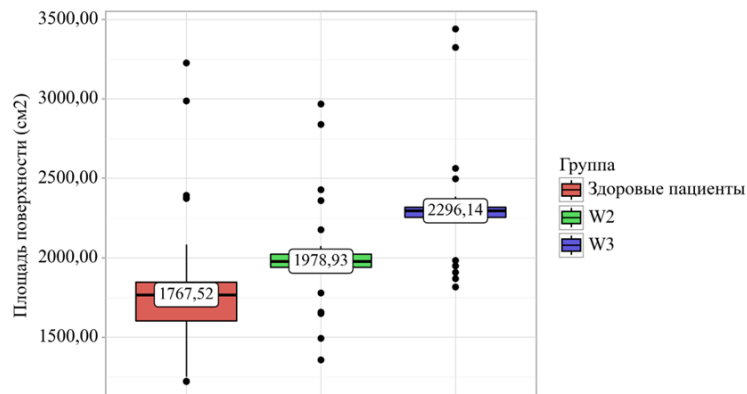


Рисунок 2 – Анализ площади поверхности БП в зависимости от группы

Анализ площади поверхности брюшной полости показал статистически значимые различия между группами ($p < 0,001$): у здоровых пациентов медиана составила 1767,52 см² [1602,28–1846,09], в группе W2 – 1978,93 см² [1941,15–2022,46], в группе W3 – 2296,14 см² [2254,21–2317,75].

Площадь удаляемой ткани также возрастала от группы к группе: у здоровых пациентов – 12,82 см² [10,55–14,71], в группе W2 – 38,72 см² [35,27–40,20], в группе W3 – 71,82 см² [68,02–74,27] ($p < 0,001$). В группе здоровых пациентов эта площадь соответствовала области белой линии живота, т.е. между медиальными краями прямых мышц живота.

Доля удаляемого сегмента по отношению к общей площади брюшной стенки была наименьшей в группе здоровых пациентов – 1,42 % [1,30–1,64], в группе W2 – 3,90 % [3,50–4,01], в группе W3 – 6,26 % [5,93–6,60] ($p < 0,001$).

На основании полученных морфометрических параметров, были вычислены производные морфометрические индексы: индекс Tanaka, Defect Ratio и индекс разделения компонентов (CSI). Результаты расчётов для группы 2 и группы 3 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Производные морфометрические индексы группы 2 и 3.

Индекс	Группа 2 (Среднее ± SD)	Группа 3 (Среднее ± SD)	Пороговые значения (без подготовки / с подготовкой)
Индекс Tanaka (%)	1,74% ± 1,60%	10,79% ± 17,06%	<10 %; 10–20 % – вероятно необходимость релаксации;
Defect Ratio (%)	8,30% ± 1,66%	15,64% ± 3,54%	<10 %; 10–20 % – требуется мобилизация тканей/релаксация
Индекс разделения компонентов (CSI)	0,108 ± 0,032	0,175 ± 0,036	>0,15 – вероятно необходимость сепарационной пластики/релаксации; >0,20 – высокая вероятность

Анализ производных морфометрических индексов в группе 3 показал обоснованную необходимость дооперационной подготовки, учитывая высокий риск невозможности закрытия грыжевого дефекта без натяжения.

В рамках исследования проведён сравнительный статистический анализ между 3 группой пациентов (претенденты на дооперационную подготовку - введение БТ-А) и пациентами, у которых данное вмешательство не проводилось (группы 1 и 2). Для оценки различий между группами применялись параметрический t-критерий Стьюдента и непараметрический U-критерий Манна—Уитни. Полученные результаты свидетельствуют о наличии статистически значимых различий по ключевым морфометрическим параметрам, включая коэффициент дефекта (Defect ratio, $p < 0,001$), индекс разделения компонентов (CSI, $p < 0,001$), а также долю удаляемого сегмента (введённую в качестве альтернативы индексу Tanaka; $p < 0,001$).

Дополнительно выполнен корреляционный анализ с использованием коэффициента Спирмена, по результатам которого установлены прочные положительные связи между назначением введения БТ-А и следующими показателями: коэффициент дефекта ($r = 0,78$), индекс разделения компонентов ($r = 0,76$) и доля удаляемого сегмента ($r = 0,78$).

Индекс «доля удаляемого сегмента» продемонстрировал потенциал в качестве предикторного показателя при обосновании показаний к дооперационному введению БТ-А, сопоставимый по значимости с ранее используемыми морфометрическими индексами.

Структура мышечно-апоневротического слоя пациентов с вентральными грыжами и здоровых лиц изучалась с использованием количественных морфометрических параметров, полученных по данным компьютерной томографии.

Статистический анализ площади мышечной ткани с обеих сторон переднебоковой стенки живота продемонстрировал значимые межгрупповые различия ($p < 0,001$).

У здоровых пациентов медианное значение площади мышц справа составляло $198,49 \text{ см}^2$ [160,00; 209,02], во второй группе – $232,69 \text{ см}^2$ [218,33; 246,21], а в третьей группе – $310,22 \text{ см}^2$ [299,08; 322,58]. Аналогичные различия наблюдались при анализе площади мышц слева ($186,82 \text{ см}^2$ [158,00; 201,72] у здоровых, $220,69 \text{ см}^2$ [212,57; 227,89] у W2 и $289,35 \text{ см}^2$ [278,55; 300,46] у W3) (таблица 19).

Средняя длина сегментов мышечно-апоневротического слоя (R и L) была минимальной у здоровых пациентов (R: $14,72 \text{ см}$ [13,25; 15,50], L: $14,51 \text{ см}$ [13,00; 15,90]) (рисунок 4).

