

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На правах рукописи

Королева Елена Антоновна

**Закономерности пространственной организации губчатого вещества
поясничных позвонков у лиц зрелого возраста**

3.3.1. – Анатомия и антропология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Научный руководитель:
доктор медицинских наук, доцент
Довгялло Юлия Викторовна

Волгоград – 2026 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	15
1.1. Анатомия позвоночного столба и клиническая значимость его исследования	15
1.2. Современные представления о структурной организации губчатого вещества поясничных позвонков	19
1.3. Современные представления о возможности прижизненного исследования костной ткани	26
<i>1.3.1. Лучевые методы визуализации</i>	26
<i>1.3.2. Возможности применения фрактального анализа в оценке пространственной геометрии биологических структур, основные принципы фрактального анализа</i>	30
1.4. Текстуальный анализ в оценке морфологии костной ткани	37
<i>1.4.1. Текстуальный анализ как структурный компонент радиомики</i>	37
<i>1.4.2. Перспективы и трудности применения текстурного анализа</i>	44
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ	48
2.1. Характеристика материала исследования	48
2.2. Методы исследования	50
<i>2.2.1. Морфометрические измерения анатомически значимых показателей при изучении тел поясничных позвонков на магнитно-резонансных томограммах</i>	50
<i>2.2.2. Текстуальный анализ в обработке магнитно-резонансных томограмм позвоночного столба лиц обследуемых групп</i>	52
<i>2.2.3. Выбор морфологических признаков текстурного анализа: оценка воспроизводимости и расчет конкордантности</i>	54
2.3. Статистическая обработка результатов	60
РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	61
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА КОНФИГУРАЦИИ ТЕЛ ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ В НОРМЕ	61

3.1. Определение статистических характеристик угловых величин, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков	61
3.2. Определение статистических характеристик угловых величин, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков, в зависимости от пола	65
3.3. Определение статистических характеристик угловых величин, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков, в зависимости от возрастной группы.....	68
ГЛАВА 4. МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ АНАТОМИЯ ТЕКСТУРЫ ГУБЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ТЕЛ ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ	73
У ЛИЦ ЗРЕЛОГО ВОЗРАСТА.....	73
4.1. Коэффициент структурной гетерогенности как показатель однородности распределения элементов губчатого вещества тел поясничных позвонков	73
<i>4.1.1. Определение статистических характеристик величины интенсивности сигнала губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томографии в норме.....</i>	<i>73</i>
<i>4.1.2. Определение статистических характеристик коэффициента структурной гетерогенности губчатого вещества тел поясничных позвонков в норме по данным магнитно-резонансной томографии</i>	<i>85</i>
4.2. Уровень серого как один из показателей математической морфологии тел поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томографии	93
<i>4.2.1. Определение статистических характеристик величин уровня серого LIII и LIV по данным магнитно-резонансной томограммы</i>	<i>94</i>
<i>4.2.2. Определение статистических характеристик величин уровня серого третьего и четвертого поясничных позвонков в зависимости от возрастной группы</i>	<i>98</i>
<i>4.2.3. Определение статистических характеристик величин уровня серого третьего и четвертого поясничных позвонков в зависимости от пола</i>	<i>103</i>
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ТЕКСТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ТЕЛ ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ ПРИ ВЫБОРЕ ОБЛАСТИ ИНТЕРЕСА ДВУМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ СПЕЦИАЛИСТАМИ	107

ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ТЕКСТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ТЕЛ ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ ПРИ ВЫБОРЕ ОБЛАСТИ ИНТЕРЕСА НА МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫХ ТОМОГРАММАХ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ДИАГНОСТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ РАЗНОГО КЛАССА	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
ВЫВОДЫ	151
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	153
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	153
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	154
Литература	155

ВВЕДЕНИЕ

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 [25]. 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 [2, 6].

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 [15, 125, 176].

На сегодняшний день стремительное развитие цифровых технологий в 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 [43]. Р

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 [42, 123].

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 [69, 196].

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 [121, 192].

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» [193], 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 [74, 102],

- одно и то же исследование может быть выполнено на разных диагностических аппаратах, что также влияет на численные текстурные характеристики изображения [143],

- 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 [209].

В отечественной и зарубежной литературе описаны некоторые методологические подходы к диагностике опухолевых образований различных органов, очаговых и диффузных воспалительных процессов, структурных изменений костной ткани методом 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 [136, 184, 191].

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 редификации 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 данные имеют практическую значимость и представляют собой основу для создания автоматизированного аппаратно-программного комплекса, который в полуавтоматическом режиме при минимальном участии

диагноста позволит определить отклонения в строении губчатого вещества поясничных позвонков.

Результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры анатомии ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России (дисциплина «Рентгеноанатомия»), кафедры морфологии ПМФИ – филиала ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России, в практическую деятельность отделения лучевой диагностики Государственного бюджетного учреждения здравоохранения Ставропольского края «Городская клиническая больница» г. Пятигорска (г. Пятигорск), отделения лучевой диагностики консультативно-диагностического центра Института неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака (г. Донецк).

Полученные в данной работе результаты имеют практическое значение для использования в качестве текстурного эталона анатомической нормы, а набор воспроизводимых показателей текстурного анализа – в качестве предикторов рарефикации 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.

Связь с планом научных исследований

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». Тема утверждена Ученым Советом ФГБОУ ВО ВолгГМУ Минздрава России, выписка из протокола заседания №12 от «27» марта 2025 года.

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: «LIFEx» 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.

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.

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).

Личный вклад автора

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 ВолГМУ МЗ РФ, в лечебно-диагностический процесс консультативно-диагностического центра Института неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака Минздрава России, в лечебно-

диагностический процесс отделения лучевой диагностики Государственного бюджетного учреждения здравоохранения Ставропольского края «Городская клиническая больница» г. Пятигорска.

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.

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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Анатомия позвоночного столба и клиническая значимость его исследования

В сфере здравоохранения на данный момент реализуется национальный проект «Продолжительная и активная жизнь», основной его целью является увеличение ожидаемой продолжительности жизни населения до 78 лет к 2030 году, до 81 года - к 2036 г. [25]. Для достижения поставленных задач разработаны Федеральные проекты по борьбе с социально значимыми заболеваниями и меры, направленные на сохранение здоровья граждан. Остеопороз, дегенеративно-дистрофические заболевания позвоночника (ДДЗП) и другие патологические изменения костной ткани приводят к снижению качества жизни, снижению трудоспособности и возникновению инвалидизации трудоспособного населения [2, 6].

Наибольшая социальная значимость определяется осложнениями остеопороза, среди которых наиболее часто регистрировались переломы тел позвонков, бедренной кости и костей верхних конечностей, что приводит к значительным затратам в сфере здравоохранения (средняя стоимость перелома, возникшего вследствие остеопороза, составляет 61 151 руб.).

При проведении одномоментного эпидемиологического исследования Ершова О.Б. с соавт. установили, что 24% женщин и 13% мужчин городского населения РФ в возрасте ≥ 50 лет имели 1 и более низкоэнергетический (низкотравматический) перелом, обусловленный остеопорозом. В структуре переломов преобладали переломы тел позвонков, при этом их частота составила 12,7% и 10% соответственно [11].

При перерасчете на население РФ ≥ 50 лет, с учетом полученных эпидемиологических сведений, установлены медицинские затраты на лечение остеопороза, осложненного переломами различной локализации – они составили

около 25 млрд. рублей. Наиболее затратным является лечение пациентов с переломами тел позвонков, стоимость которого в масштабах России в 2 раза выше, чем лечение перелома бедренной кости, при этом распространенность перелома тел позвонков на фоне остеопороза обнаруживается у 10% лиц в возрасте 50 лет и старше [2].

В связи с прогнозируемым ростом продолжительности жизни в РФ параллельно неизбежно будет зафиксировано увеличение патологических переломов, при этом у пациентов с остеопорозом, осложненным переломом, значительно снижается качество жизни и способность к самообслуживанию. Реабилитационный период занимает продолжительное время и не всегда удается полностью вернуть утраченную функцию, восстановительный период занимает 12-24 месяца. При этом у пациентов с остеопорозом, перенесших ранее перелом любой локализации, риск повторных переломов достоверно увеличивается [11].

Позвоночный столб с точки зрения биомеханики представляет собой замкнутую биодинамическую систему, подвижность которой обеспечивается локомоторными системами. Кинематические локомоторные цепи позвоночного столба сверху замыкаются атлантозатылочным суставом, снизу – в области S_1-L_5 с увеличением нагрузки сжатия в каудальном направлении, максимально выраженной в пояснично-крестцовом отделе [26].

Особенностью анатомического строения позвоночного столба является сочетание его стабильности и относительной прочности с гибкостью, обеспечиваемой его составными компонентами. Прочность тел позвонков различных отделов позвоночного столба варьирует, так, при проведении тестов с воздействием груза на позвонки, зафиксированными между металлическими пластинами, установлено, что перелом шейных позвонков возникает при нагрузке 150-170 кг, позвонков грудного отдела – 200-300 кг, позвонков поясничного отдела – 400-425 кг [29].

В процессе адаптивной эволюции позвоночный столб человека претерпел ряд изменений, направленных на адаптацию к вертикальной нагрузке и

адекватному восприятию механических воздействий, связанных с прямохождением [152].

Основные анатомические открытия были сделаны к началу XIX столетия, а уже к середине века, благодаря укреплению связей с клинической медициной и физиологией, появлению новых методов исследования и методологических подходов, классическая, построенная «исключительно на созерцании» анатомия стала бурно трансформироваться. Новая эпоха в морфологических науках требовала определения границ, например, между нормальной и патологической анатомией: перед учёными тех лет стояла важная задача дифференцировать, какие варианты строения систем организма могут быть классифицированы как отклонения, а какие можно отнести к проявлениям нормы, которая встречалась в популяции не часто [8, 10]. В рамках описательной анатомии решение подобных вопросов оставалось за исследователем.

