

На правах рукописи

**Королева
Елена Антоновна**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
ГУБЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ У ЛИЦ
ЗРЕЛОГО ВОЗРАСТА**

3.3.1. – Анатомия и антропология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Волгоград – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Научный руководитель:

Довгялло Юлия Викторовна – доктор медицинских наук, доцент

Официальные оппоненты:

Гайворонский Иван Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации, заведующий кафедрой нормальной анатомии.

Удочкина Лариса Альбертовна – доктор медицинских наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, заведующий кафедрой анатомии.

Ведущая организация:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова (Сеченовский университет) Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Защита диссертации состоится «__» _____ 20__ г. в __ часов на заседании диссертационного совета 21.2.005.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации по адресу: 400066, г. Волгоград, пл. Павших Борцов, 1; и на сайте <http://www.volgmed.ru>

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной научной библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (400066, г. Волгоград, пл. Павших Борцов, 1; <http://www.volgmed.ru>)

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 21.2.005.01

доктор медицинских наук, доцент

Григорьева Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время одним из национальных проектов в сфере здравоохранения является проект «Продолжительная и активная жизнь», цель которого – увеличение к 2030 году ожидаемой продолжительности жизни населения до 78 лет, а к 2036 – до 81 года. В рамках данного проекта реализуются Федеральные проекты, направленные на борьбу с сердечно-сосудистыми, онкологическими заболеваниями и сахарным диабетом, а также меры, направленные на сохранение здоровья граждан. Остеопороз, остеоартроз, артриты и другая патология костной ткани различной локализации и этиологии приводит как к снижению качества жизни и ограничению подвижности, так и к стойкому снижению трудоспособности взрослого населения, а значит – к экономическим потерям государства (Белая Ж. Е. и соавт., 2021).

Данный факт обуславливает необходимость снижения частоты осложнений патологии костной ткани не только с точки зрения медицинской науки, общественного здоровья и здравоохранения, но и в контексте улучшения социально-экономических показателей. Внимание врачей и исследователей должно быть направлено, в первую очередь, на профилактику и раннюю доклиническую диагностику данных состояний, что позволит значительно снизить риск осложнений, а значит, улучшить качество жизни и здоровья каждого отдельно взятого пациента и общества в целом (Каприн А. Д. и соавт., 2017; Sollmann N. et al., 2020).

На сегодняшний день стремительное развитие цифровых технологий визуализации костной ткани, внедрение таких методов, как двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия, микрокомпьютерная томография, периферическая количественная компьютерная томография, магнитно-резонансная томография позволяют получать изображения костей высокого разрешения. При этом стандартное рентгенографическое исследование все еще рекомендуется экспертами для диагностики ряда патологических состояний скелета (Almhdie-Imjabbar A. et al., 2021).

Визуализационные методики позволяют получить представление о пространственном расположении костных трабекул, наличии между ними пространств – «лакун», косвенно оценить плотность костной ткани. Согласно современным представлениям, плотность кости – один из наиболее важных факторов, определяющих ее способность выдерживать физические воздействия и влияющих на риск развития низкоэнергетических переломов. Зачастую этот показатель количественно совпадает у пациентов с переломами и без них, что нацеливает на поиск новых численных, а значит, объективных критериев оценки состояния трабекулярной кости, которые могли бы дополнить существующие методы диагностики (Lambin P. et al., 2012).

Таковыми критериями могут служить некоторые показатели оценки классической МР-анатомии, такие, как авторские угловые значения поясничных позвонков и текстурные признаки рентгеновского изображения: матрица совпадений градаций серого (GLCM), уровни серого (оттенки серого, градации серого) – цветовой режим изображений, реализованный в виде таблицы (шкала серого, англ. Grayscale) с указанием яркости белого цвета для каждой точки (Weiner S. et al., 2024; Weygand J, et al., 2026).

Указанные характеристики позволяют количественно, то есть объективно, охарактеризовать пространственную геометрию трабекулярной кости, однако в настоящее время отсутствуют их численные критерии нормы, что существенно сдерживает развитие такого перспективного направления современной медицинской науки, как математическая рентгеновская морфология (Kuo T.R. et al., 2017; Van Timmeren J. E. et al., 2020).

Кроме этого, отсутствует единый подход к пред- и постпроцессорной обработке изображений, нет понимания того, какой именно набор текстурных признаков наиболее точно характеризует пространственную геометрию кости, как сегментировать изображение, чтобы выбор области интереса в наименьшей степени влиял на количественные показатели текстуры, что обуславливает актуальность и своевременность данного исследования.

Степень разработанности темы исследования

Текстурный анализ уже сейчас условно называют «виртуальной биопсией» (Varghese V. A. et al., 2023), однако его внедрение в практическую деятельность существенно сдерживается тем, что на полученные результаты могут влиять следующие факторы:

- области интереса, определяемые независимыми специалистами на медицинском изображении, не всегда совпадают, что может существенно влиять на полученные результаты (Chung R. et al., 2020),

- одно и то же исследование может быть выполнено на диагностических аппаратах разного класса, что также влияет на численные текстурные характеристики изображения (Mannil M. et al., 2018),

- определение показателей текстурного анализа может производиться при помощи разных лицензионных компьютерных программ, как платных, так и с открытым кодом доступа, однако вопрос о воспроизводимости полученных результатов в таком случае исследователями до сих пор не решен (Zhao B. et al., 2024).

В отечественной и зарубежной литературе описаны некоторые методологические подходы к диагностике опухолевых образований различных органов, очаговых и диффузных воспалительных процессов, структурных изменений костной ткани методами текстурного и фрактального анализа, однако в настоящий момент отсутствуют количественные критерии нормы показателей текстуры, что существенно

затрудняет внедрение математической рентгеновской морфологии в практическую медицину. Кроме этого, отсутствуют стандартизированные алгоритмы выполнения текстурного анализа различных медицинских изображений. Все вышесказанное приводит к низкой воспроизводимости полученных результатов и невозможности широкого применения текстурного анализа в диагностическом процессе (Liu X. et al., 2018; Telecan T. et al., 2022).

Изучение пределов применимости текстурных характеристик медицинских изображений позволит внедрить методы текстурного анализа в практику, тем самым решив одну из важнейших задач – объективизацию оценки структуры костной ткани с применением количественных критериев нормы.

Цель исследования: установить закономерности пространственной организации губчатого вещества поясничных позвонков в норме у лиц I и II периода зрелого возраста по данным магнитно-резонансной томографии.

Задачи исследования:

1. Определить анатомию угловых показателей губчатого вещества поясничных позвонков с учетом полового диморфизма у лиц I и II периода зрелого возраста в норме по данным магнитно-резонансной томографии.