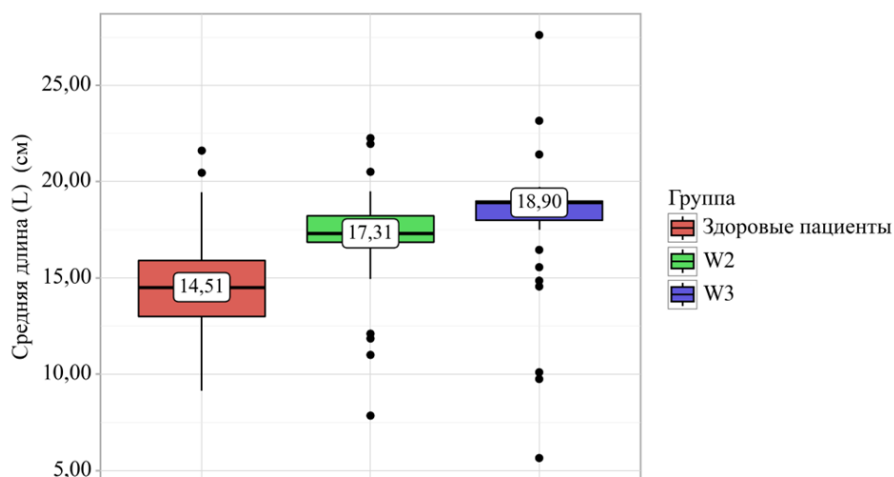


Рисунок 4 – Анализ средней длины мышц ПБС слева в зависимости от группы пациентов

И увеличивалась в группах W2 (R: 16,94 см [16,63; 17,50], L: 17,31 см [16,86; 18,23]) и W3– (R: 18,09 см [17,84; 18,34], L: 18,90 см [17,98; 18,98], $p < 0,001$) (рисунок 5).

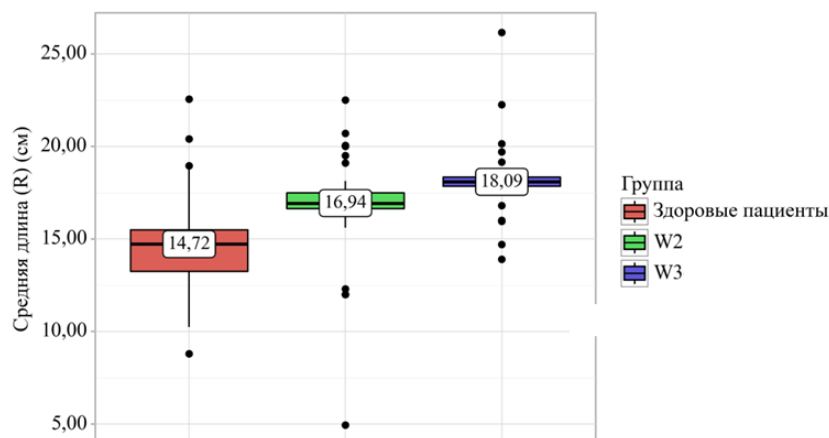


Рисунок 51 – Анализ средней длины мышцы ПБС справа в зависимости от группы пациентов

Плотность мышц справа не различалась между исследуемыми группами ($p = 0,187$). В то же время для мышц слева выявлены статистически значимые межгрупповые различия: между контрольной группой и группой W2 ($U = 946.0$, $p = 0.009$), а также между контрольной группой и группой W3 ($U = 889.0$, $p = 0.043$). Это указывает на то, что именно показатель плотности мышц слева имеет диагностическую значимость для дифференциации групп (рисунок 6).

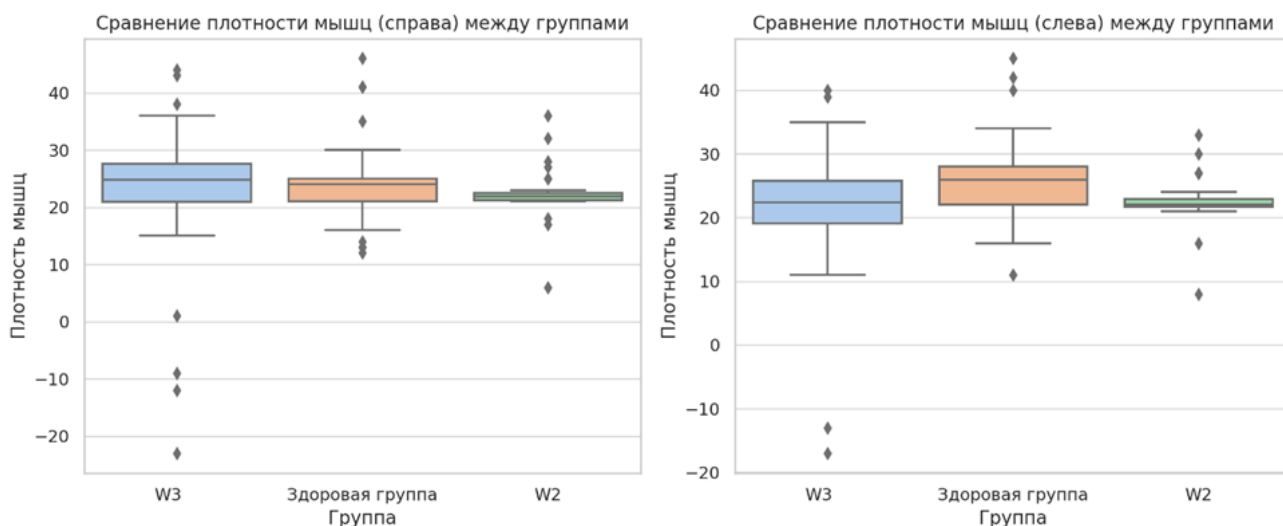


Рисунок 6 – Анализ плотности мышц в зависимости от группы сравнения

Для оценки различий в площади мышц между правой и левой сторонами в каждой из исследуемых групп был применен тест Манна-Уитни.