Однако в ту же эпоху кризис «созерцательной анатомии» стал очевиден, ведь эта наука вышла за пределы теоретического направления. Врачи нуждались в обновлении информации об анатомическом строении тела человека и его variability, объяснении и систематизации этих знаний, в том числе для выявления диапазона вариаций и установления границ между нормальным и патологически изменённым органом [7].

В течение дальнейшего своего пути основные веяния в анатомии менялись под влиянием новых подходов: так, сначала в морфологии крепили идеи трансформизма, а на рубеже 50-60-х годов XIX века – эволюционизма. Долгие годы анатомию неразрывно связывали с антропологией и лишь в 1897 году на XII международном съезде врачей антропологии им отвели разные секции, формально разделив их и позволив каждой дисциплине вновь обрести самостоятельность [17].

Анатомия как наука продолжает своё развитие, проходя через множество трансформаций, благодаря внедрению инноваций в подходах и методах, она продолжает развиваться, становясь всё более точной и детализированной. Сегодня в анатомии царит эпоха ренессанса, ведь благодаря разнообразию

лучевых методов визуализации можно оценить анатомическое строение человеческого тела во всей его красоте и органичности [9, 52, 131].

В сагиттальной плоскости позвоночный столб имеет 4 физиологические кривизны: шейный лордоз, грудной кифоз, поясничный лордоз, на вершине которого лежит L_{IV} , и кифоз, сформированный L_V и позвонками крестцово-копчикового отдела, при этом на наличие деформаций позвоночника указывал в своих трудах еще Клавдий Гален (130-201 гг. н.э.), который ввел термины «кифоз», «лордоз» и «сколиоз» [154]. С точки зрения онтогенеза кифозы являются филогенетически обусловленными, в то время как лордозы формируются после рождения и напрямую связаны с ортостатическим положением тела. Поясничный лордоз формируется последним и увеличивается с возрастом, достигая максимального значения к 25 годам, что объясняется стремлением сместить центр тяжести от крестцово-подвздошного сочленения. При этом совершенство физиологических изгибов является одним из факторов, обеспечивающим устойчивость к травматическим повреждениям позвоночного столба [29].

Костная ткань претерпевает постоянные изменения, задолго до возникновения остеопороза происходит снижение минеральной плотности костной ткани (МПК), которое впоследствии может быть расценено как остеопения. Так, среди лиц в возрасте 50 лет и старше остеопения составляет 43% у женщин и 44% у мужчин, а остеопороз диагностируется в 34% и 27% случаев соответственно [2].

Метаболизм костной ткани регулируется посредством динамического равновесия двух взаимно противоположных механизмов: остеогенеза и осеокластогенеза, реализуемых посредством Wnt-сигнального пути и цитокинового пути RANKL/RANK/OPG соответственно. Ранее считалось, что определяющую роль в снижении МПК играют эстрогены, что объясняло развитие остеопении и остеопороза у женщин пред-, климактерического и постклимактерического периода. Однако в настоящий момент установлено, что снижение МПК напрямую зависит от ряда факторов: гормонального статуса

(снижение уровня эстрогенов, уровня ТТГ, СТГ, паратиреоидного гормона, ГК), витамина D, минерального (фосфорно-кальциевого) обмена. Таким образом, уровень половых гормонов значительно влияет на минеральную плотность костной ткани и ее разрежение в возрастном аспекте, но не является определяющим [35, 43, 67, 123].

Современные подходы к изучению анатомии охватывают многие аспекты и позволяют изучить не только макроструктуры, но и провести более детальный анализ на клеточном уровне.

1.2. Современные представления о структурной организации губчатого вещества поясничных позвонков

В настоящее время достаточно подробно изучена гистотопография губчатого вещества тел позвонков, при этом установлено, что трабекулярная кость представляет собой высокоструктурированную систему, организованную костными балками. Геометрически форма позвонка максимально приспособлена для перераспределения осевой и сдвиговой нагрузки и обеспечения амортизации. Тело поясничных позвонков представлено компактной костной тканью и губчатым веществом, имеющим трабекулярное строение, при этом именно трабекулярность обеспечивает прочность позвонка. Выбор в качестве зоны интереса именно поясничного отдела позвоночного столба обусловлен стабильным количеством мягких тканей с содержанием трабекулярного вещества до 66% [35].

С точки зрения гистоархитектоники губчатое вещество тела позвонка состоит из соединенных между собой вертикальных и горизонтальных трабекул, при нарушении остеогенеза определяется наибольшее снижение в горизонтальной группе трабекул, что значительно увеличивает риск возникновения компрессионных переломов [6, 14, 23, 36, 41].

Современные исследования показывают, что прочность тел позвонков во многом определяется параметрами микроархитектуры трабекулярной сети:

толщиной, числом, степенью связности и анизотропией трабекул. В качестве основных морфометрических показателей Wang Y. с соавт. (2013) предложил использовать следующие: относительный объём костной ткани, минеральную плотность кости, число трабекул, толщину трабекул, расстояние между трабекулами, степень анизотропии [194].

Центры окостенения позвоночного столба формируются в эмбриогенезе в зонах первичных участков окостенения, при этом основным вопросом является значимость формирования костного объема и структуры в данный период. Asquaañ F. с соавт. (2015) при проведении МРТ с последующим 3D-анализом 120 позвонков (от 6 мес. внутриутробного развития до 2,5 лет) определили сферические параметры. Авторами было установлено, что в период внутриутробного развития объём губчатого вещества тел позвонков увеличивался, а в постнатальном периоде происходило его снижение на $2/3$, при этом костные балки обладали высокой степенью анизотропии. К основным закономерностям развития костной ткани относится её физиологическая потеря в течение жизни, начиная с первого года. С другой стороны, происходила структурная перестройка трабекулярной кости, которая заключалась в утолщении трабекул и в систематизации организации костных балок.

Функциональная перестройка, происходящая в результате гравитации, заключается в усилении вертикальных балок и частичной редукции первичных трабекул. В качестве основного вывода исследователи определяют, что прочность костной ткани обеспечивается не увеличением костной массы, а реорганизацией микроструктуры трабекулярной кости. В раннем детстве и в период первого детства происходит интенсивный рост тел позвонков на фоне более медленной минерализации, в связи с этим минеральная плотность кости (МПК) уменьшается [41].

В подростковом и юношеском возрасте активно увеличивалась костная масса, именно в этот период определялись гендерные различия, обусловленные тем, что у мужчин структурные изменения костной ткани происходили дольше, чем у женщин: скорость накопления МПК в телах поясничных позвонков

увеличивалась в 4 и 6 раз соответственно. При этом к концу полового созревания трабекулярная ткань тел поясничных позвонков не имела достоверных гендерных отличий. Пиковая костная масса поясничных позвонков формируется к 20-30 годам. В этот период достигаются максимальные значения относительного объёма костной ткани и формируется оптимальная связность трабекулярной сети [65].

Анализируя структуру губчатого вещества тел поясничных позвонков, М. Amling с соавт. (1996) изучили сагиттальные распилы позвоночного столба толщиной 1 мм у 18 умерших, не имевших патологии со стороны костной ткани, с помощью гистоморфометрического исследования. Авторы провели качественное исследование губчатого вещества, а также оценили его объем (%), трабекулярное соединение (мм) и установили, что в норме распределение объема имеет форму кривой со снижением в поясничном отделе. При изучении распилов в сагиттальной плоскости, полученных от 12 умерших с остеопорозом, было установлено, что кроме уменьшения объема губчатого вещества, обнаружено достоверное снижение трабекулярных связей, сопровождающееся потерей структуры губчатого вещества и возникновением полиостистой гетерогенности [46].

Для оценки возрастной изменчивости губчатого вещества тел поясничного отдела позвоночника Сапарбаев Р.Б. с соавт. изучили тела L_I-L_V (в количестве 805 шт.), выделенные при аутопсии лиц женского и мужского пола в возрастном диапазоне 21-94 лет на фронтальных и горизонтальных распилах. В связи с тем, что на фронтальных распилах происходило частичное перекрытие вертикальных балок, формирующих губчатое вещество, дальнейшее исследование было проведено на сагиттальных распилах поясничных позвонков. В области прикрепления дуги в телах поясничных позвонков у лиц первого периода зрелого возраста визуализировались центры скопления мелкоячеистого губчатого вещества с равномерным расхождением костных балок вплоть до компактной пластинки. У лиц второго периода зрелого возраста происходило истончение горизонтальных балок губчатого вещества поясничных позвонков,

что морфологически проявлялось умеренным увеличением размеров ячеек овальной формы около компактной пластинки преимущественно на передней и боковой поверхностях тела позвонка.

С возрастом была обнаружена крупноячеистая трансформация губчатого вещества тел поясничных позвонков: у лиц пожилого возраста выявлено истончение преимущественно горизонтальных балок, у лиц старческого возраста – разрежение трабекулярной костной ткани за счет истончения как горизонтальных, так и вертикальных костных балок, которое было максимально выражено в центральной части четвертого и пятого поясничных позвонков [30].

Пространственная неоднородность микроархитектоники трабекулярной кости и гетерогенность плотности определялась по всему телу позвонка. Наименьшие минеральная плотность кости, объем костной ткани и толщина трабекул регистрировались в центральной части по сравнению с периферическими. По сравнению с задней областью передняя часть имеет меньшие МПК, плотность связанности, большее расстояние между трабекулами и более высокую степень анизотропии.