2. Определить количественные характеристики МР-анатомии губчатого вещества поясничных позвонков у лиц разного пола I и II периода зрелого возраста в норме. Установить численные значения коэффициента структурной гетерогенности для использования в качестве предиктора рарефикации костной ткани у лиц разного пола зрелого возраста по данным магнитно-резонансной томографии.

3. Определить конкордантные текстурные признаки губчатого вещества тел поясничных позвонков и их количественные значения на магнитно-резонансных томограммах, выполненных на диагностических аппаратах разного класса и сегментированных независимыми диагностами.

4. Установить корреляционные связи между возрастом и показателями текстуры губчатого вещества тел поясничных позвонков в норме.

5. Разработать прогностическую модель для оценки губчатого вещества тел поясничных позвонков с помощью текстурного анализа радиомических данных.

Научная новизна

Впервые установлены значения анатомически значимых угловых показателей тел поясничных позвонков на магнитно-резонансных томограммах в норме с учетом гендерной принадлежности у лиц I и II периода зрелого возраста.

Впервые с помощью магнитно-резонансной томографии оценено губчатое вещество тел поясничных позвонков с применением

воспроизводимых текстурных параметров и установлены их количественные значения для использования в качестве численного эталона анатомической нормы. Установлены количественные значения указанных параметров для использования в качестве численного эталона анатомической нормы строения губчатого вещества тел поясничных позвонков.

Для оценки пространственной геометрии губчатого вещества тел поясничных позвонков лиц зрелого возраста в норме впервые на основе интенсивности сигнала от выбранной области определены величины коэффициента структурной гетерогенности.

Разработана прогностическая модель с использованием радиомических данных для оценки магнитно-резонансного изображения тел поясничных позвонков методом текстурного анализа, позволяющая охарактеризовать структурно-пространственную организацию губчатого вещества поясничных позвонков у лиц I и II периода зрелого возраста в норме.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость данной работы состоит в расширении представлений о текстурных характеристиках губчатого вещества костной ткани тел поясничных позвонков в норме и возможности применения метода текстурного анализа для характеристики пространственной геометрии губчатого вещества поясничных позвонков. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего теоретического изучения методов математической рентгеновской морфологии и прижизненной МР-анатомии с учетом половых и возрастных особенностей.

Полученные в данной работе результаты имеют практическое значение и могут быть использованы в качестве текстурного эталона анатомической нормы, а набор воспроизводимых показателей текстурного анализа – в качестве предикторов rarefакции костной ткани. Внедрение текстурного анализа в практическую деятельность врача, автоматизация процесса оценки текстуры медицинского изображения значительно улучшат диагностические возможности метода в объективной оценке строения костной ткани и позволят без использования специальной дорогостоящей медицинской аппаратуры диагностировать наличие или отсутствие отклонений от анатомической нормы.

Диссертационное исследование выполнено в рамках темы НИР кафедры анатомии, госрегистрация в системе ЕГИСУ № 121070800192-7 «Тканевые и клеточные реакции организма в норме и при воздействии эндо- и экзогенных факторов».

Методология и методы исследования

Многоцентровое исследование выполнено на базе кафедры анатомии ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет»,

отделения рентгенэндоваскулярной хирургии Института неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака (г. Донецк, РФ) и Государственного бюджетного учреждения здравоохранения Ставропольского края «Городская клиническая больница» г. Пятигорска (г. Пятигорск, РФ). На основании критериев включения и исключения были отобраны и изучены текстурные характеристики магнитно-резонансных томограмм губчатого вещества тел поясничных позвонков, выполненных в срединно-сагиттальной плоскости, восьмидесяти девяти обследуемых обоих полов. Объектом исследования стали магнитно-резонансные томограммы позвоночного столба, выполненные в срединно-сагиттальной плоскости, предметом – текстурные характеристики вышеуказанных объектов. Для решения поставленных задач были использованы компьютерные программы для определения показателей текстуры изображений с открытым кодом доступа: «LIFEх» v.25.06.1 5.0» и программа «ImageJ». Для статистической обработки полученных результатов: «StatMed» и «Статистика 10». Исследование было одобрено Локальным этическим комитетом (Справка №2025/015 от 14.03.2025).

Положения, выносимые на защиту

1. В качестве референтных показателей, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков на магнитно-резонансных томограммах, в дополнение к существующим методикам разработаны и использованы угловые параметры.

2. Пространственная организация губчатого вещества поясничных позвонков у лиц I и II периода зрелого возраста в норме по данным магнитно-резонансной томографии характеризуется половым диморфизмом и определяется с помощью количественных показателей текстурного анализа.

3. Конкордатными признаками, характеризующими губчатое вещество поясничных позвонков у лиц I и II периодов зрелого возраста в норме, обладающими наибольшей воспроизводимостью, являются следующие: асферичность, расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом, средняя интенсивность, медиана интенсивности, дисперсия интенсивности, компактность, сферическая диспропорция, смещение центра масс, сферический диаметр, эксцесс интенсивности.

4. Предложенная прогностическая модель оценки магнитно-резонансного изображения тел поясничных позвонков методами текстурного анализа позволяет установить закономерности структурно-пространственной организации губчатого вещества поясничных позвонков у лиц обоих полов I и II периодов зрелого возраста в норме.

Личный вклад

Автор совместно с научным руководителем определил план и разработал дизайн диссертационного исследования, осуществил поиск литературы по изучаемому вопросу. Диссертант провел отбор и

систематизацию первичного материала, осуществил предпроцессорную обработку анализируемых изображений, провел текстурный анализ, сгруппировал полученные результаты в базы данных для дальнейшей статистической обработки. Автором самостоятельно проведена статистическая обработка результатов исследования. Интерпретация результатов и формулировка выводов также принадлежат автору. Диссертант самостоятельно оформил рукопись научно-квалификационной работы. Автором исследования самостоятельно подготовлены и направлены в печать статьи по материалам диссертационной работы.

Внедрение результатов исследования в практику

Основные положения и результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры анатомии ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России, кафедры морфологии ПМФИ – филиала ФГБОУ ВО ВолгГМУ МЗ РФ, в лечебно-диагностический процесс консультативно-диагностического центра Института неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака Минздрава России, в лечебно-диагностический процесс отдела лучевой диагностики Государственного бюджетного учреждения здравоохранения Ставропольского края «Городская клиническая больница» г. Пятигорска.

Степень достоверности, апробация результатов

Достоверность полученных результатов и обоснованность сделанных выводов определяется достаточным количеством обследуемых объектов, применением адекватных и современных методов визуализации, а также использованием лицензионных программ текстурного анализа. Статистическая обработка полученных результатов проведена в соответствии с общепринятыми методиками при помощи лицензионной компьютерной программы StatMed.