В первой группе (здоровые) статистически значимых различий в площади МАС не выявлено ($U = 1211.25$, $p = 0.109$), что подтверждает симметричность площади мышц в норме (рисунок 31). Во второй группе ($U = 615.0$, $p = 0.059$) различия находятся

на грани статистической значимости, однако не достигают порогового значения $p < 0.05$ (рисунок 31). В третьей группе (W3) выявлены значимые различия между сторонами ($U = 665$, $p = 0.0096$): площадь мышц справа оказалась достоверно ($p < 0.05$) меньше по сравнению с левой стороной, что указывает на выраженную асимметрию (рисунок 7).

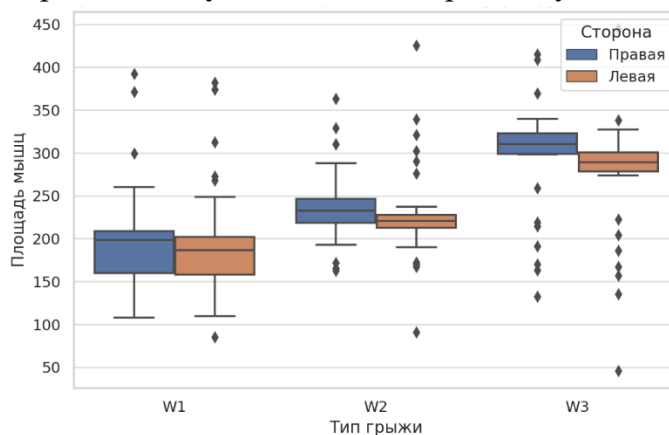


Рисунок 7 – Анализ площади мышц в зависимости от группы пациентов

Так же для оценки различий в толщине и средней длине мышц между правой и левой сторонами в каждой из исследуемых групп был применен тест Манна-Уитни. Анализ показал, что различия в этих параметрах варьируются в зависимости от группы. В группе W3 выявлены статистически значимые различия как по толщине мышц ($U = 694.5$, $p = 0.0026$), так и по средней длине мышц ($U = 332.0$, $p = 0.037$). При этом толщина мышц справа оказалась достоверно меньше по сравнению с левой стороной, тогда как средняя длина мышц, напротив, была больше справа. Это указывает на выраженную асимметрию мышечно-апоневротического слоя в группе W3 (рисунок 8).

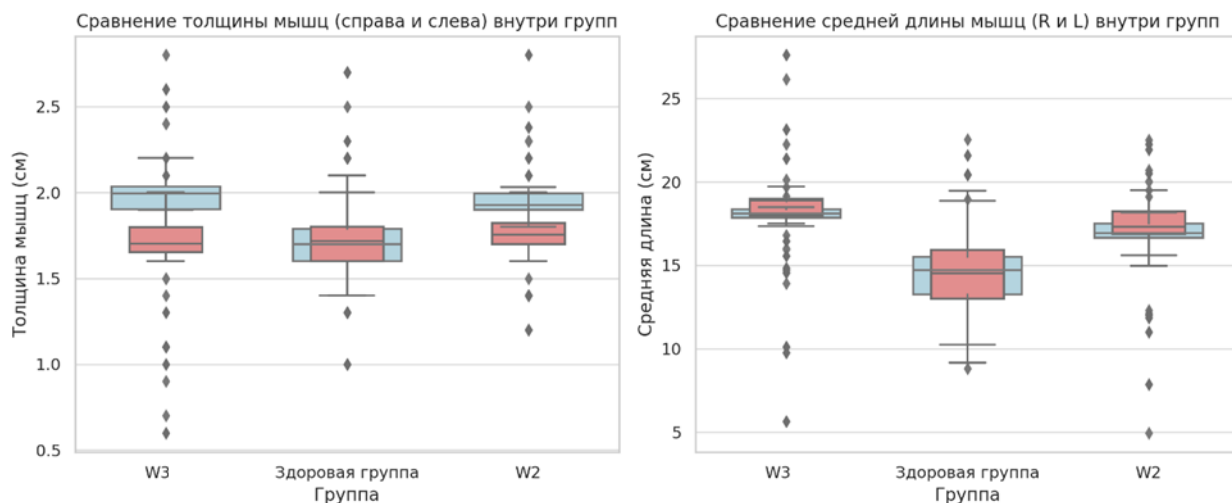


Рисунок 8 – Анализ толщины мышц в зависимости от группы сравнения

В здоровой группе различия между правой и левой сторонами не достигли статистической значимости ни по толщине мышц ($U = 928.0$, $p = 0.496$), ни по средней длине ($U = 1102.0$, $p = 0.473$), что свидетельствует о симметричности параметров в данной группе.

В группе W2 обнаружены значимые различия в толщине мышц между правой и

левой сторонами ($U = 705.0$, $p = 0.0016$), однако различия по средней длине мышц статистически значимыми не являются. В здоровой группе выявлены статистически значимые различия в плотности мышц справа и слева ($U = 744.0$, $p = 0.030$). В группах W2 и W3 различия между сторонами не достигли статистической значимости (рисунок 9).

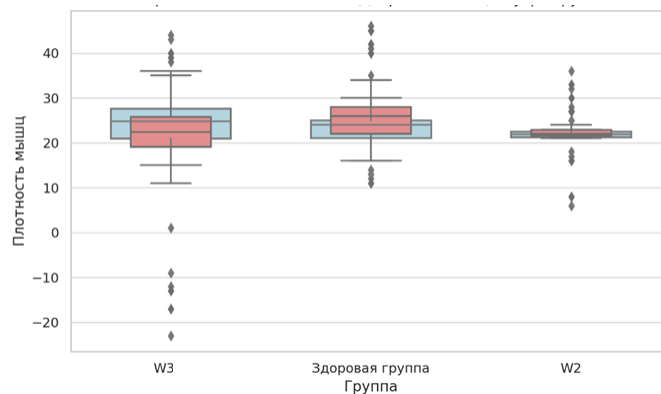


Рисунок 9– Анализ плотности мышц в зависимости от группы пациентов

Текстурный анализ мышечно-апоневротического слоя по данным КТ

Анализ плотности серого (средней яркости пикселей) на КТ-масках сегментированных мышц показал, что в группе 1 (здоровые) значения были наибольшими (right_mean_gray – 116.41, left_mean_gray – 117.82), что отражает более светлое отображение мышечной ткани на изображениях и может свидетельствовать о меньшей плотности тканей. В группе 3 (ПОВГ W3) зарегистрированы наиболее тёмные маски (106.46 / 107.82), что указывает на возможное повышение плотности тканей или фиброзные изменения. Группа 2 (ПОВГ W2) занимает промежуточное положение (115.14 / 114.89), отражая переходный характер изменений в мышечно-апоневротическом слое переднебоковой стенки живота (рисунок 10).