Кроме гетерогенности в пределах одного позвонка, определены достоверные различия в зависимости от отдела позвоночного столба. В позвонках поясничного отдела определялся максимальный объем костной ткани, при этом в L_1 обнаружено большее количество трабекул и их максимальная толщина. При анализе возрастной изменчивости позвонка L_{III} у лиц пожилого возраста ($61,69 \pm 9,05$ лет) на 377 сканированных изображениях в сагиттальной плоскости было установлено, что соотношение объема костной ткани и МПК уменьшается с возрастом у обоих полов. Данная закономерность обнаружена и для соотношений в передней и задней частях тела поясничного позвонка, в то время как в нижней и средней поперечных областях соотношение от возраста не зависело.

Дальнейшие исследования были посвящены изучению поясничных позвонков ($L_{III}-L_V$) у лиц I и II периодов зрелого возраста, в ходе которых было установлено, что у лиц II периода зрелого возраста произошло смещение в

сторону более прочных связей между трабекулами по периферии, а не в центральной области, в то время как смещений соотношений в передне-заднем направлении не происходило. Авторы не проводили оценку структурно-пространственной организации губчатого вещества в гендерном аспекте, в связи с этим выводы о половых различиях отсутствуют [50].

В ходе исследования на аутопсийном материале N.L. Fazzalari с соавт. (2001) были выделены и изучены следующие сегменты позвоночного столба: Th₁₂-L₁, L₂-L₃ и L₄-L₅, полученные от 27 трупов в возрасте от 20 до 94 лет, измерены индексы формы позвонков и проведен гистоморфометрический анализ. Авторами выявлена прямая корреляционная связь между деформацией позвонков поясничного отдела и дезорганизацией межпозвоночных дисков, установлено уменьшение отношения объема губчатого вещества к объему костной ткани, а также увеличение отношения объема костной ткани к объему и толщине тел поясничных позвонков. Свидетельством того, что дезорганизация межпозвоночных дисков защищает структурность губчатой костной ткани позвонков, является факт увеличения отношения объема костной ткани к объему тела позвонка и толщины тела позвонка, а также уменьшения отношения объема губчатой кости к объему костной ткани в телах позвонков с максимально дегенерированными межпозвоночными дисками. Изменения губчатого вещества нарастали в краниокаудальном направлении от L_I до L_V и были максимально выраженными в пятом поясничном позвонке, в то время как структурная перестройка в L_{III} и L_{IV} соответствовала возрасту во всех образцах исследованных объектов [81].

При изучении рентгенограмм поясничного отдела позвоночника 1240 человек (в возрасте от 20 до 92 лет) в прямой и боковой проекциях составлена база данных с референтными значениями индекса вогнутости тел позвонков, высоты поясничных дисков и распространенности остеофитов. Установлено, что с возрастом замыкательные пластинки тел позвонков трансформировались в более вогнутые. При этом индекс вогнутости в возрастном аспекте в L_I, L_{II}, L_{III}, L_{IV} и L_V снижался, при этом у женщин больше, чем у мужчин (на 3,2% и 1,5%

соответственно). Параллельно увеличивалась высота поясничных дисков Th_{XII}-L_I, L_I-L_{II}, L_{II}-L_{III}, L_{III}-L_{IV}, L_{IV}-L_V и L_V-S_I у женщин на 4,7-8,4%, у мужчин на 4,6–6,9% [172].

Kwok A.W. с соавт. провели исследование губчатого вещества поясничных позвонков у 395 лиц в возрасте от 67 до 89 лет, измеряя морфометрические показатели тел поясничных позвонков и МПК с помощью двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии. Авторы изучили пять поясничных позвонков: L_I, L_{II}, L_{III}, L_{IV}, L_V – и шесть межпозвоночных дисков (от Th_{XII}-L_I до L_V-S_I) и установили снижение МПК, которое связано с уменьшением высоты передней части тела позвонка, средней высоты и высоты задней части. При этом передне-задний размер не изменялся, в связи с этим индекс двояковогнутости увеличился. Выявленное снижение объема тел поясничных позвонков и межпозвоночных дисков у лиц пожилого возраста происходило на фоне увеличения высоты межпозвоночных дисков [122].

Таким образом, губчатое вещество поясничных позвонков представляет собой динамическую морфофункциональную систему, формирование которой начинается в эмбриогенезе, продолжается в онтогенезе и претерпевает трансформацию, последовательно проходя следующие стадии:

1. Формирование первичной трабекулярной сети в пренатальном периоде;
2. Функциональная перестройка в детстве: редукция первичных трабекул и вертикализация костных балок;
3. Пик костной массы и оптимальная связность трабекулярной сети у лиц юношеского возраста и I периода зрелого возраста;
4. Снижение МПК, постепенная инволюция и деградация структуры губчатого вещества в пожилом возрасте.

Одним из основных вопросов, возникающих при исследовании микроархитектоники губчатого вещества поясничных позвонков, является определение взаимосвязи между структурно-пространственной организацией трабекулярной кости и оценкой ее механической прочности. Средняя плотность тела позвонка обеспечивает до 70% прочности, при этом ряд исследователей

указывает на улучшение прогноза прочности при использовании средних значений морфометрических параметров трабекулярной кости совместно с показателем минеральной плотности кости.

При изучении влияния чрезмерной нагрузки в ортогональных направлениях на продольную и поперечную механическую целостность трабекулярной костной ткани позвонков человека при аутопсии 23 трупов выделены тела позвонков Th_{XII}-L_I, L_{IV}-L_V, изготовлено 39 образцов кубической формы. Сканированные образцы исследованы с помощью микро-КТ с определением основных морфометрических параметров. Далее тела позвонков были последовательно подвергнуты одноосному сжатию (до 10%), а затем – сжатию в ортогональном направлении. В результате были выявлены достоверные различия при механических нагрузках, коррелирующие со структурой, плотностью и степенью анизотропии губчатого вещества позвонков. При этом механическая анизотропия значительно превышала различия при ортогональных нагрузках (до 35%), что свидетельствовало о том, что строение губчатого вещества тел поясничных позвонков минимизирует потерю прочности за счет рассеивания энергии в трабекулах, расположенных перпендикулярно основному направлению нагрузки [202].

При анализе 44 образцов трабекулярной кости позвонка L_{IV} (5 мм × 5 мм × 5 мм), полученных от шести доноров мужского пола в возрасте от 62 до 70 лет, с помощью рентгенологического метода было установлено, что изучаемые объекты не имели патологических изменений, свидетельствовавших о перенесенных ранее переломах: отсутствовали микромозоли и структурные деформации. После сегментирования с использованием идентичного порогового значения определили морфометрические параметры микроархитектоники губчатого вещества L_{IV}: объемную долю кости, плотность связанности, число трабекул, толщину трабекул, степень анизотропии. Далее были определены механические параметры при условиях растяжения и сжатия. Полученные результаты дали возможность разделить четвертые позвонки поясничного отдела на две группы: высокого и низкого качества – при этом статистически

значимыми параметрами для дифференцировки по группам явились объем костной ткани и плотность связанности, в то время как число и толщина трабекул были второстепенными факторами, обеспечивающими качество и механическую прочность трабекулярной кости.

Авторы установили, что независимо от типа нагрузок (растяжение или сжатие) тканевые механические параметры значительно различались между продольным и поперечным направлениями; при этом механические свойства губчатого вещества тела L_{IV} в продольном направлении превосходили таковые в поперечном. Данные о гетерогенности микроструктуры позвонков указывают на противоречивость представленных исследований, но в целом свидетельствуют о механической адаптации и являются ключевым фактором, определяющим способность тела позвонка к повышенным нагрузкам [96].

Для диагностики патологических состояний необходимо определить эталонные морфометрические параметры губчатого вещества тел позвонков в норме, а также возможный разброс данных критериев в рамках вариантной анатомии в корреляции с показателями прижизненной инструментальной диагностики, например, КТ и МРТ [79, 85]. Преимущество этих методов заключается в возможности исследовать органы и ткани в режиме реального времени, минимально вторгаясь в естественные процессы жизнедеятельности организма, и диагностировать патологические изменения на доклиническом этапе [8, 92, 113].

1.3. Современные представления о возможности прижизненного исследования костной ткани

1.3.1. Лучевые методы визуализации

Несмотря на интенсивное развитие и повсеместное внедрение современных визуализационных техник, рентгенологические методы диагностики заболеваний скелета и сейчас остаются широко востребованными,

относительно недорогими, доступными для пациента и достаточно информативными для врача с точки зрения первичной диагностики. Рентгенографическое исследование позволяет получить информацию о строении костной ткани: кортикальном контуре, состоянии губчатого вещества, форме и размерах суставной щели и т.д. – процессах, происходящих в кости при старении, влиянии на костную ткань внешних либо внутренних факторов [6, 111].

Изучению анатомического строения различных отделов позвоночного столба с помощью современных методов лучевой диагностики посвящен ряд работ ученых широкого спектра: анатомов, врачей лучевой диагностики, клиницистов. Для диагностики патологических состояний необходимо иметь четкие морфометрические параметры позвонков, формирующих позвоночный столб в норме, а также возможный разброс данных критериев в рамках вариантной анатомии.

Важным стратегическим объектом для исследования позвоночного столба и плотности костной ткани в целом является поясничный отдел позвоночника. «Золотым стандартом» для оценки минеральной плотности кости (МПК) является проведение двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии (dual-energy X-ray absorptiometry – DXA), при выполнении которой обязательным является исследование в прямой проекции L_I-L_{IV}, при этом может быть изучено 4, 3 или 2 поясничных позвонка. Выбор в качестве зоны интереса именно этого фрагмента позвоночного столба обусловлен стабильным количеством мягких тканей с содержанием трабекулярного вещества до 66% [35].

В настоящее время наряду с рутинным рентгенологическим исследованием скелета существуют и специальные методики, такие как продольная томография изолированных слоев, телерентгенография, артрография, сопровождающаяся введением в суставную полость рентгеноконтрастного вещества с целью уточнения ее размеров и контуров, фистулография, ангиография [34, 37, 58, 60, 61, 108].