Результаты исследования были представлены и обсуждены на конференции «Фундаментальные исследования в медицине и биологии», IV Дальневосточного международного медицинского конгресса (Хабаровск, 2023 г.), Международном морфологическом форуме «Сталинградская сирень» (Волгоград, 2024 г., 2025 г.), VIII Международном медицинском форуме Донбасса «Наука побеждать...болезнь» (Донецк, 2024 г.), Международной научно-практической конференции «Киндаровские чтения» (Грозный, 2024 г.), IX Всероссийском съезде анатомов, гистологов и эмбриологов России с международным участием (Оренбург, 2025 г.), Международном молодежном форуме «Медицинская наука без границ» (Ставрополь, 2025), Международной конференции «Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration» (Китайская Народная Республика, Пекин, 2024; 2025 г.), Всероссийской конференции «Актуальные проблемы и

тенденции развития современной фундаментальной и прикладной морфологии» (Рязань, 2026).

Соответствие паспорту научной специальности

Исследование соответствует группе научной специальности 3.3. Медико-биологические науки, паспорту специальности 3.3.1. – Анатомия и антропология, п. 2, 3, 6, 9.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011 и изложена на 183 страницах компьютерного текста, содержит 23 таблицы и 19 рисунков. Рукопись состоит из введения, обзора литературы, главы материала и методов исследования, полученных результатов, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 213 источников, из них 40 отечественных, 173 – зарубежных. Текст диссертации не сгенерирован нейросетью.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертационной работы было опубликовано 13 печатных работ, 6 из которых в журналах, входящих в перечень научных рецензируемых изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, получено свидетельство о регистрации базы данных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 представлен обзор литературы, в котором рассматривается анатомия позвоночного столба, современные представления о структурной организации губчатого вещества поясничных позвонков, методы прижизненной визуализации костной ткани, обосновывается клиническая значимость изучения позвоночника в контексте ухудшения качества жизни при остеопорозе и дегенеративно-дистрофических заболеваниях, а также подчеркивается необходимость количественной оценки пространственной организации костной ткани. Глава 2 посвящена описанию материала и методов исследования. Исследование многоцентровое, ретроспективное; проанализированы DICOM-серии магнитно-резонансных томограмм поясничного отдела позвоночного столба (срединно-сагиттальные срезы) без признаков структурной патологии, выполненные с соблюдением стандартного протокола исследования в период с ноября 2018 по август 2025 гг. в двух учреждениях: Институт неотложной и восстановительной хирургии

им. В.К. Гусака (г. Донецк) и ГБУЗ СК «Городская клиническая больница г. Пятигорска» (г. Пятигорск). Базы сформированы из исследований, выполненных на аппаратуре разного класса: 0,3 Т MPF-3000 (НПАО «АМИКО», РФ) и 1,5 Т SE Signa HDe (GE, США). Из 311 наборов магнитно-резонансных томограмм в исследование было включено 89 срединно-сагиттальных снимков. Обследуемые составили две возрастные группы: 45 обследуемых I периода зрелого возраста (23 мужчины, 22 женщины), 44 обследуемых II периода зрелого возраста (22 мужчины, 22 женщины).

На срединно-сагиттальных МР-срезах в интерактивной среде программы ImageJ (National Institute of Health, США) наносили анатомические маркеры, соответствующие передне-верхнему углу тела позвонка (точка 1), середине верхней замыкательной пластинки (точка 2), верхне-заднему углу тела позвонка (точка 3), вершине остистого отростка (точка 4); далее проводились референтные линии через: точки 1 и 2 (прямая 1); точки 3 и 2 (прямая 2); точки 3 и 4 (прямая 3). Кроме этого, проводились горизонтальные линии через: точку 1 (прямая 4) и точку 3 (прямая 5). При помощи инструмента «angle» определялись численные значения следующих углов: α – угол между прямыми 1 и 4 ($^{\circ}$), β – угол между прямыми 2 и 5 ($^{\circ}$), μ – угол между прямыми 1 и 2 ($^{\circ}$), λ – угол между прямыми 3 и 5 ($^{\circ}$) (Рисунок 1).

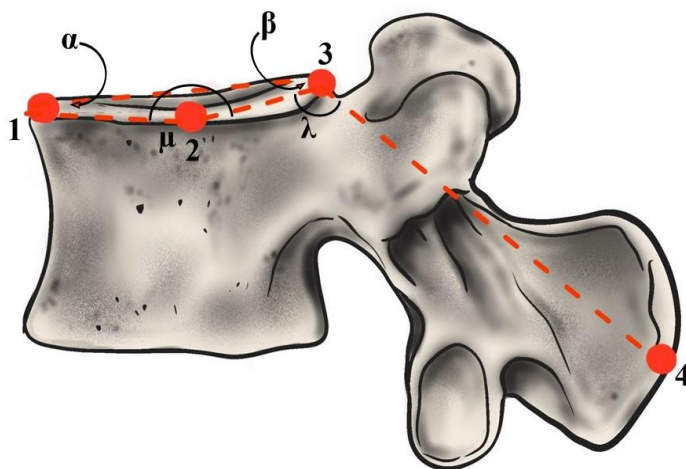


Рисунок 1. Схема морфометрической разметки поясничного позвонка

Текстурный анализ губчатого вещества поясничных позвонков проводился на магнитно-резонансных томограммах позвоночного столба, в интерактивной среде программы RadiAnt DICOM Viewer (Рисунок 2). Определялись и фиксировались следующие статистические характеристики интенсивности сигнала выбранной области: среднее значение, минимальное и максимальное значения, стандартное квадратичное отклонение, площадь выбранной области.



Рисунок 2. Определение характеристик интенсивности сигнала области интереса тела L_{IV} в интерактивной среде программы RadiAnt Dicom Viewer на магнитно-резонансной томограмме женщины А, 33 лет

Далее отдельно для каждого поясничного позвонка определялся коэффициент структурной гетерогенности (КСГ) по формуле:

$$\text{КСГ} = \frac{\text{квадратичное отклонение}}{\text{интенсивность сигнала}}$$

Среднее значение уровня серого выбранной зоны интереса в губчатом веществе тел третьего и четвертого поясничных позвонков, его минимальное и максимальное значения, значения асимметрии и эксцесса гистограммы распределения частот уровня серого определяли в интерактивной среде программы ImageJ (Рисунок 3).