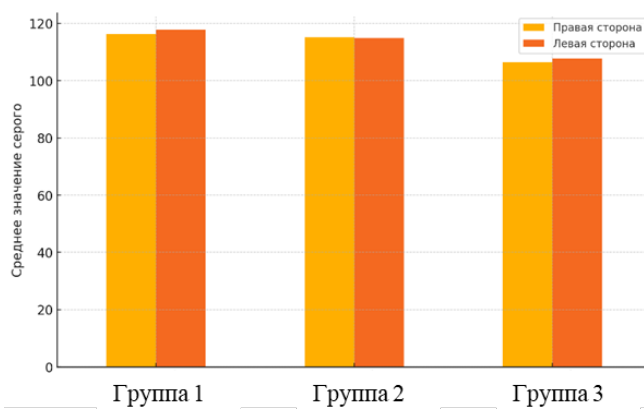


Рисунок 10 – График распределения уровня серого (плотность серого в масках) по группам

Анализ текстур показал, что показатель вейвлет-энергии значимо различался между группами (ANOVA: $p < 0.0001$; критерий Крускала–Уоллиса: $p < 0.0001$) (рисунок 35). Пост-хок тест Тьюки подтвердил наличие значимых различий между

группами 1 и 2 ($p < 0.0001$), а также между группами 2 и 3 ($p < 0.0001$), тогда как между группами 1 и 3 статистически значимых различий не выявлено ($p = 0.3279$) (рисунок 11).

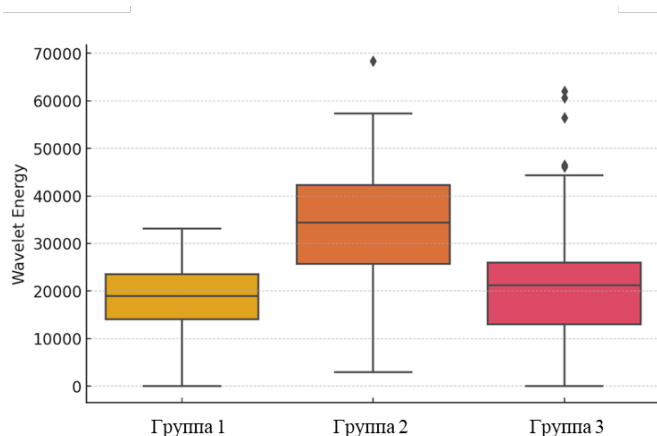


Рисунок 11 – Показатель вейвлет между группами, характеризующий пространственную неоднородность тканей МАС ПБСЖ

Результаты указывают на то, что структура мышц в группе W3 (группа 3) по своим характеристикам ближе к нормальной ткани (группа 1), чем к группе W2 (группа 2).

Показатели вейвлет-анализа в работе отражают пространственную неоднородность и выраженность структурных изменений мышечной ткани на различных частотных уровнях изображения, а выявленные различия свидетельствуют об утрате однородной текстуры мышцы и формировании зон фиброза и жировой дегенерации при вентральных грыжах.

Метод Габор-фильтрации также выявил значимые различия между группами (ANOVA: $p < 0.0001$, Крускала-Уоллиса: $p < 0.0001$) (рисунок 12).

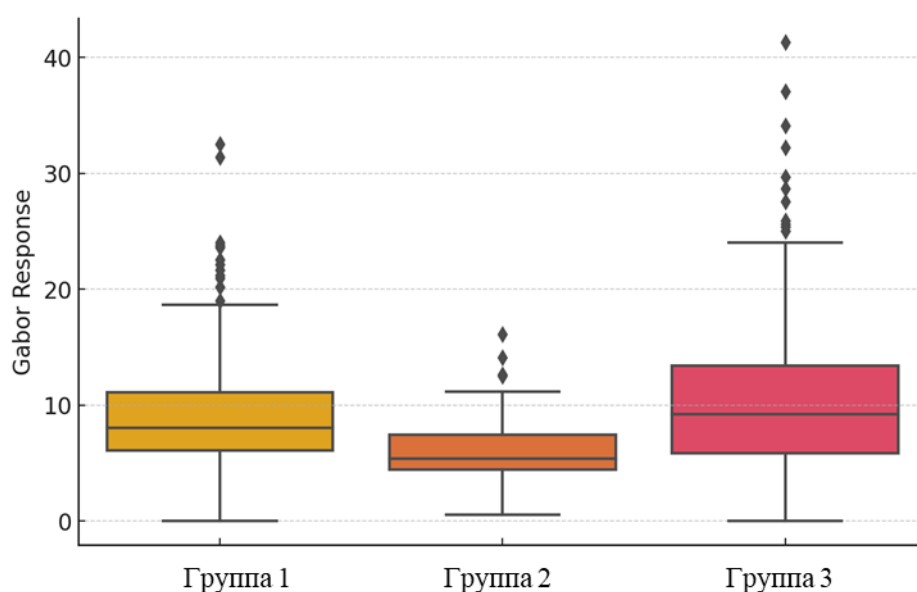


Рисунок 12 – Показатель Габор-фильтрации между группами

Различия между группами 1 и 2 оказались статистически значимыми ($p < 0.0001$), в то время как различия между группами 1 и 3 не достигли статистической значимости ($p = 0.0801$).