К относительно современным рентгеновским методикам изучения костной системы можно отнести компьютерную томографию, которая представляет собой классическое исследование костной ткани [165]. Компьютерная томография – послойное сканирование тканей тонким пучком рентгеновского излучения с получением двумерных снимков. Компьютерная томография позволяет получить детальное изображение структур, недоступных для визуализации при обычном рентгеновском исследовании. Кроме того, методика спиральной компьютерной томографии позволяет получить не плоскостное, а трехмерное изображение, что важно для понимания пространственного расположения костей и суставов [56].

При подозрении на метастатическое поражение костей скелета основным методом исследования ранее считалась рентгенография, которая позволяла выявить участки ткани повышенной плотности (костные метастазы) либо участки деструкции - просветления (остеокластические, литические метастазы) [32, 135, 161, 170]. В настоящее время успешно внедрены и используются более информативные методы, например, рентгеновская компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, радионуклидные методы исследования. Метод рентгеновской компьютерной томографии позволяет выявить наименьшие изменения, в том числе метастатические поражения костей наименьшего размера, причем семиотика опухолевых поражений костей при компьютерной томографии принципиально не отличалась от рентгеновской семиотики [31, 33, 77, 100, 206].

Несмотря на то, что возрастные изменения позвоночного столба, связанные со снижением МПК, описаны достаточно подробно, вопросам КТ-анатомии и МР-анатомии посвящены единичные исследования, преимущественно шейного и грудного отделов [1, 12, 38].

Практически значимым в изучении типовой анатомии, по мнению Баландина А.А. с соавт. (2025), является определение морфометрических показателей позвонков грудного отдела с помощью компьютерной томографии. Авторами было проведено исследование анатомических параметров тел грудных

позвонков в аксиальной и сагиттальной плоскостях, при этом особый клинический интерес представляли Th_I и Th_{VI}, как наиболее уязвимые структуры с точки зрения биомеханики и в связи с высоким риском повреждения спинного мозга при травмах. Достоверных гендерных различий авторы не установили, однако отметили, что с возрастом у женщин II периода зрелого возраста происходило увеличение передне-заднего индекса тела Th_I, в то время как у Th_{VI} данный показатель оставался без изменений [1]. Полученные авторами данные опровергли ранее выявленные М.А. Ивановым с соавт. (2023) гендерные отличия, характеризующиеся изменением у женщин I и II периода зрелого возраста размеров тел позвонков IV-VII в грудном отделе, сопровождающиеся уменьшением ширины позвонков по сравнению с Th_{III} и Th_{VIII} [12].

Использование КТ для исследования костных структур является общепринятым и не вызывает дискуссий, однако данный метод имеет свои ограничения, основным из которых является высокая лучевая нагрузка. В свою очередь, магнитно-резонансная томография (МРТ) лишена этого недостатка и дает возможность визуализировать костные и мягкотканые структуры.

Диагностическая ценность магнитно-резонансной томографии основана на высокой контрастности получаемого изображения, визуализации костного мозга и окружающих мягких тканей. С другой стороны, структура костной ткани визуализируется недостаточно четко, что требует дополнительной пред- и постпроцессорной обработки изображения, а также дополнительного внутривенного контрастирования препаратами гадолиния [27, 45, 57, 93, 129].

Изучением строения позвонков поясничного отдела позвоночного столба большинство исследователей занимались не с позиции нормальной анатомии, а с точки зрения клинических изменений, возникающих в возрастном аспекте и связанных с убылью МПК. Магнитно-резонансная томография дает возможность диагностировать нарушения минеральной плотности костной ткани на максимально ранних сроках, т.е. в доклинической стадии дегенеративных изменений позвоночника.

Так, Е.П. Шармазанова с соавт. (2018) при исследовании размеров тел позвонков $L_I - L_{IV}$ с помощью МРТ с последующей морфометрией установили, что у пациентов с убылью МПК и остеопорозом происходит снижение средней и передней высоты на фоне увеличения высоты и площади межпозвоночных дисков, при этом выявленные изменения были достоверно выше в группе пациентов с остеопорозом ($p < 0,01$) [40].

Особую значимость МРТ имеет с точки зрения изучения нормальной анатомии, так как по своей методологии является современным аналогом классического метода Н.И. Пирогова - распилов замороженных трупов. Однако МРТ позволяет выполнить прижизненную диагностику и дает возможность послойно визуализировать анатомические структуры и их взаиморасположение у живых людей, а также определить возможные варианты структурно-пространственной организации позвонков различных отделов позвоночного столба в рамках нормальной анатомии и выявить гендерные и возрастные особенности [3, 38].

Таким образом, по данным источников литературы, одним из ключевых объектов для исследования с целью определения убыли МПК являются тела позвонков поясничного отдела, в которых изменения выявляются на более ранних этапах остеопении и носят более выраженный характер, чем в других отделах позвоночного столба. В то же время данные, посвященные нормальной МР-анатомии, единичны и носят описательный характер, при этом интерпретация результатов во многом субъективна и зависит от диагноста и оборудования, на котором было выполнено исследование.

1.3.2. Возможности применения фрактального анализа в оценке пространственной геометрии биологических структур, основные принципы фрактального анализа

Одним из методов, позволяющих количественно измерить параметры хаотических процессов, является фрактальный анализ. Этот метод до сих пор

находится на стадии становления, поэтому его роль в качестве исследовательского инструмента до конца не определена. Между тем он открывает новые перспективы в визуализации различных органов и тканей с помощью математических моделей [9].

Фрактальный анализ основан на концепции самоподобия сложных систем: считается, что их можно разделить на более мелкие составляющие, обладающие тем же набором свойств, что и крупные части. Эта концепция была разработана в 70-х годах прошлого столетия французским математиком Бенуа Мандельбротом, его идея перевернула взгляд на природу и мир в целом. Основой его изобретения стала следующая мысль: бесконечное по разнообразию количество фигур можно получить, повторяя две операции, а именно копировать и масштабировать. В 1975 году учёный ввёл новое понятие в научный лексикон – фракталы – и встал у истоков нового раздела математики – фрактальной геометрии. Этимология слова «фрактал» произошло от однокоренного латинского слова: *fractus* – сломанный, разбитый, дробный. По определению Мандельброта, фрактал – это структура, состоящая из частей, которые в некотором смысле подобны целому. Наиболее частой аналогией, к которой обращаются авторы при описании сути фрактального анализа, является структура дерева: ветви, как и ствол дерева, дают жизнь отросткам поменьше, те – ещё меньшим – таким образом, ветвь подобна всему дереву. Иллюстрацией математической идеи Мандельброта послужили особые изображения фигур, каждый сегмент которых рекурсивно изменялся. То есть фрактал внешне одинаков, независимо от того, в каком масштабе его рассматривают. По аналогии процесс считается фрактальным, если переменная с течением времени претерпевает характерные изменения, остающиеся неизменными вне зависимости от временного интервала, в течение которого происходит наблюдение – это свойство самоподобия или масштабной инвариантности [194].

Самоподобие подразделяется на «точное», но исключительно в математических объектах и «качественное», при котором объект или процесс подобны в разных масштабах – пространственных, статистических или

временных – то есть каждый масштаб напоминает иные масштабы, но не идентичен им (фракталоподобные структуры) [19].

Структуры человеческого организма обладают сложной пространственной организацией, не поддающейся в полной мере оценке с помощью классической морфометрии – такие объекты со сложной структурой считаются квазифрактальными, то есть приближенными в своих свойствах к фракталам. Среди исследователей существует мнение, что фрактальность можно отнести к основным свойствам строения живой природы, в том числе в связи с тем, что все фракталоподобные структуры просты для генетического кодирования, а это обеспечивает хорошую воспроизводимость генетической информации [1, 9, 19, 87]. Для высокоорганизованных биологических объектов более детально описывают морфологию именно фрактальные параметры, а не стандартно используемые в морфометрии характеристики, построенные на принципах евклидовой геометрии [78, 116].

Благодаря фрактальному анализу биологических структур стала возможной разработка новых моделей для изучения различных органов и даже целых систем человеческого организма. К примеру, было создано несколько моделей кровообращения *in vitro* в виде разветвлённой «древовидной» структуры [88; 115; 167]. Описание процессов обмена веществ на уровне микроциркуляторного русла производилось в рамках теории инвазивной перколяции (протекания), исследуемой в модели капилляров. В данных условиях определяется и отображается пороговое давление каждого звена, а кровь последовательно перетекает из одного звена русла в другое – это и есть так называемая структура «ветви дерева» [115].

В исследовании Michallek F. и соавторов (2021) производилась оценка фрактальной размерности как количественного биомаркера степени злокачественности рака предстательной железы по данным рутинных МРТ предстательной железы с контрастным усилением. Фрактальная размерность может быть определена как мера хаоса или шероховатости. Например, если взять лист бумаги (являющийся двумерным объектом, если не учитывать его толщину)

и смять, то он займёт некий объём, который будет меняться в зависимости от выраженности смятия. В данном примере фрактальная размерность даёт нам меру шероховатости, которая символизирует выраженность смятия [150, 151]. Соответственно, фрактальная размерность листа превышает его топологическую размерность и ограничивается размерностью вложения, таким образом, фрактальная размерность варьирует в интервале фактических значений и может быть интерпретирована как мера корреляции.

Объекты с одинаковой фрактальной размерностью необязательно будут схожи – скорее, этот показатель характеризует геометрическую сложность объекта. С точки зрения медицинской визуализации данные можно изобразить в виде топологически двумерных изображений разных оттенков серого, которые можно интерпретировать как текстуры или карты рельефа, где интенсивность соответствует высоте текстуры [183]. Таким образом, фрактальный анализ в какой-то мере характеризуется как количественный показатель хаоса, присутствующего в текстурах. Исходя из этого, фрактальный анализ может быть применён как количественный метод анализа текстуры, предоставляющий патофизиологически значимую информацию о перфузии и, следовательно, о сосудистой структуре.