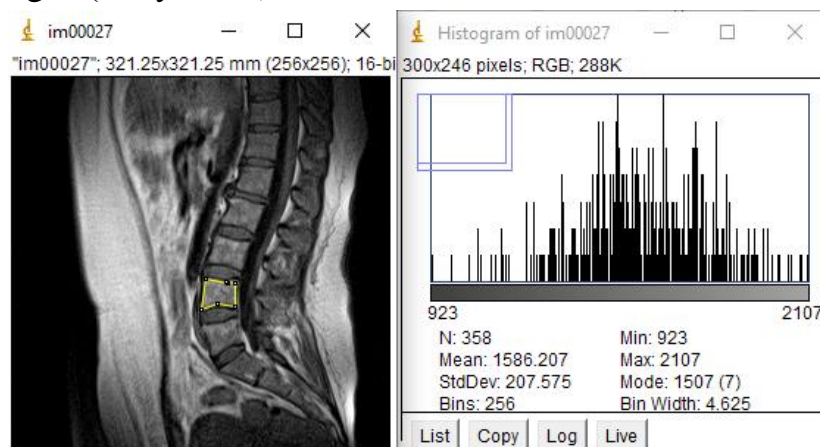


Рисунок 3. Гистограмма и некоторые статистические показатели уровня серого в выбранной области интереса (тело L_{IV}) у обследуемой 45 лет

На следующем этапе исследования в программе с открытым кодом доступа LIFE_x (версия v.25.06.1 5.0) (www.lifexsoft.org) выбиралась двумерная область интереса с помощью соответствующей функции программного обеспечения «Pencil 2D». С помощью встроенной функции

«Texture» определялись параметры текстурного анализа губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков. При этом контур ROI не затрагивал компактную кость, а в обводной контур включалось лишь губчатое вещество тел L_{III} и L_{IV} . Из доступного набора текстурных признаков программного продукта были отобраны 46, характеризующие морфологию и интенсивность сигнала выбранной области (Рисунок 4).

Воспроизводимость каждого признака оценивалась при помощи метода Блэнда-Алтмана, при этом коэффициент конкордации Кендалла рассчитывался для следующих сценариев:

1. Оценка воспроизводимости текстурных признаков при выборе области интереса двумя независимыми врачами-диагностами.
2. Оценка воспроизводимости текстурных признаков при выполнении сканирования на диагностических аппаратах разного класса.

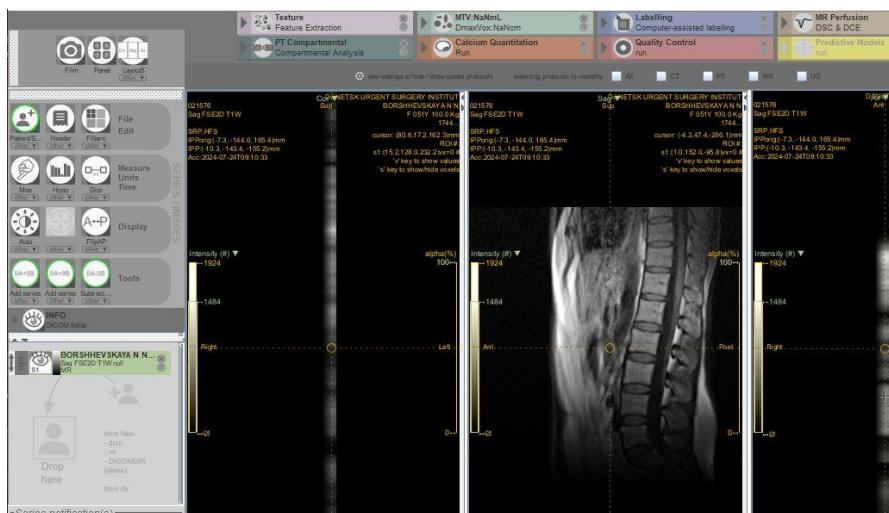


Рисунок 4. Интерфейс программы LIFEx с загруженной магнитно-резонансной томограммой позвоночного столба

Воспроизводимость текстурного признака оценивалась как очень высокая при значениях коэффициента конкордации 0,9 и выше, высокая – 0,7 и выше, низкая – менее 0,7. Для оценки необходимости постпроцессорной обработки МР-изображений, позволяющей увеличить количество воспроизводимых признаков, использовали последовательное наложение на выбранную зону интереса фильтров Лапласа-Гаусса: edge, periodic, reflect и zero.

Статистическая обработка полученных результатов проводилась при помощи лицензионной компьютерной программы StatMed (кафедра физики, математики и информатики ФГБОУ ВО «Донецкий государственный медицинский университет имени М. Горького, Донецк, Российская Федерация»). Алгоритм статистической обработки включал: проверку нормальности распределения (критерий Д’Агостино-Пирсона), вычисление параметров описательной статистики, определение статистической

значимости отличий несвязанных выборок (t-тест или критерий Вилкоксона), определение силы корреляционных связей между величинами (коэффициенты Пирсона или Спирмена с оценкой силы связи по шкале Чеддока).

В главе 3 представлены **результаты собственных исследований**. Описана методика и результаты статистической оценки угловых параметров, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков. Определены величины показателей описательной статистики, характеризующих изучаемые угловые параметры в общей выборке, а также отдельно в группах лиц разного пола и разных возрастных групп. В общей выборке величины угла α статистически значимо увеличивались от третьего к пятому поясничному позвонку. Величины угла β оказались достоверно больше в теле L_{IV} , чем в теле L_{III} , достоверно не отличаясь в телах других поясничных позвонков. Угол λ статистически значимо не отличался в телах L_I и L_{II} , но его значения достоверно увеличивались от второго к пятому поясничному позвонку.

Выявлен половой диморфизм, проявляющийся в тенденции к большим значениям углов α , β и μ в группе обследуемых женского пола в телах L_{IV} и L_V и к большим значениям угла λ в группе лиц мужского пола в теле L_V (Рисунок 5). Установлены средние по силе отрицательные линейные корреляционные связи между величинами угла μ и возрастом обследуемых в группе лиц женского пола в теле L_{IV} .

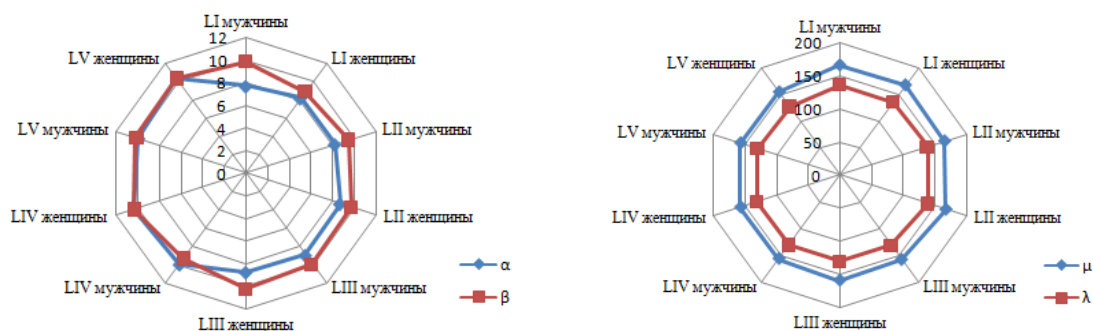


Рисунок 5. Величины углов, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков у лиц разного пола по данным магнитно-резонансной томографии