Показатели Габор-фильтрации отражают ориентацию и пространственную организацию мышечных волокон; полученные результаты указывают на то, что структура мышц в группе 3 демонстрирует тенденцию к сближению с нормальной тканью, в отличие от выраженных изменений, характерных для группы 2. Полученные данные свидетельствуют в пользу тенденции к нормализации структуры мышц или ассимиляции в сложившейся клинической картине в группе 3.

Сравнение правой и левой стороны внутри групп выявило значимые различия в группе 3 по параметру contrast ($p = 0.00015$), что может свидетельствовать об асимметричных изменениях тканей. В группе 1 установлено различие по correlation ($p = 0.033$), отражающее особенности структуры мышц. В группе 2 статистически значимых различий между сторонами не выявлено ($p > 0.05$), что указывает на симметричность тканей в данной группе.

Анализ морфометрических параметров для предсказания проведения введения БТ-А с использованием методов машинного обучения

С целью определения наибольшего влияния отдельных признаков на принятие решения о назначении введения БТ-А был применён алгоритм Random Forest. Согласно полученным результатам, ведущими по информативности оказались: коэффициент дефекта (Defect ratio – 0,28), индекс разделения компонентов (0,26) и доля удаляемого сегмента (0,25) (рисунок 13).

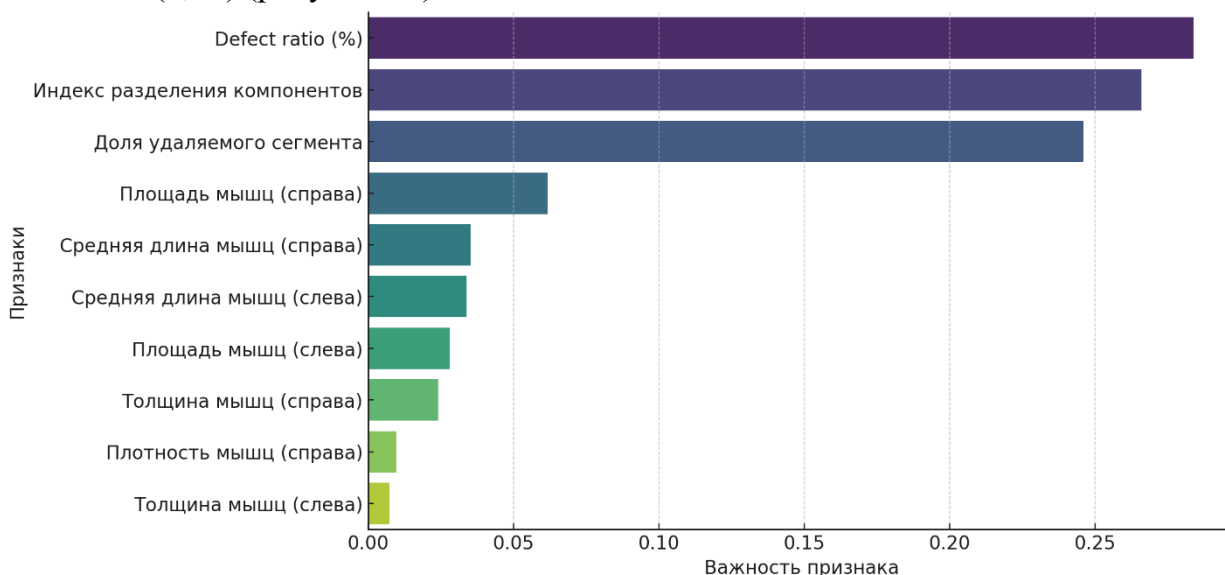


Рисунок 13 – Топ 10 - значимых признаков по Random Forest

Для выявления однородных подгрупп пациентов была проведена кластеризация с применением алгоритмов машинного обучения K-Means и DBSCAN. Использование метода K-Means позволило выделить три кластера (рисунок 14).

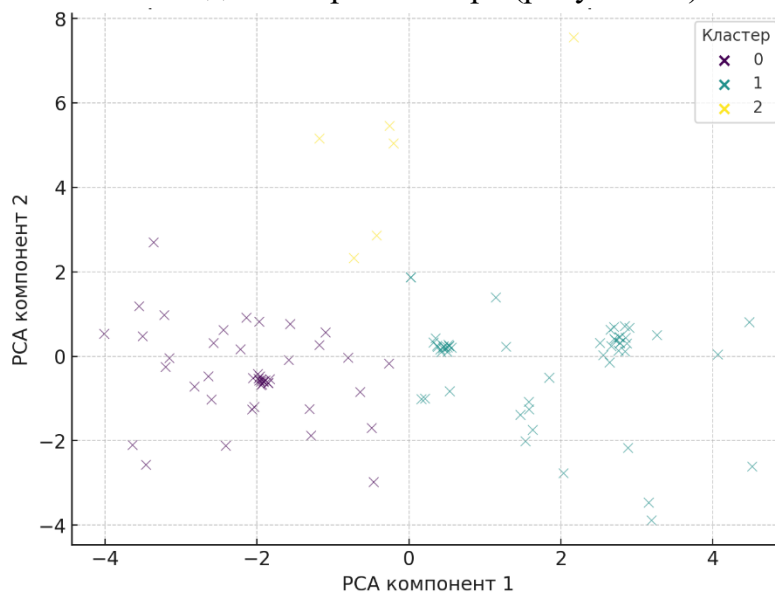


Рисунок 14 – Распределение пациентов по кластерам (K-Means), свидетельствующие о том, что выделенные группы обладают различным клиническим профилем

Анализ кластерной структуры, полученной с использованием алгоритма K-Means, показал, что во втором кластере введение БТ-А была назначена в 83% случаев, тогда как в нулевом кластере ни одному пациенту данное вмешательство не проводилось. В первом кластере частота назначения введения БТ-А составила 47%, что свидетельствует о гетерогенности данной группы. Полученные результаты подтверждают способность алгоритма K-Means дифференцировать пациентов с высокой вероятностью назначения введения БТ-А на основе совокупности морфометрических и клинико-анатомических параметров.