Согласно данным исследования, граница гиперваскуляризированной части опухоли представляет наибольший интерес в рамках фрактального анализа, поскольку она играет решающую роль в развитии опухоли и её ангиогенезе. Фрактальный анализ может быть добавлен к оценке PI-RADS в качестве дополнительного количественного критерия. В случаях, когда была выставлена промежуточная вероятность злокачественности (PI-RADS 3), потенциальная информативность фрактального анализа может заключаться в выявлении клинически незначительных случаев рака предстательной железы для решения вопроса о выборе в пользу определённого метода биопсии или активного наблюдения. К тому же, изменение фрактальной размерности может указывать на прогрессирование рака у пациентов под активным наблюдением. В случаях с установленной злокачественностью поражения (PI-RADS 4 и 5) фрактальный

анализ может стать инструментом для определения степени дифференцировки раковых клеток и классифицирования случая в соответствии с системой ISUP [151].

Однако, сами авторы указывают на недостатки, которые были выявлены в ходе их работы:

1. Виртуальные фантомы, на которых выполнялось данное исследование, регулярно изменяли один из аспектов морфологии кровеносных сосудов опухоли для оптимизации сосудистого дерева. Тем не менее, в процессе последующей прогрессирующей дедифференцировки влияние оптимизации сосудов ослабевает, предполагается, что в случаях высокодифференцированных опухолей метаболические и физические свойства, которыми они обладают, приобретают экстремальные значения. Логично предположить, что существующие фантомы могут отображать ангиогенез лишь на начальных стадиях процесса и не в состоянии всеобъемлюще охватить все детали такого сложного процесса. В то же время, если оценить существующие виртуальные модели с точки зрения клинического подхода, для ведения пациента намного важнее определить степень дифференцировки, злокачественности и наличие метастатического распространения, с чем фантомы справлялись, следовательно, выбранный подход вполне оправдан;

2. Сосудистые деревья имели псевдослучайно распределённые концевые отрезки, что не отражает реальную картину при опухолевом процессе и маловероятно может встретиться в реальной практике [107];

3. Алгоритм генерации сосудистого дерева подразумевал ламинарный и равномерный кровоток – характерная черта для сосудов среднего и малого калибра, в которых равномерный поток преобладает над колебательным [119]. При раке переходной зоны предстательной железы, особенно при наличии гиперперфузируемых узелковых образований, такая модель кровотока не будет в полной мере соотноситься с реальной картиной. В исследовании была представлена небольшая выборка: из 112 очагов поражения в наборе данных было доступно лишь 8 очагов 4 группы по ISUP и 7 очагов 5 группы – что не

позволяет сделать вывод о точности фрактального анализа для дифференциальной диагностики опухолей с высокой степенью злокачественности. К тому же, количество опухолей переходной зоны предстательной железы составило 16 случаев, что лишает возможности провести адекватный анализ по локализации процесса;

4. В анализируемые данные не была включена информация из историй болезней пациентов, данные о гистологическом исследовании, отсутствовали сведения о стадии заболевания, получаемом лечении и последующем наблюдении [134];

5. Опухолевая ткань в некоторых случаях смешивается с нормальной тканью предстательной железы – это так называемая разреженность опухолевой ткани. Такие опухоли хорошо визуализируются на МРТ с динамическим контрастированием, однако получаемое изображение крайне схоже с картиной при простатите [126]. К тому же, разреженность опухолевой ткани потенциально может изменить характер перфузии, повлияв на результаты фрактального анализа [59].

Вместе с тем объединение данных фрактального анализа перфузии с заключением гистологического исследования может привести к повышению точности диагностики, тем самым улучшить прогноз и выживаемость пациентов.

Фрактальный анализ также перспективен в отношении неинвазивной оценки перфузии миокарда [60]. С клинической точки зрения перфузия миокарда представляет особый интерес, поскольку эта информация важна для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, определения степени выраженности имеющихся нарушений, планирования дальнейшей тактики лечения, а также определения дальнейшего прогноза. Обычно неинвазивная оценка перфузии сводится к измерению MBF (Myocardial blood flow – количество крови, проходящей через миокард за единицу времени на единицу массы ткани) с помощью ПЭТ или МРТ. Альтернативный вариант – оценка кровотока на основе анатомии эпикардальных коронарных артерий. Полученные данные, как правило, позволяют качественно и частично количественно оценить фракцию

выброса в клинических условиях. В последние годы собранный массив данных позволил оценить прогностическую ценность компьютерной томографии миокарда, особенно в сочетании с коронарной КТ (ККТ) – сведения о КТ-перфузии особенно важны в отношении пациентов со средним и высоким сердечно-сосудистым риском. КТ-перфузия остаётся более специфичным методом и повышает общую точность диагностики в сравнении с КТ-ангиографией, однако необходимы дальнейшие улучшения. Михалек и соавторы (2017) предложили добавить к КТ-перфузии фрактальный анализ для оценки текстуры миокарда в четырёхмерных динамических объёмах для создания карты фрактальной размерности. Это карта, отражающая комплексность динамической информации в отдельных участках миокарда. По мнению авторов, различия во фрактальной размерности отражают различия в перфузии миокарда. Фрактальный анализ является лишь инструментом, основу работы которого составляют существующие динамические КТ-перфузионные изображения, а это значит, что необходимости в модифицированных или дополнительных снимках КТ нет [89, 150].

Авторы данного исследования приводят доказательства того, что показатели карты фрактальной размерности коррелируют с данными традиционной оценки КТ-перфузии, следовательно, благодаря фрактальному анализу можно выявить гемодинамически значимые заболевания коронарных артерий и найти в этих результатах отражение изменений в перфузии миокарда. Однако, внедрение данного метода в клиническую практику весьма затруднительно и связано с рядом ограничивающих факторов. Во-первых, техника проводимого исследования весьма специфична и требует одновременно наличие определённого оборудования в сочетании с особой подготовкой медицинского персонала, а также введения сосудорасширяющих препаратов, дополнительного внутривенного контрастирования, повышения лучевой нагрузки и внедрения ещё одного этапа обработки данных. Во-вторых, интерпретация результатов фрактального анализа весомо отличается от КТ-перфузии, которая повсеместно применяется в практике и даёт оценку в

привычных и понятных единицах измерения (мл/мин/масса или объём миокарда), что делает оценку данных фрактальной размерности затруднительной [101].

Несмотря на эти ограничения, фрактальный анализ представляет из себя многообещающее дополнение к уже существующим методам определения перфузии, которое может расширить имеющиеся варианты анализа КТ.

1.4. Текстурный анализ в оценке морфологии костной ткани

1.4.1. Текстурный анализ как структурный компонент радиомики

Кроме визуальной оценки медицинских изображений костей, представляется перспективным определение их текстуры, морфологической основой которой является пространственная организация трабекул компактного и губчатого костного вещества.

Текстурный анализ является объективным методом исследования, поскольку позволяет получить численные, а значит – объективные характеристики изображения [13, 20, 66]. Стоит отметить, что отечественные и зарубежные исследователи не пришли к чёткому определению понятия «текстура», поскольку существует великое множество характеристик, приписываемых той самой текстуре, а также вплоть до текущего момента отсутствует универсальный и общепринятый метод анализа текстур. Текстура является отображением морфологического субстрата исследуемой области. Характеристика текстуры изображения – это характеристика её морфологического субстрата [14, 76, 84, 147].

В основе текстурного анализа лежит определение свойств изображения по пространственным зависимостям полутонов: каждый пиксель (наименьшая неделимая единица двумерного изображения) наделяется определёнными численными характеристиками, например, для медицинских изображений основным свойством считается значение интенсивности белого цвета [86, 210].

При субъективной оценке медицинских изображений представляется возможным оценить форму объекта исследования, чёткость контуров, однородность, структуру исследуемой области, тогда как текстурный анализ позволяет определить более ста численных – а значит объективных – характеристик. К подобным свойствам можно отнести морфологические: сферичность и асферичность, сферическую диспропорцию, характеристики матрицы совпадений уровня серого (второй угловой момент, контраст и грубость матрицы, среднюю длину пробега интенсивности пикселя), характеристики интенсивности изображения (асимметрию интенсивности, эксцесс интенсивности, локальный и глобальный пики интенсивности) и другие [103, 104].

В научных публикациях последних лет можно встретить термин «радиомика». Это более широкое понятие, чем текстурный анализ: она вбирает в себя визуализационные методики, текстурный анализ, математическое моделирование и машинное обучение [130, 166, 169, 185, 213]. При использовании радиомики становится возможным определение текстурных характеристик цифрового изображения как здоровых тканей, так и вовлечённых в патологический процесс, включая очаговые поражения [5, 12, 21, 49, 138, 139, 148, 153, 168].

Определение радиомных признаков цифрового изображения подразумевает несколько этапов:

- получение изображения и выбор области интереса (сегментация) с помощью специального программного обеспечения (ПО);
- первичный сбор данных и предпроцессорная обработка: приведение изображения к стандартному пикселю или вокселю, ограничение текстуры изображения по шкале Хаунсфилда [97, 198, 208];
- изучение текстурных характеристик;
- извлечение полученных данных с последующей статистической обработкой и валидацией данных [70, 91, 187, 171, 204, 211].

Среди множества понятий радиомики обращает на себя внимание такое, как «биомаркеры изображений». Под биомаркерами понимают параметры, вычисленные на основе текстурного анализа, которые характеризуют разные патологические изменения в тканях и органах [48, 126]. С помощью специальных математических алгоритмов, а именно логической регрессии, максимализации ожиданий и нейронных сетей, процесс выбора биомаркеров для каждого варианта патологических изменений в различных тканях и областях тела автоматизируется [28, 51, 163]. Стоит отметить: чем информативнее текстурные признаки были выбраны, тем более точным и воспроизводимым становится результат анализа. Выбор наиболее информативных характеристик ограничивает влияние случайных «шумов» на решение, принимаемое диагностами. Полученные признаки становятся основой для обучения математической модели, оценивающей текстуру – а, следовательно, структурные изменения в органах и тканях [164, 184, 189].