Установлены возрастные отличия исследуемых угловых показателей: углы α , β принимали большие значения в телах L_I и L_{IV} во II периоде зрелого возраста, чем в I периоде зрелого возраста, при этом угол β оказался статистически значимо больше во II периоде зрелого возраста еще и в теле L_{III} . Угол μ оказался больше во II периоде зрелого возраста в телах L_I , L_{III} и L_V , а угол λ – статистически значимо больше в I периоде зрелого возраста в теле L_I , что отражает естественные инволюционные изменения

архитектоники позвонков, предшествующие клиническому остеопорозу (Рисунок 6). Изучение корреляционных связей между величинами изучаемых угловых показателей и возрастом обследуемых позволило установить среднюю по силе отрицательную линейную корреляционную связь между величинами угла μ и возрастом обследуемых во II периоде зрелого возраста в теле L_{IV} ($r=0,438$, $p<0,05$)

Полученные нормативные значения и выявленные половые и возрастные закономерности могут использоваться как численные эталоны анатомической нормы при оценке конфигурации тел поясничных позвонков и при дальнейшем внедрении текстурного и фрактального анализа для ранней диагностики изменений костной структуры.

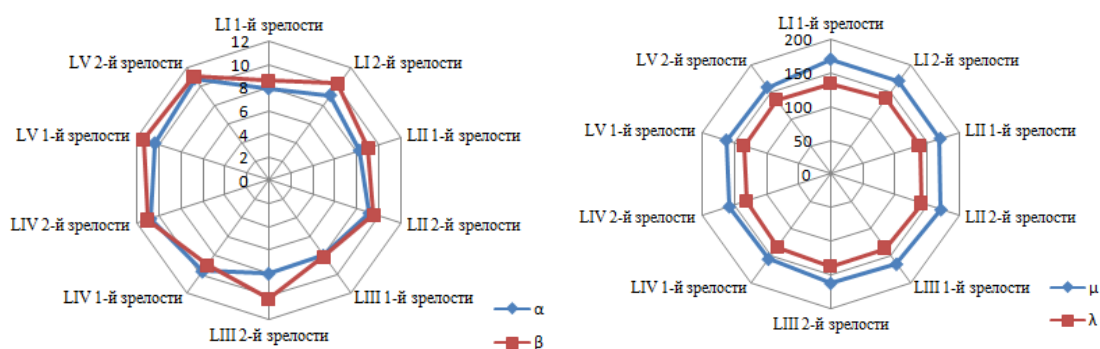


Рисунок 6. Величины углов, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков у лиц первого и второго периодов зрелого возраста по данным магнитно-резонансной томографии

В главе 4 представлены **результаты собственных исследований**. Определены количественные значения текстурных характеристик губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным МРТ и введен коэффициент структурной гетерогенности (КСГ) как интегральный индекс оценки однородности распределения трабекул. Определены параметры описательной статистики следующих показателей: площадь изучаемой области; среднее значение интенсивности сигнала выбранной зоны интереса; минимальное и максимальное значения интенсивности сигнала; стандартное квадратичное отклонение величины интенсивности сигнала; коэффициент структурной гетерогенности как в общей выборке, так отдельно в группах лиц разного пола и разных возрастных групп. Установлено, что в общей выборке величина интенсивности сигнала от губчатого вещества тел позвонков достоверно не изменяется от первого к третьему поясничному позвонку, а затем уменьшается от третьего к пятому поясничному позвонку.

В группе лиц мужского пола величина интенсивности сигнала статистически значимо уменьшается от третьего к пятому поясничному позвонку. У женщин статистически значимых отличий между величинами изучаемой переменной в телах разных поясничных позвонков не

установлено. У женщин величина интенсивности сигнала оказалась достоверно меньше, чем у мужчин в L_{III}. Изучение корреляционных связей между величинами интенсивности сигнала и возрастом отдельно у лиц мужского и женского пола не позволило установить наличие таковых между численными значениями указанных переменных во всех поясничных позвонках ($r=0$, $p>0,05$).

Изучение статистических характеристик величины интенсивности сигнала у представителей разных возрастных групп не выявило статистически значимых отличий между величинами изучаемой переменной в телах разных поясничных позвонков у лиц I периода зрелого возраста. Во II периоде зрелого возраста установлены статистически значимые отличия между величинами изучаемой переменной: в L_{III} они оказались статистически значимо больше, чем в L_{IV}, а в L_{IV} статистически значимо больше, чем в L_V ($p^*<0,05$).

В главе 5 представлены **результаты собственных исследований**. Определены параметры текстурного анализа, которые имеют высокую и очень высокую воспроизводимость при сегментации губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} независимыми диагностами. Оказалось, что очень высокий и высокий уровень согласованности имеют следующие характеристики текстуры губчатого вещества тел L_{III}: асферичность ($W=0,928$, где W – коэффициент конкордации Кендалла, здесь и далее по тексту), наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра сагиттального среза, заданными в координатах интенсивности ($W=0,924$), расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,928$), интегрированная интенсивность ($W=0,973$), средняя интенсивность ($W=0,963$), дисперсия интенсивности ($W=0,904$), медиана интенсивности ($W=0,915$), соотношение поверхности и объема ($W=0,862$), компактность ($W=0,826$), сферическая диспропорция ($W=0,761$), смещение центра масс ($W=0,782$), сферический диаметр ($W=0,736$), минимум интенсивности ($W=0,829$), эксцесс интенсивности ($W=0,872$), среднее значение гистограммы интенсивности ($W=0,807$), асимметрия гистограммы интенсивности ($W=0,819$).

В L_{IV} очень высокий и высокий уровень согласованности имеют такие текстурные характеристики, как: асферичность ($W=0,918$), наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра сагиттального среза, заданными в координатах интенсивности ($W=0,952$), расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,912$), интегрированная интенсивность ($W=0,985$), средняя интенсивность ($W=0,919$), медиана интенсивности ($W=0,924$), показатель минимума интенсивности ($W=0,904$), а также среднее значение гистограммы интенсивности ($W=0,904$), соотношение поверхности и объема ($W=0,706$), компактность ($W=0,828$), сферическая диспропорция ($W=0,812$),

смещение центра масс ($W=0,708$), сферический диаметр ($W=0,828$), дисперсия интенсивности ($W=0,862$), максимальная интенсивность ($W=0,831$), эксцесс интенсивности ($W=0,706$), асимметрия гистограммы интенсивности ($W=0,762$).

Далее оценивалась целесообразность постпроцессорной обработки магнитно-резонансных томограмм при помощи фильтров Лапласа-Гаусса. Наложение фильтров Лапласа-Гаусса уменьшает количество воспроизводимых текстурных признаков, что делает их применение нецелесообразным при оценке структуры губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} на магнитно-резонансных томограммах (Таблица 1).