Алгоритм DBSCAN позволил выделить плотные кластеры пациентов с однородными характеристиками, при этом часть наблюдений не была отнесена ни к одной группе, что указывает на наличие атипичных клинических профилей.

В дополнение к кластерному анализу была построена модель логистической регрессии, направленная на *прогнозирование необходимости применения введения БТ-А* на основании совокупности изученных параметров. Построенная модель логистической регрессии продемонстрировала высокую точность классификации (86%) и отличные прогностические характеристики, подтверждённые значением площади под кривой ошибок (AUC-ROC = 0,95), что указывает на высокую дискриминирующую способность модели.

Согласно результатам анализа метрик качества, модель продемонстрировала высокую точность (88%) и полноту (93%) при классификации пациентов, не нуждающихся в дооперационное введение БТ-А, что свидетельствует о её высокой надёжности в отношении данной категории. В то же время, при идентификации

пациентов, для которых введение БТ-А была показана, точность составила 83%, а полнота – 71%, что указывает на наличие ложноотрицательных предсказаний.

Анализ F1-меры продемонстрировал, что наилучший баланс между правильной классификацией пациентов (точность) и способностью выявлять всех нуждающихся в вмешательстве (полнота) достигается при пороговом значении вероятности модели около 0,6. В этой точке модель показывает максимальное значение F1-score, что соответствует оптимальному соотношению чувствительности и специфичности.

Данные, представленные в матрице ошибок (рисунок 15), показывают, что модель уверенно распознаёт пациентов, которым не требуется введение БТ-А. Однако точность при определении пациентов, для которых такая процедура действительно показана, остаётся ограниченной.

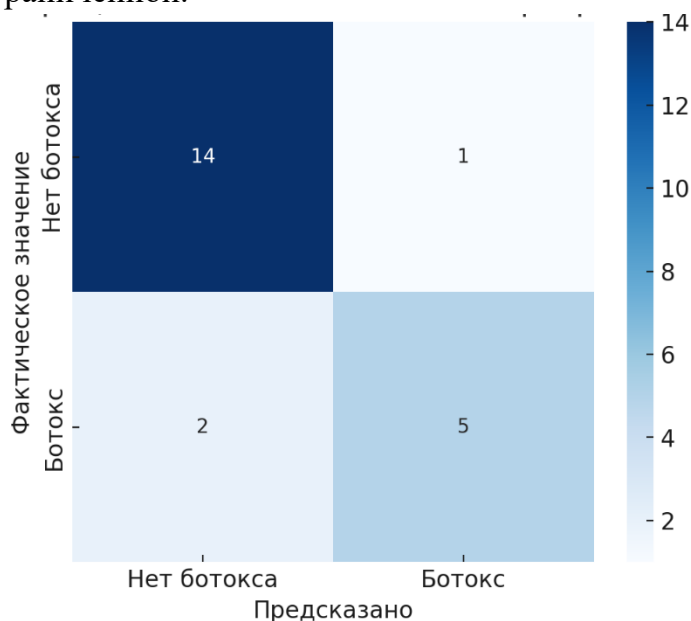


Рисунок 15 – Матрица ошибок

Матрица ошибок отражает, сколько пациентов модель правильно отнесла к группе без показаний к введению БТ-А и сколько – к группе с показаниями. Тёмные квадраты показывают правильные предсказания, светлые – ошибки. Видно, что модель лучше работает для пациентов без показаний, но хуже распознаёт тех, кому БТ-А действительно нужен.

Заключение

Выполненное исследование позволило провести комплексную количественную оценку состояния мышечно-апоневротического слоя передней брюшной стенки у пациентов с послеоперационными вентральными грыжами категорий W2 и W3 на основе данных компьютерной томографии. Установлено закономерное нарастание объёма грыжевого мешка от 154 см³ (W2) до 589 см³ (W3). Эти изменения сопровождались увеличением окружности брюшной стенки и угла расхождения прямых мышц, что отражает прогрессирование деформации переднебоковой стенки живота.

Впервые продемонстрирована диагностическая значимость площади

поверхности брюшной полости и доли удаляемого сегмента: в группе W3 она достигала 6,3%, что значительно превышает показатели контрольной группы (1,4%) и подчёркивает необходимость дооперационной подготовки. Производные морфометрические индексы также показали высокую прогностическую ценность: индекс CSI составил 0,175 при W3 против 0,108 при W2, а Defect Ratio увеличивался с 8,3% до 15,6%. Эти данные подтверждают обоснованность использования дооперационной подготовки, включая введение ботулинического токсина типа А в широкие мышцы передней брюшной стенки.

Анализ состояния мышечно-апоневротического слоя выявил у пациентов группы W3 выраженную асимметрию площади и толщины мышц справа и слева, а также снижение плотности мышечной ткани. Текстуальный анализ подтвердил патологическую неоднородность мышечной структуры: в группе W2 изменения были наиболее выраженными, тогда как показатели группы W3 демонстрировали относительную стабильность и сближение с данными контрольной группы, что может отражать компенсаторные процессы.

Применение алгоритмов машинного обучения (Random Forest, логистическая регрессия, кластеризация) позволило построить прогностическую модель высокой точности (AUC до 0,95) и выделить наиболее информативные признаки для обоснования назначения БТ-А: Defect Ratio, CSI и долю удаляемого сегмента. Кластерный анализ показал различную вероятность применения БТ-А в выделенных подгруппах (от 0% до 83%), что подтверждает потенциал алгоритмов ИИ для стратификации пациентов и персонализации дооперационной подготовки.