На сегодняшний день реализуется инициатива, направленная на стандартизацию биомаркеров изображений и определение их наиболее точных текстурных характеристик - Image Biomarker Standardisation Initiative [207]. Данные характеристики можно использовать для более точного количественного анализа, применение которого до текущего момента не представляется возможным в связи с отсутствием эталона нормы текстур изображений различных органов и тканей. Основная цель радиомики – создание стандартизированной прогностической модели, способной оценить возникшие в тканях изменения. Благодаря неинвазивности своих методик, радиомика получила второе имя – виртуальная биопсия – так как численные критерии, в отличие от качественных характеристик позволяют выявить даже малейшие структурные изменения в тканях [63, 83, 95, 124]. Радиомика, помимо снижения частоты ошибок диагностики, позволяет оценить необходимость хирургических вмешательств, а также их объём [22, 90, 94]. В то же время ни радиомика, ни виртуальная биопсия не ставят перед собой задачи выявить взаимосвязь генотипа опухолей и фенотипических проявлений – они предполагают

методологический подход к выявленным изменениям [98, 99]. Несмотря на это, некоторые авторы всё же отмечают следующую взаимосвязь: установление достоверных согласующихся радиомных признаков потенциально улучшит как доклиническую диагностику, так и позволит с большей точностью определить объём оперативного вмешательства и другие методы лечения различных злокачественных процессов [39, 99, 146, 186].

В работах ряда авторов описаны и изучены методы предпроцессорной обработки медицинских изображений. Специфика выявления различных биомаркеров была представлена в многочисленных работах, посвящённых эффективности текстурного анализа медицинских изображений, сделанных при использовании разнообразных визуализационных методик, таких как УЗИ, КТ, МРТ, ПЭТ. Однако не было сформировано единого взгляда на эффективность такой обработки [40, 47, 62, 90, 104, 118, 181, 182, 190].

Авторы многочисленных работ приходят к выводу, что магнитно-резонансная томография (МРТ) является наиболее информативным методом для выполнения текстурного анализа ввиду более высокого тканевого разрешения. При этом встаёт вопрос как о выборе фазы сканирования, так и о наиболее подходящих МР-последовательностях [18, 44, 54].

В работах Wu M. et al. (2020) была предложена диагностическая модель, построенная на изучении 20 текстурных признаков, полученных по данным МРТ в T1 и T2 режимах. Данные признаки явились предикторами дифференцировки. В исследовании были использованы трёхмерная сегментация и вейвлет-фильтрация [199]. Незначительное количество исследований было выполнено на основе SWI-изображений. В исследовании Neri E. et al (2018) определили 11 текстурных предикторов низкодифференцированного гепатоцеллюлярного рака [155]. Таким образом, при использовании SWI-изображений возможно выявление изменения васкуляризации в очаге гепатоцеллюлярного рака и наличия точечных кровоизлияний, связанных с инвазией и метастазами – предикторами неблагоприятного прогноза [24, 71, 73, 109, 133, 137, 179, 200, 205, 212].

В открытых литературных источниках можно обнаружить некоторые исследования, указывающие на возможность применения радиомики в магнитно-резонансной томографии сердца и её внушительный потенциал в этом направлении [72, 80, 106, 112, 114, 132].

Можно выделить определённые аспекты, благодаря которым возможно широкое распространение данного способа анализа изображений в клиническую практику кардиологов и кардиохирургов:

1. При использовании МРТ можно получить информацию о широком спектре интенсивности сигнала вокселей – являющихся, по сути, основой текстурного анализа;

2. Наличие достаточной разрешающей способности МРТ для предоставления необходимого для радиомического анализа массива данных;

3. При выполнении МРТ имеется возможность получить информацию о патологических процессах благодаря использованию разных режимов (чего нельзя сделать при аксиальной компьютерной томографии - КТ). Так, например, в режиме кино-МРТ сердца можно оценить сократимость сердечной мышцы, T2-взвешенный режим позволяет визуализировать отёк и воспалительные изменения в миокарде, T1-взвешенный режим при раннем контрастном усилении указывает на гиперемию, а отсроченное контрастное усиление – на фиброз и зоны некроза, T1-картирование с определением внеклеточного объёма помогает выявить диффузный фиброз и ряд других патологических изменений. МР-изображения, полученные при применении ранее перечисленных режимов, можно изучать с использованием радиомического анализа, при этом характеристики, полученные в процессе обработки, будут иметь уникальный характер и позволят усовершенствовать диагностику и качество лечения пациентов [55, 114].

Применение текстурного анализа не ограничивается контрастными методиками и с его помощью можно извлечь значимую дополнительную информацию из нативных снимков. Это важная возможность, поскольку не всегда у врачей-диагностов есть возможность провести исследование с

применением контрастных веществ (например, при хронических болезнях почек). Убедительные данные об изучении текстуры нативных последовательностей T1-картирования были представлены в работе A. Larroza и соавт., которые установили, что радиомические параметры демонстрируют высокие результаты верификации повреждения сердечной мышцы при хронической ишемии миокарда с подъёмом сегмента ST [127].

В связи с тем, что радиомические признаки извлекаются поэтапно, в несколько шагов, возникают сложности с воспроизводимостью результатов и, соответственно, широким внедрением текстурного анализа в клиническую практику. Безусловно, это важная проблема и серьёзное ограничение [110].

Механизм формирования и получения МР-изображений – сложный, многогранный и уникальный процесс, потому сложности, связанные с воспроизведением текстурных признаков, ощущаются особенно остро. Этот процесс вбирает в себя сотни модифицируемых параметров, большинство которых оказывают непосредственное влияние на итоговые изображения и могут спровоцировать получение ложных радиомических признаков [197]. Для предотвращения подобных ситуаций и извлечения воспроизводимых биомаркеров, необходимо воспользоваться некоторыми стратегиями: повторное тестирование, фантомные исследования, надёжная сегментация и стандартизация проведения текстурного анализа [140, 175]. Отсутствие стандартизированных протоколов получения и анализа медицинских изображений – дополнительная проблема необходимости внедрения текстурного анализа в практическую медицину.

Ещё одним критерием, который необходимо учитывать при внедрении текстурного анализа в практическую медицину, является обобщаемость – параметр, который определяется степенью применимости полученных результатов конкретного исследования к пациентам иных групп, так как контроль на новом наборе данных – путь к прикладному использованию радиомических моделей [170, 201]. Создание и внедрение более надёжных

клинических инструментов в этом направлении требуют проведения многоцентровых исследований.

Базовым моментом в осуществлении корректного текстурного анализа является процесс сегментации изображения, то есть выбор зоны интереса. При рассмотрении вопроса с этой точки зрения автоматические и полуавтоматические методы сегментации КТ-изображений выигрывают в сравнении с послойными МР-изображениями:

1. Качество изображений, полученных с помощью КТ, обычно выше, поскольку датчики аппаратов КТ обладают более низкой чувствительностью к произвольным движениям пациента в процессе сканирования – снижается риск возникновения артефактов, связанных с дыханием, пульсацией, перистальтикой;

2. В отличие от МР-изображений, интенсивность КТ-изображений имеет чётко определённый диапазон интенсивности отдельных анатомических структур [80];

3. Современные аппараты МРТ обладают некоторыми техническими характеристиками, ограничивающими размер исследуемой зоны – обычно при выполнении МРТ получают снимки отдельных фрагментов тела пациента. Технические возможности КТ позволяют получать изображения областей произвольного размера [61];

4. Изображение, полученное при выполнении КТ, отображает уровень рентгеновской плотности различных типов тканей, при описании которых используется шкала Хаунсфилда (HU). Условно принято, что рентгеновская плотность воды = 0 HU, а воздуха – 100 HU. Во время текстурного анализа КТ-изображений возможно выставить ограничения по плотности в области интереса, следовательно, вычеркнуть из анализируемых структур жировую и соединительную ткань. Данная тактика способна повысить точность исследуемых текстурных характеристик в различных областях [157, 160].

В число методов радиомной оценки изображения входит определение области интереса, создание гистограммы интенсивности пикселей и вычисление

статистических характеристик, а именно: средней интенсивности, стандартного отклонения, асимметрии, порога, энтропии (т. е. гетерогенности оттенков серого в зоне интереса). При дальнейшем погружении в статистическое исследование можно получить следующие системные характеристики: энтропия второго порядка, однородность, контрастность, грубость, занятость изображения. Дальнейшая статистическая обработка результатов подразумевает построение регрессионных моделей, создание и обучение нейросетей [120, 158, 188, 191].

1.4.2. Перспективы и трудности применения текстурного анализа

Одной из ведущих проблем в плане внедрения массового применения радиомики является отсутствие упорядоченных данных, в том числе единой классификации параметров, описывающих текстуру изображения. Рядом авторов было предложено деление всех текстурных параметров на три группы [68; 111]:

- характеристики I порядка – описываются отдельные пиксели без учёта их взаиморасположения. К ним относятся среднее значение/медиана оттенков серого в изучаемой области, асимметрия, среднее квадратичное отклонение значения оттенков серого, градиент, энтропия, математическое ожидание.

- характеристики II порядка – при описании учитываются взаимное расположение пикселей и некоторые значения пикселей, расположенных вблизи зоны интереса (яркостные матрицы смежности). К подобным характеристикам можно причислить фильтры Габора, преобразование Фурье, признаки Тамуры, однородность, информационную меру корреляции.

- характеристики формы – показатели, используемые только для 3D-анализа, они не зависят от интенсивности серого – их значение определяется особенностями области интереса. К данной группе относятся объём, максимальный 3D-диаметр, сферичность, компактность.