Таблица 1. Количество воспроизводимых текстурных признаков

Используемый фильтр	Порог	L_{III}	L_{IV}
без фильтра	0,7	17/32	18/32
reflect	0,7	12/32	12/32
periodic	0,7	5/32	6/32
edge	0,7	4/32	5/32
zero	0,7	10/32	8/32

В главе 6 представлены результаты собственных исследований. Определены параметры текстурного анализа, которые имеют высокую и очень высокую воспроизводимость, при сегментации губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} на магнитно-резонансных томограммах, выполненных на диагностическом оборудовании разного класса (Рисунок 7).

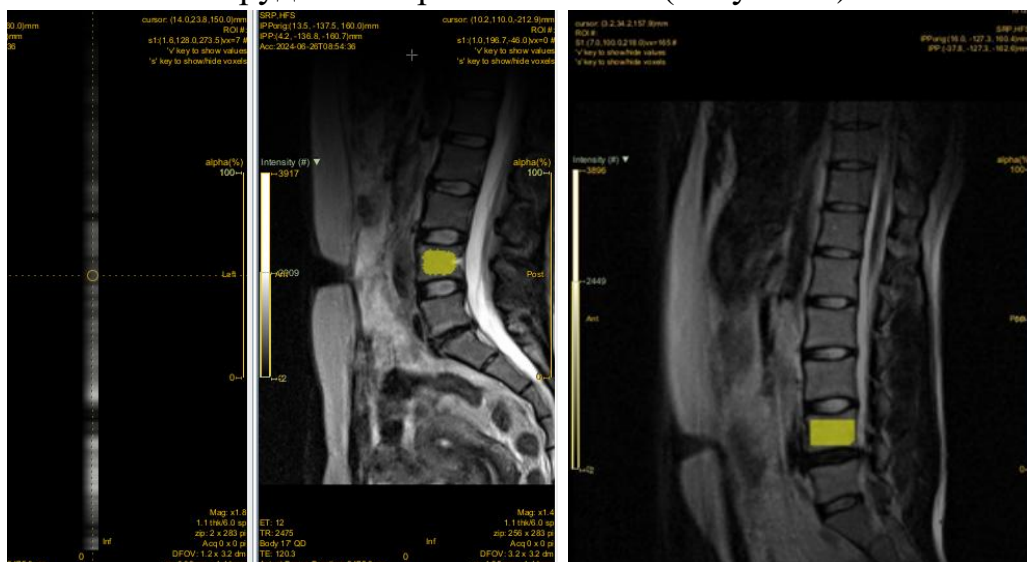


Рисунок 7. Выделение зоны интереса на магнитно-резонансных томограммах пациентки 51 года (А) и пациента 34 лет (Б), выполненных на диагностическом оборудовании разного класса, в интерактивной среде программы LIFEx

Так, в губчатом веществе тела L_{III} очень высокий и высокий уровень согласованности имеют следующие показатели текстуры: асферичность ($W=0,902$), расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,904$), средняя интенсивность ($W=0,912$), медиана интенсивности ($W=0,922$), межквартильный размах интенсивности ($W=0,936$), площадь поверхности ($W=0,802$), соотношение поверхности и объема ($W=0,712$), компактность ($W=0,714$), сферическая диспропорция ($W=0,918$), смещение центра масс ($W=0,706$), сферический диаметр ($W=0,882$), диапазон интенсивности ($W=0,738$), дисперсия интенсивности ($W=0,746$), эксцесс интенсивности ($W=0,775$), среднее значение гистограммы интенсивности ($W=0,724$).

В губчатом веществе тела L_{IV} очень высокий и высокий уровень согласованности имеют: асферичность ($W=0,918$), расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,912$), средняя интенсивность ($W=0,919$), медиана интенсивности ($W=0,924$), а также среднее значение гистограммы интенсивности ($W=0,904$), соотношение поверхности и объема ($W=0,706$), компактность ($W=0,828$), сферическая диспропорция ($W=0,812$), смещение центра масс ($W=0,708$), сферический диаметр ($W=0,828$), дисперсия интенсивности ($W=0,862$), максимальная интенсивность ($W=0,831$), эксцесс интенсивности ($W=0,706$), показатель минимума интенсивности ($W=0,904$), асимметрия гистограммы интенсивности ($W=0,762$).

Постпроцессорная обработка изображений уменьшает количество воспроизводимых текстурных признаков, в связи с этим ее применение можно считать нецелесообразным при изучении текстурных свойств губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков (Таблица 2).

Таблица 2 – Количество воспроизводимых текстурных показателей

Используемый фильтр	Порог	L_{III}	L_{IV}
без фильтра	0,7	15/46	14/46
reflect	0,7	10/46	9/46
periodic	0,7	5/46	5/46
edge	0,7	5/46	5/46
zero	0,7	9/46	10/46

Полученные результаты легли в основу прогностической модели для оценки губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным МРТ (Рисунок 8).