Таким образом, исследование впервые продемонстрировало возможность интеграции морфометрического и текстурного анализа КТ-изображений с методами машинного обучения для объективизации показаний к дооперационной подготовки, в т.ч. введению ботулинического токсина типа А у пациентов с ПОВГ категории W3. Полученные результаты расширяют представления о морфофункциональных изменениях переднебоковой стенки живота при послеоперационных вентральных грыжах и могут служить основой для совершенствования хирургической тактики.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный протокол позволяет выполнить количественный анализ состояния мышц переднебоковой стенки живота на основе данных компьютерной томографии, включающий морфометрические и текстурные признаки. Выделенные информативные показатели отражают степень ремоделирования мышечной ткани и позволяют обоснованно подходить к выбору оперативного доступа и необходимости дооперационной подготовки для адекватной мобилизации тканей.
2. У пациентов с ПОВГ W3, по сравнению с категорией W2 и контрольной группой, выявлены достоверные различия в морфометрических характеристиках. Так, объём грыжевого мешка увеличивался от $121,83 \pm 44,41 \text{ см}^3$ при W2 до $619,28 \pm 83,60 \text{ см}^3$ при W3 ($p < 0,001$), окружность брюшной стенки – с $63,00 \pm 3,00 \text{ см}$ в контроле до $79,26 \pm 1,17 \text{ см}$ при W3 ($p < 0,001$). Показатель доли удаляемого

сегмента в группе W3 достигал $6,27 \pm 0,34$ % против $1,47 \pm 0,17$ % в контроле ($p < 0,001$). Анализ симметричности показал, что в контрольной группе различия между правой и левой сторонами по площади и длине латеральных мышц отсутствовали ($p > 0,05$), что отражает нормальное сбалансированное состояние мышечно-апоневротического каркаса. В группе W2 выявлены начальные признаки асимметрии, проявлявшиеся увеличением длины и снижением площади мышц справа по сравнению с левой стороной ($p < 0,05$). Наиболее выраженная асимметрия зарегистрирована у пациентов категории W3: площадь и длина латеральных мышц достоверно различались между правой и левой сторонами ($U = 665$; $p = 0,0096$). Таким образом, для пациентов с ПОВГ категории W3 характерны выраженные морфометрические различия и нарастающая асимметрия мышечно-апоневротического каркаса.

3. При межгрупповом сравнении асимметрия у пациентов с ПОВГ категории W3 оказалась достоверно более выраженной, чем у пациентов с W2 ($p < 0,01$), и существенно отличалась от симметричного профиля контрольной группы ($p < 0,001$). Эти данные указывают на прогрессирующую потерю опорной и стабилизирующей функции переднебоковой стенки живота в условиях увеличивающегося дефекта и хронической утраты домена. Такие изменения свидетельствуют о нарушении опорной функции переднебоковой стенки живота и должны учитываться при выборе объема хирургической коррекции и дооперационной подготовке.
4. По результатам проведенного текстурного анализа по данным КТ выявлено, что у пациентов контрольной группы мышечная ткань характеризовалась высокой однородностью и низкими значениями контрастности ($p > 0,05$ между правой и левой сторонами), что отражает нормальное симметричное строение мышечно-апоневротического слоя. У пациентов с ПОВГ категории W2 выявлены наиболее выраженные признаки патологического ремоделирования: достоверное снижение показателей однородности и рост контрастности ($p < 0,01$ по сравнению с контролем), а также усиление внутригрупповой асимметрии по ряду текстурных метрик. Это указывает на дезорганизацию структуры мышечной ткани, соответствующую ранним стадиям патологического процесса. В группе W3 структура мышц имела иные характеристики: ряд параметров (вейвлет- и габор-признаки) не различались между сторонами ($p > 0,05$) и сближались со значениями контрольной группы, в то время как часть показателей оставалась изменённой по сравнению с W2 ($p < 0,05$). Такая картина интерпретируется как феномен вторичной стабилизации, возникающий в условиях хронической утраты домена и длительной адаптации к изменённой биомеханике переднебоковой стенки. Сравнительный анализ показал, что пациенты группы W2 демонстрировали наибольшую степень текстурной дезорганизации по сравнению с W3 ($p < 0,05$) и контролем ($p < 0,001$), тогда как в группе W3 изменения носили более «стабилизированный» характер и частично приближались к норме. Эти особенности следует учитывать при выборе метода реконструкции и при

обосновании необходимости дооперационной подготовки.

5. На основании проведённого анализа установлено, что наиболее информативными морфометрическими метриками для прогнозирования необходимости дооперационного введения ботулинического токсина у пациентов с ПОВГ категории W3 являются Defect Ratio ($15,64 \pm 3,54$ %), Component Separation Index ($0,175 \pm 0,036$) и доля удаляемого сегмента ($6,26$ % [$5,93$ – $6,60$]). Эти показатели достоверно отличались от значений в группе W2 (Defect Ratio – $8,34 \pm 2,71$ %, CSI – $0,108 \pm 0,029$, доля удаляемого сегмента – $3,14$ % [$2,88$ – $3,35$]; $p < 0,001$), что подчёркивает их прогностическую значимость в клинической стратификации пациентов. Применение алгоритмов машинного обучения позволило подтвердить ключевую роль этих признаков.
6. Модель логистической регрессии обеспечила AUC-ROC = 0,95 и точность классификации 86 %, алгоритм Random Forest выделил наибольший вклад Defect Ratio (0,28), CSI (0,26) и доли удаляемого сегмента (0,25) в построение прогноза. Кластеризация методом K-Means продемонстрировала наличие подгрупп пациентов с различной вероятностью назначения БТ-А: от 0 % в одном кластере до 83 % в другом. Таким образом, внедрённый алгоритм искусственного интеллекта продемонстрировал высокую прогностическую эффективность и позволил объективизировать показания к дооперационному введению БТ-А у пациентов с ПОВГ категории W3. Его применение может служить основой для персонализированной стратификации пациентов и стандартизации тактики хирургической подготовки.