Некоторые авторы выделяют прогностическую ценность конкретного показателя I порядка, а именно – энтропии. Это связано с тем, что численные показатели данного параметра не зависят от интенсивности изображения – их

определяют исключительно текстурные свойства исследуемого органа. Данная особенность выгодно отличает энтропию от других характеристик, например, от контраста изображения и его локальной равномерности. Использование количественных величин энтропии, позволяет значительно снизить зависимость полученных результатов от используемого алгоритма исследования и вариантной анатомии пациентов [153; 159].

При помощи текстурного анализа можно представить медицинское изображение в виде трёхмерного массива, состоящего из вокселей (англ. voxel – volumetric pixel), объёмных единиц структуры, а не двумерных пикселей. Еще одним неоспоримым достоинством метода текстурного анализа наряду с вышеописанными является возможность использования изображений, произведённых с помощью различных лучевых методов, будь то простые рентгеновские снимки или данные, полученные при выполнении компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии [141, 144]. Имеются сведения о попытках изучения снимков, сделанных при помощи ультразвукового исследования, но не были получены убедительные данные об эффективности применения текстурного анализа для оценки сонографических изображений.

Также ощутимым преимуществом изучения текстуры изображения является большое разнообразие численных характеристик изображения – благодаря этому исключается субъективная оценка со стороны врача-диагноста и появляется возможность наиболее точно описать структуру зоны интереса.

Наконец, применение текстурного анализа при оценке результатов лучевых методов исследования может привести к снижению материальных затрат на диагностику, повысить диагностическую ценность метода и сократить сроки обработки снимков и, соответственно, обеспечить более быстрое получение результатов [27].

Однако, несмотря на все перечисленные преимущества, на сегодняшний день применение радиомики в реальной клинической работе ограничено. Можно определить ряд причин, сдерживающих внедрение радиомики в повседневную врачебную практику:

1. Отсутствие стандартизированной методики пред- и постпроцессорной обработки изображений и способов сегментации изображения, что ставит под сомнение воспроизводимость полученных результатов;

2. Отсутствие стандартизированного программного обеспечения и алгоритма проведения текстурного анализа: существует ряд коммерческих программ и программных пакетов с открытым кодом доступа, благодаря которым становится возможным определение количественных текстурных характеристик в полуавтоматическом режиме. Среди коммерческих программ можно выделить «RADIOMICS» (Нидерланды) и «TexRAD» (Великобритания), тогда как из программ с открытым кодом доступа обращают на себя внимание «LIFEx», «IBEX», «Paradiomics». Как правило, данные программные пакеты генерируют большое число количественных признаков изображения. Несмотря на то, что большая часть из предложенных характеристик общая для всех компьютерных программ, часто название текстурного признака используется для маркировки разных по смыслу показателей [155]. Наиболее интересным и простым в применении можно назвать инструмент IBEX, оценивающий 5 основных показателей: матрицу совпадений уровней серого, матрицу длин серий серого, матрицу разности интенсивности окрестностей, гистограмму и форму [63, 92, 162, 207];

3. На данный момент применение радиомики в большинстве областей медицины, кроме онкологии, практически не рассматривается. Исследователи видят реальную перспективу использования текстурного анализа лишь в качестве прогностического инструмента, с помощью которого можно определить инвазивность опухолевого процесса и его злокачественность, спрогнозировать общую выживаемость и классифицировать опухоль [64, 75, 82, 189]. Такое восприятие радиомики, как мы считаем, в корне неверно и низводит перспективный метод до уровня вспомогательного инструмента, в то время как реальные её возможности значительно шире и ограничения их применения заключаются в отсутствие стандартизации;

4. Текстурные характеристики медицинских изображений, полученных при выполнении исследований на диагностических аппаратах разного класса, могут иметь различия;

5. Отсутствует «универсальный» набор текстурных признаков, определяемые параметры для каждой зоны интереса отличаются друг от друга;

6. Отсутствуют данные о предпочтительном для выполнения текстурного анализа формате сегментации изображения (плоское или объёмное изображение);

7. Отсутствие количественных эталонов анатомической нормы показателей текстурного анализа медицинских изображений: то есть нет стандарта, с которым можно сравнить полученные данные, и проанализировать изображение в отношении наличия или отсутствия отклонения от нормы [203];

8. Отсутствие распространённых и общедоступных сведений о возможностях использования радиомики в повседневной клинической практике.

Таким образом, анализ источников литературы убедительно доказал эффективность радиомики, фрактального и текстурного анализа в оценке структуры костной ткани, однако широкое внедрение и применение этих методов в клинической практике диагноста в данный момент ограничивается отсутствием анатомической нормы характеристик текстуры разных структур, органов и тканей, что и обуславливает актуальность данного исследования.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

2.1. Характеристика материала исследования

В соответствии с целью и задачами работы было проведено многоцентровое исследование, в ходе которого изучены магнитно-резонансные томограммы поясничного отдела позвоночного столба, выполненные в сагиттальной проекции, на которых не было обнаружено структурных изменений позвоночника. Магнитно-резонансные томограммы в формате DICOM, выполненные в период с ноября 2018 по август 2025 года в двух лечебных учреждениях: Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака (ДНР, г. Донецк) и ГБУЗ Ставропольского края «Городская клиническая больница города Пятигорска» (г. Пятигорск) – составили две базы данных МР-изображений, выполненных на аппаратуре разного класса. Первые томограммы были выполнены на магнитно-резонансном томографе 0,3 Т MRF 3000 (НПАО «АМИКО», Россия), вторые – на магнитно-резонансном томографе 1,5 Т SE Signa HDe (General Electric, США) (Рисунок 2.1).



А

Б

Рисунок 2.1 – Магнитно-резонансный томограф 0,3 Т 3000 (НПАО «АМИКО», Россия) (А) и магнитно-резонансный томограф 1,5 Т SE Signa HDe (General Electric, США) (Б)

Обе базы магнитно-резонансных томограмм принадлежали обследуемым обоим полов, зрелого возраста, проходившим обследование в указанных лечебных учреждениях по показаниям, не связанным с заболеваниями опорно-двигательного аппарата. Распределение обследуемых по полу и возрасту представлено в таблице 2.1.*

Таблица 2.1 – Абсолютное количество пациентов, включенных в исследование, для расчета показателей текстурного анализа губчатого вещества тел поясничных позвонков в норме

Возрастная группа	Всего пациентов	Набор магнитно-резонансных томограмм №1		Набор магнитно-резонансных томограмм №2	
		Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
Первый период зрелого возраста	45	12	11	11	11
Второй период зрелого возраста	44	11	11	11	11

*в работе использовалась возрастная периодизация, предложенная симпозиумом Академии педагогических наук СССР (1965 г.).

Критерии включения пациентов в исследование были следующие:

- возраст обследуемых:

I период зрелого возраста: 21-35 (мужчины); 20-35 (женщины);

II период зрелого возраста: 35-59 лет (мужчины); 35-54 лет (женщины).

- отсутствие структурных изменений тел поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томографии,

- качество анализируемых цифровых изображений, контрастность, разрешающая способность, отсутствие на них артефактов, нечетких, засвеченных участков, «обрезанные» снимки и т.д.

Критерии невключения:

- профессиональные или регулярные занятия спортом в связи с возможной перестройкой и уплотнением субкортикальной губчатой кости,

- жалобы со стороны опорно-двигательного аппарата,

- видимая деформация скелета или врожденные заболевания опорно-двигательного аппарата,
- несоответствие возрастной группе,
- травмы в анамнезе,
- лица с соматическими заболеваниями в стадии декомпенсации.

При выполнении МРТ укладка пациента проводилась в положение лежа на спине в катушке для тела, головой к апертуре магнита, с фокусировкой центрального луча лазера на 10 см выше подвздошного гребня (над серединой брюшной полости). Использовался стандартный протокол сканирования: LOCATOR (localaizer); STIR ИП COR; T2ВИ SAG; T1ВИ SAG; T2ВИ AX.

Первичная база данных включала 311 наборов магнитно-резонансных томограмм, выполненных в трех плоскостях: коронарной, сагиттальной и аксиальной – из которых после проведенного анализа было отобрано 89 цифровых изображений поясничного отдела позвоночного столба в формате DICOM, выполненных в срединно-сагиттальной проекции. Данная проекция была выбрана нами как объект изучения, так как в ней наиболее точно возможно провести разметку анатомических ориентиров.

2.2. Методы исследования

2.2.1. Морфометрические измерения анатомически значимых показателей при изучении тел поясничных позвонков на магнитно-резонансных томограммах

На магнитно-резонансных томограммах, выполненных в срединно-сагиттальной проекции, в интерактивной среде программы ImageJ производилась морфометрическая разметка (Рисунок 2.2).

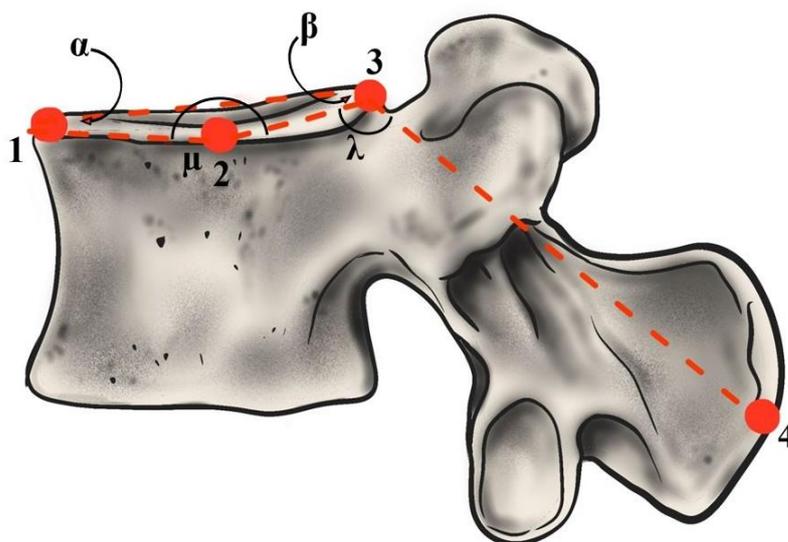


Рисунок 2.2 – Схема морфометрической разметки поясничного позвонка

Морфометрические точки соответствовали: передне-верхнему углу тела позвонка (точка 1), середине верхней замыкательной пластинки тела позвонка (точка 2), верхне-заднему углу тела позвонка (точка 3), верхушке остистого отростка (точка 4).