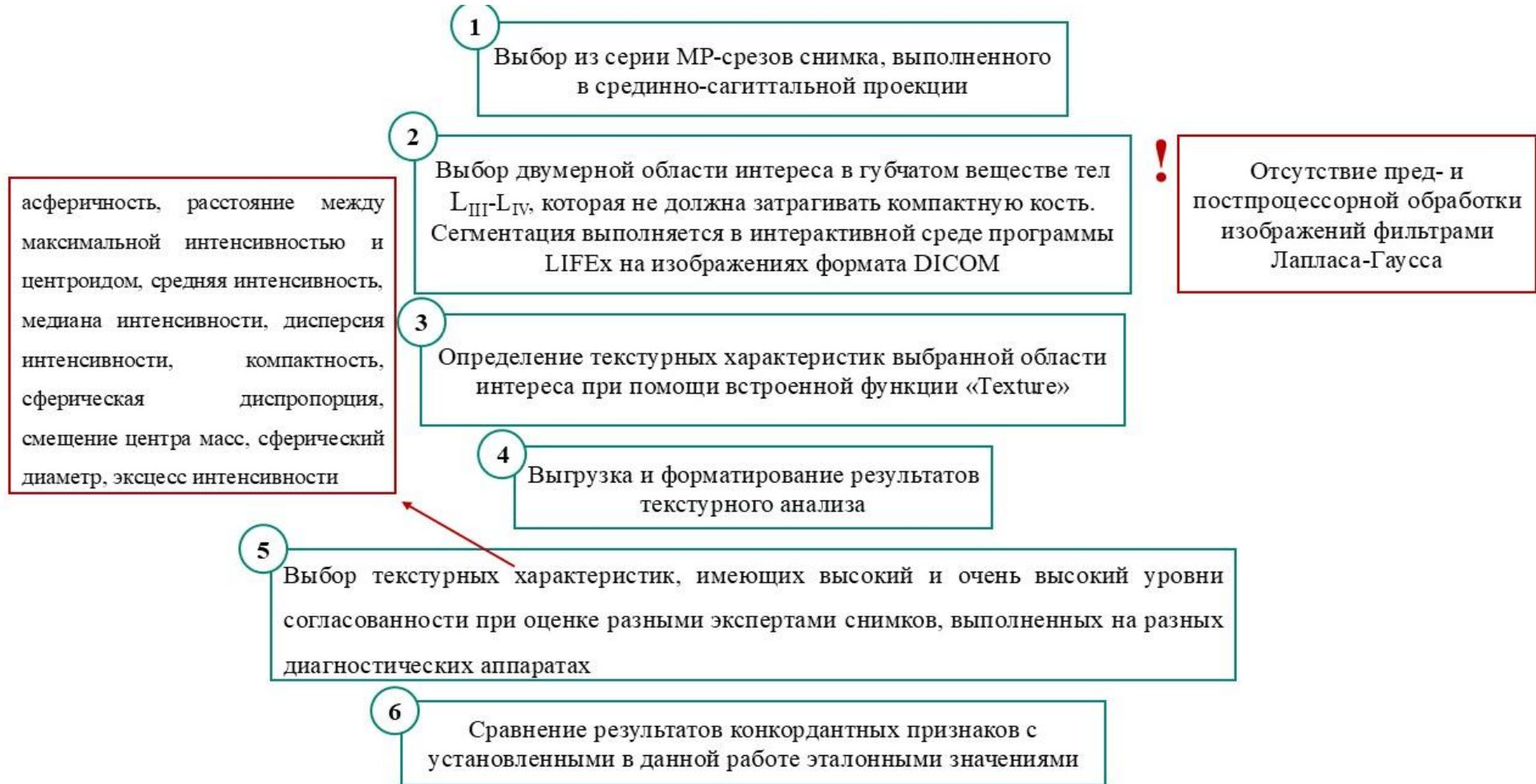


Рисунок 8. Прогностическая модель для оценки губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным МРТ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данного исследования получены нормативные значения углов, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков у лиц разного пола зрелого возраста, которые могут служить морфометрическим эталоном при оценке нормы строения или диагностике начальных остеопоротических деформаций позвонков, выявлен их половой диморфизм и возрастная изменчивость. Установлены значения величин интенсивности сигнала, коэффициента структурной гетерогенности, уровня серого, в том числе у лиц разного пола и возрастных групп в норме. Обнаруженные статистические закономерности в дальнейшем могут стать основой создания диагностического алгоритма оценки пространственной организации губчатого вещества тел поясничных позвонков при оценке доклинических изменений их пространственной организации.

В ходе работы установлены конкордантные текстурные признаки губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков, а также их значения при выборе области интереса двумя независимыми специалистами, а также при оценке магнитно-резонансных томограмм, выполненных на диагностическом оборудовании разного класса, обоснована нецелесообразность использования постпроцессорной обработки магнитно-резонансных томограмм, поскольку фильтрация уменьшает количество воспроизводимых текстурных признаков.

Процесс изучения текстурных характеристик той или иной структуры тела человека открывает широкие возможности для внедрения метода текстурного анализа в практическую деятельность врача-диагноста и автоматизации оценки результатов исследований, что значительно снизит влияние субъективных факторов на определение нормы или отклонений от нее. Дальнейшие возможные перспективы исследовательского интереса в области математической морфологии могут и должны быть направлены на изучение текстурных характеристик анатомических структур с использованием показателей более высокого порядка, а также определение эталонных значений величин текстурного анализа, которые позволят в сравнительном аспекте оценивать пространственную организацию той или иной области тела человека.

ВЫВОДЫ

1. Угловые показатели, предложенные нами для оценки формы тел позвонков поясничного отдела, использованы в качестве самостоятельного инструмента и в дополнение к существующим методикам. Выявлен половой диморфизм, проявляющийся в тенденции к большим значениям углов α , β и μ

в группе обследуемых женского пола в телах L_{IV} ($p^*=0,045$, $p^*=0,033$ и $p=0,005$) и L_V ($p^*=0,034$, $p^*=0,05$, $p^*=0,031$) поясничных позвонков и к большим значениям угла λ в группе лиц мужского пола в теле L_V ($p^*=0,012$).

2. Определены количественные характеристики МР-анатомии губчатого вещества поясничных позвонков у лиц разного пола I и II периода зрелого возраста в норме, в связи с выявлением статистически значимых отличий показателей текстуры объектом анализа выбраны L_{III} и L_{IV} . В качестве предиктора редификации костной ткани по данным магнитно-резонансной томографии использованы численные значения коэффициента структурной гетерогенности, позволившего выявить статистически значимые гендерные различия в организации губчатого вещества тела L_{III} ($0,1138 \pm 0,0033$ у мужчин, $0,1296 \pm 0,0037$ у женщин, $p=0,045$).

3. Установлены конкордантные показатели текстурного анализа губчатого вещества тел поясничных позвонков на магнитно-резонансных томограммах и их численные значения у лиц I и II периода зрелого возраста, характеризующие норму: асферичность, расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом, средняя интенсивность, медиана интенсивности, дисперсия интенсивности, компактность, сферическая диспропорция, смещение центра масс, сферический диаметр, эксцесс интенсивности. Применение данных показателей позволяет минимизировать расхождения в количественной оценке анатомического строения губчатого вещества тел поясничных позвонков на магнитно-резонансных томограммах, выполненных на диагностических аппаратах разного класса и сегментированных независимыми экспертами.

4. Структурные физиологические изменения губчатого вещества подтверждены выявленными средними по силе линейными положительными корреляционными связями между возрастом и коэффициентом структурной гетерогенности губчатого вещества тел поясничных позвонков в группе лиц женского пола в L_I ($r=0,460$; $p=0,036$), а также между возрастом и уровнем серого во II периоде зрелого возраста в L_{IV} ($r=0,542$; $p=0,014$). По результатам исследования построены уравнения регрессии для определения редификации костной ткани.

5. Разработанная прогностическая модель оценки магнитно-резонансного изображения губчатого вещества тел поясничных позвонков методом текстурного анализа включает этапы отбора и сегментирования изображения поясничного отдела позвоночного столба интерфейсе программы «LIFEx», выбор рекомендованных текстурных признаков, сравнение с установленными нами нормальными анатомическими величинами и может использоваться в качестве прогностического инструмента для определения редификации костной ткани.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Изученные текстурные показатели магнитно-резонансных изображений позвоночного столба: асферичность, расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом, средняя интенсивность, медиана интенсивности, дисперсия интенсивности, компактность, сферическая диспропорция, смещение центра масс, сферический диаметр, эксцесс интенсивности – целесообразно использовать в качестве конкордантных признаков, позволяющих нивелировать разный класс оборудования и субъективное восприятие независимыми экспертами зоны интереса.