Практические рекомендации

1. Для объективизации состояния мышечно-апоневротического слоя у пациентов с ПОВГ категории W3 необходимо использовать протокол количественной оценки на основе КТ с расчётом исходных и производных морфометрических параметров, индексов (Defect Ratio, CSI, доля удаляемого сегмента).
2. При планировании дооперационной подготовки рекомендуется учитывать выявленную асимметрию между правой и левой сторонами переднебоковой стенки живота, что обосновывает необходимость дифференцированного введения ботулинического токсина типа А с учётом степени ретракции мышц.
3. Дооперационное введение ботулинического токсина типа А целесообразно при превышении пороговых значений морфометрических индексов, отражающих выраженность ремоделирования переднебоковой стенки: Defect Ratio > 12–15 %, CSI > 0,15, доля удаляемого сегмента > 5 %.
4. Текстурный анализ мышечной ткани рекомендуется использовать для разграничения стадии активного ремоделирования (характерной для ПОВГ W2) и вторичной стабилизации (характерной для W3), что должно учитываться при выборе метода реконструкции и дооперационной подготовки.
5. Для стратификации пациентов и прогнозирования показаний к введению ботулинического токсина целесообразно применять алгоритмы машинного обучения (логистическая регрессия, Random Forest, кластеризация).

6. Внедрение комплексного протокола оценки, включающего морфометрию, текстурный анализ и прогнозирование на основе ИИ, в клиническую практику позволяет исключить субъективность при принятии решений, стандартизировать дооперационную подготовку и повысить эффективность хирургического лечения пациентов с ПОВГ категории W3.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективы дальнейших исследований связаны с внедрением методов радиомикки для углублённого анализа КТ-изображений мышечно-апоневротического слоя, что позволит формировать более широкий спектр количественных признаков, характеризующих структурные и функциональные изменения при послеоперационных вентральных грыжах. Дополнительное развитие полученных результатов предполагает создание и валидацию многофакторных прогностических моделей на основе интеграции морфометрических, текстурных и радиомических показателей с клиническими данными. Такие модели могут повысить точность стратификации риска, объективизировать показания к различным вариантам дооперационной подготовки, включая введение ботулинического токсина, и способствовать персонализации хирургической тактики у пациентов с ПОВГ категории W3.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Канахина Л.* Сравнительный анализ методик неинвазивного измерения объема брюшной полости / Канахина Л.Б., Протасов А.В., Мазурова О. И., Топчиев А. М., Навид М.Н.// Доказательная гастроэнтерология. – 2024. – 13(3). – С. 50-59.
2. *Канахина Л.* Сравнение методик КТ-абдоменометрии для определения объема брюшной полости / Канахина Л.Б., Протасов А.В., Мазурова О. И.// Диагностическая и интервенционная радиология. – 2024. – Т.18, №S1.1. – С.61.
3. *Канахина Л.* Ретроспективный анализ с использованием машинного обучения и поиска значимых КТ- признаков для оптимизации предоперационной подготовки пациентов с большими и гигантскими послеоперационными вентральными грыжами/ А.В. Протасов, Л.Б. Канахина, О.И. Мазурова, А.П. Чорбаджи// Московский хирургический журнал. – 2025. – № 1. – С. 50-57. <https://doi.org/10.17238/2072-3180-2025-1-50-57>
4. *Канахина Л.* Ремоделирование мышечного слоя брюшной стенки у пациентов с послеоперационной вентральной грыжей/ Л.Б., Протасов А.В., Мазурова О.И. // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. – 2025. - №4. – С. 46–52.
5. *Канахина Л.* Использование методики неинвазивного измерения объема брюшной полости/ Канахина Л.Б., Мазурова О.И. // Молодежный инновационный вестник. – 2024. – Т.13. - №1. – С. 14-20

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МЫШЦ ПЕРЕДНЕЙ БРЮШНОЙ СТЕНКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ПРЕДОПЕРАЦИОННОЙ ПОДГОТОВКЕ У ПАЦИЕНТОВ С ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОЙ ВЕНТРАЛЬНОЙ ГРЫЖЕЙ W3

Канахина Лия (Казахстан)

В диссертационной работе представлены приоритетные данные, расширяющие современные представления о морфофункциональных изменениях мышечно-апоневротического слоя переднебоковой стенки живота у пациентов с послеоперационными вентральными грыжами категории W3 на основании комплексного морфометрического и текстурного анализа данных компьютерной томографии. Выявлены морфометрические и текстурные предикторы выраженных дегенеративных изменений мышечно-апоневротического слоя переднебоковой стенки живота, разработана прогностическая модель для определения показаний к дооперационному введению ботулинического токсина. Предложен объективный способ количественной оценки состояния передней брюшной стенки с использованием алгоритмов искусственного интеллекта. Дополнена концепция патогенеза послеоперационных вентральных грыж, в основе которой лежат асимметрия и снижение плотности мышц, формирование структурной неоднородности и уменьшение эластичности тканей. Разработан алгоритм дооперационной подготовки пациентов с ПОВГ категории W3, основанный на стратификации по результатам прогностической модели и дифференцированном выборе тактики хирургического лечения.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE–BASED ANALYSIS OF THE ABDOMINAL WALL MUSCLES FOR PREHABILITATION OF PATIENTS WITH POSTOPERATIVE VENTRAL HERNIA W3

Kanakhina Liya (Kazakhstan)

The dissertation presents priority data expanding current knowledge of the morphofunctional alterations of the musculo-aponeurotic layer of the anterior abdominal wall in patients with postoperative ventral hernia category W3, based on comprehensive morphometric and textural analysis of computed tomography data. Morphometric and textural predictors of pronounced degenerative changes in the muscles and aponeurosis were identified, and a prognostic model was developed to determine indications for prehabilitation with botulinum toxin type A. An objective method of quantitative assessment of the abdominal wall condition using artificial intelligence algorithms is proposed. The concept of the pathogenesis of postoperative ventral hernia has been supplemented, highlighting asymmetry and reduced muscle density, structural heterogeneity, and loss of tissue elasticity. An algorithm for prehabilitation of patients with postoperative ventral hernia category W3 has been developed, based on risk stratification according to the prognostic model and differentiated selection of surgical treatment strategies.