2. Предложенный алгоритм оценки МР-анатомии L_{III} и L_{IV} может быть использован для исследования других отделов позвоночного столба как для описания нормы, так и для скрининговой диагностики rarefакции костной ткани.

3. Использование постпроцессорной обработки изображения при оценке структуры губчатого вещества с помощью текстурного анализа не рекомендуется в связи со значительным уменьшением в ходе нее количества воспроизводимых текстурных признаков.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования направлены на изучение вариантной МР-анатомии губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} позвоночного столба в зависимости от этно-территориальных особенностей.

Применение результатов текстурного анализа в изучении магнитно-резонансных томограмм дает возможность для новых исследований ремоделирования костной ткани в норме и при пограничных состояниях.

Уравнения регрессии, построенные по результатам исследования, могут лечь в основу математической модели, позволяющей определять нормальные значения текстурных показателей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Вельма, К. М. Современный взгляд на методы лучевой диагностики остеопороза / К. М. Вельма, **Е. А. Калашникова**, Ю. В. Довгялло // Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, врач и здоровье. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 104-110.
2. Вельма, К. М. Перспективы применения текстурного анализа для оценки структуры костной ткани / К. М. Вельма, Ю. В. Довгялло, **Е. А. Калашникова**, Е. А. Горбачева // Дальневосточный медицинский журнал. – 2024. – № 3. – С. 141-145.
3. **Калашникова, Е. А.** Количественные характеристики некоторых текстурных признаков губчатого костного вещества поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томографии / Е. А. Калашникова, Ю. В. Довгялло, А. В. Дмитриев // Оренбургский медицинский вестник. – 2024. – Т. XII, № 4 (48). – С. 13-17.
4. **Калашникова, Е. А.** Оценка конкордантности некоторых текстурных признаков губчатого вещества тел поясничных позвонков / Е. А. Калашникова, Ю. В. Довгялло, С. А. Калашникова, А. В. Дмитриев // Оренбургский медицинский вестник. – 2025. – Т. XIII, № 2 (50). – С. 32-37.
5. Довгялло, Ю. В. Перспектива применения текстурных характеристик изображения в определении структуры костной ткани / Ю. В. Довгялло, **Е. А. Калашникова**, С. Ш. Айдаева // Оренбургский медицинский вестник. – 2025. – Т. XIII, № 2 (50). Прил.– С. 132.
6. **Королева, Е. А.** Оценка плотности распределения элементов губчатого вещества тел поясничных позвонков методом текстурного анализа / Е. А. Королева, Ю. В. Довгялло, С. Ш. Айдаева, С. А. Калашникова, А. И. Краюшкин // Волгоградский научно-медицинский журнал. – 2025. – № 4. – С. 13-18.

Список печатных работ, опубликованных в других изданиях:

1. Вельма, К. М. Оценка воспроизводимости текстурных характеристик костной ткани / К. М. Вельма, А. В. Дмитриев, **Е. А. Калашникова** // Международная научно-практическая конференция «Киндаровские чтения», Грозный, 25 сентября 2024 года. – Грозный: Чеченский государственный университет им. А. А. Кадырова, 2024. – С. 21-26.
2. **Калашникова, Е. А.** Возможности применения текстурного анализа томограмм поясничных позвонков в оценке их структуры / Е. А. Калашникова, Ю. В. Довгялло // Международная научно-практическая конференция «Киндаровские чтения», Грозный, 25 сентября 2024 года. –

Грозный: Чеченский государственный университет им. А. А. Кадырова, 2024. – С. 62-66.

3. Вельма, К. М. Оценка структуры костной ткани методом текстурного анализа / К. М. Вельма, **Е. А. Калашникова**, Е. А. Горбачёва // Международный морфологический форум «Сталинградская сирень», Волгоград, 24–25 мая 2024 года / Под редакцией В. Л. Загребина. – Волгоград: Волгоградский государственный медицинский университет, 2024. – С. 64-66.

4. Довгялло, Ю. В. Перспективы применения показателей текстурного анализа в качестве предикторов редификации костной ткани / Ю. В. Довгялло, **Е. А. Калашникова**, К. М. Вельма, А. В. Дмитриев // Университетская клиника. – 2024. – Спецвыпуск № 2. – С. 280.

5. **Kalashnikova, E. A.** Textural characteristics of magnetic resonance tomograms of the normal lumbar vertebrae / E. A. Kalashnikova, Y. V. Dovgyallo // Proceedings of the International Conference «Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration», Beijing, China, January 15, 2025. – Pp. 111-117.

6. **Калашникова, Е. А.** Оценка возможностей программного комплекса ImageJ для оценки текстуры костной ткани / Е. А. Калашникова // Актуальные проблемы экспериментальной и клинической медицины: Материалы 83-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Волгоград, 23-25 апреля, 2025 года. – Волгоград: Волгоградский государственный медицинский университет, 2024. – С. 83-84.

7. Dovgyallo, Y. V. Textural Analysis in the Assessment of the Spongy Substance Elements of the Lumbar Vertebral Bodies / Y. V. Dovgyallo, **Е. А. Королева**, Е. А. Gorbacheva // Proceedings of the International Conference «Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration» – Reports in English. – Beijing, China, October 22, 2025. – Pp. 60-66.

Свидетельства

1. **Королева, Е. А.** База данных морфологических характеристик текстуры губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томографии: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 20-25626560 от 27 декабря 2025 г. / Е.А. Королева, Ю.В. Довгялло, С.А. Калашникова, К.М. Вельма. Заявка № 2025626242 от 18 декабря 2025 г.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

КСГ	Коэффициент структурной гетерогенности
КТ	Компьютерная томография
МРТ	Магнитно-резонансная томография
ROI	Region of Interest
p	Уровень значимости при коэффициенте Стьюдента
p*	Уровень значимости при коэффициенте Вилкоксона
r	Коэффициент корреляции Пирсона
r*	Коэффициент корреляции Спирмена
W	Коэффициент конкордации Кендалла

Научное издание

Королева Елена Антоновна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
ГУБЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ У ЛИЦ
ЗРЕЛОГО ВОЗРАСТА**

3.3.1. – Анатомия и антропология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Подписано в печать 2026. Формат 60x84/16

Бумага обычная. Печать цифровая. Гарнитура Times New Roman/
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в Издательстве ВолгГМУ
400055, Волгоград, ул. Дзержинского, 45
Телефоны: (8442) 74-01073, 74-08-04