Референтные линии проводились 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: точки 1 (прямая 4) и точку 3 (прямая 5).

При помощи инструмента «angle» определялось численное значение 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 ($^{\circ}$).

Данные фиксировались и заносились в таблицы для дальнейшей статистической обработки. Выбор определяемых угловых параметров обусловлен тем, что первыми вследствие остеопоротических изменений тел поясничных позвонков появляются клиновидная либо двояковогнутая деформация, затрагивающие соотношения между индексами и угловыми параметрами.

2.2.2. Текстуриный анализ в обработке магнитно-резонансных томограмм позвоночного столба лиц обследуемых групп

На магнитно-резонансных томограммах поясничного отдела позвоночного столба, выполненных в срединно-сагиттальной плоскости, в интерактивной среде программы RadiAnt DICOM Viewer выбиралась область интереса в губчатом веществе тел поясничных позвонков. Определялись и фиксировались в базу данных 1 следующие статистические характеристики интенсивности сигнала выбранной области: среднее значение, минимальное и максимальное значения, стандартное квадратичное отклонение, а также площадь выбранной области.

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

КСГ = квадратичное отклонение/интенсивность сигнала

Данные заносились в базу данных и использовались для дальнейшей статистической обработки.

Уровень серого, его статистические характеристики: 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 (National Institute of Health, США). При этом сегментация изображения губчатого вещества производилась при помощи функции «обведенный контур». Полученные результаты фиксировались и заносились в таблицы, которые составили базу данных 2.

В программе с открытым кодом доступа LIFEx (версия v.25.06.1 5.0) (www.lifexsoft.org) выбиралась двумерная область интереса с помощью соответствующей функции программного обеспечения «Pencil 2D» (двумерная сегментация (Рисунок 2.3)).

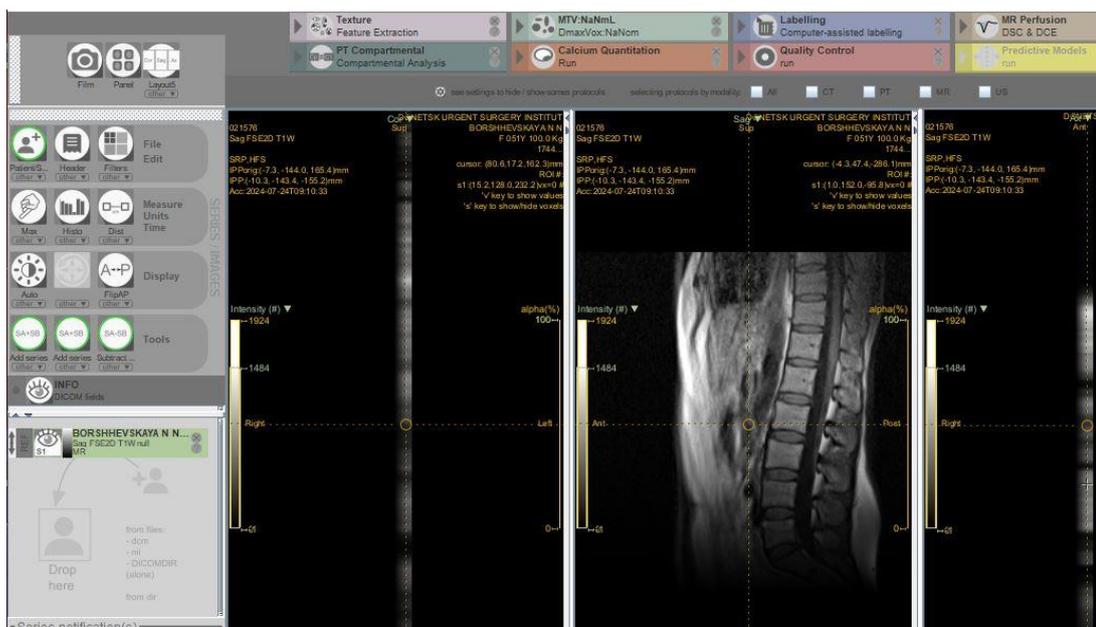


Рисунок 2.3 – Интерфейс программы LIFEx с загруженной магнитно-резонансной томограммой позвоночного столба

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} .

Для оценки воспроизводимости данного метода базы МРТ были оценены двумя независимыми экспертами – врачами-рентгенологами с достаточным опытом визуализации. Параметры текстурного анализа фиксировались отдельно для каждого ROI. Данные заносились в таблицы, которые составили базу данных (Рисунок 2.4).

	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117
1	MORPHOL	MORPHOL	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY	INTENSITY
2	18.129693	1677786.5	564.25552	14936.881	0.3459037	-0.724821	556.08685	347.13317	410.29547	460.52471	556.08685	650.13769	745.78576	122.21653	879.31646	189.61297	532.18328
3	18.129693	1089422.8	-567.59864	15312.699	-0.450389	-0.573121	-555.2462	-933.9818	-750.6010	-650.5289	-555.2462	-462.5721	-415.8626	123.74449	-364.7245	187.95687	569.25735
4	18.129693	1697999.1	571.05319	15953.633	0.5799370	-0.298345	557.64782	365.43161	423.82995	462.44699	557.64782	650.20922	751.39532	126.30769	1004.6887	187.76223	639.25711
5	18.129693	1519468.8	-574.6035	16854.659	-0.731805	0.1223564	-559.0313	-1085.615	-756.5314	-650.3676	-559.0313	-466.5145	-430.0537	129.82549	-360.5303	183.85305	725.08499
6	18.129693	1776042.0	578.23760	18093.625	0.9053643	0.7286177	559.12976	353.04855	435.21664	470.33544	559.12976	649.04541	762.38317	134.51254	1179.1096	178.70996	826.06106

Рисунок 2.4 – Фрагмент базы данных текстурных признаков пациентки 45 лет при сегментации третьего поясничного позвонка одним из экспертов

2.2.3. Выбор морфологических признаков текстурного анализа: оценка воспроизводимости и расчет конкордантности

В настоящее время известно около 200 текстурных признаков медицинского изображения, существующие программы текстурного анализа способны определять численные характеристики 70-90 из них. Поскольку основной целью данного исследования явилось изучение пространственной структуры губчатого вещества поясничных позвонков, целесообразным представлялось определение его количественных текстурных характеристик, оценивающих морфологию выбранной на медицинском изображении области.

При помощи программы с открытым кодом доступа the LifeX определялись следующие показатели текстурного анализа, характеризующие морфологию области интереса:

Показатель 1 – MORPHOLOGICAL_ApproximateVolume (Приблизительный объем; представлены оригинальные названия, используемые в программе, а также их общепринятый перевод, здесь и далее по тексту),

Показатель 2 – MORPHOLOGICAL_voxelsCounting (Число вокселей),

Показатель 3 – MORPHOLOGICAL_SurfaceArea (Площадь поверхности),

Показатель 4 – MORPHOLOGICAL_SurfaceToVolumeRatio (Соотношение поверхности и объема),

Показатель 5 – MORPHOLOGICAL_Compacity (Компактность),

Показатель 6 – MORPHOLOGICAL_Compactness1 (Компактность 1),

Показатель 7 – MORPHOLOGICAL_Compactness2 (Компактность 2).

Показатель 8 – MORPHOLOGICAL_SphericalDisproportion (Сферическая диспропорция),

Показатель 9 – MORPHOLOGICAL_MaxIntensityCoor (Максимальная интенсивности),

Показатель 10 – MORPHOLOGICAL_Sphericity (Сферичность),

Показатель 11 – MORPHOLOGICAL_Asphericity (Асферичность),

Показатель 12 – MORPHOLOGICAL_MaxIntensityCoor-RoiCentroidCoor-Dist (Расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом),

Показатель 13 – MORPHOLOGICAL_RadiusSphereNorm-MaxIntensityCoor-RoiCentroidCoor-Dist(IBSI:No) (Расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами центроида, нормализованное к радиусу сферы того же объема),

Показатель 14 – MORPHOLOGICAL_RadiusRoiNorm-MaxIntensityCoor-RoiCentroidCoor-Dist(IBSI:No) (Расстояние между координатами максимальной плотности и координатами центроида, нормализованное по максимальному радиусу),

Показатель 15 – MORPHOLOGICAL_CentreOfMassShift(IBSI:KLMA)[mm] (Смещение центра масс),

Параметр 16 – MORPHOLOGICAL_RadiusSphereNorm-CentroidCoor-WCentroidCoor-Dist(IBSI:No) (Расстояние между координатами центроида и центром интенсивности * Координаты центроида объема", нормализованное к радиусу сферы того же объема),

Показатель 17 – MORPHOLOGICAL_RadiusRoiNorm-CentroidCoor-WCentroidCoor-Dist(IBSI:No) (Расстояние между координатами центроида и центром интенсивности * Координаты центроида объема", нормализованное по максимальному радиусу),

Показатель 18 – MORPHOLOGICAL_MaxIntensityCoor-PerimeterCoor-2DAxialSmallestDist(IBSI:No)[mm] (Наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра осевого среза, заданными в координатах максимальной интенсивности),

Показатель 19 – MORPHOLOGICAL_RadiusSphereNorm-MaxIntensityCoor-PerimeterCoor-2DAxialSmallestDist(IBSI:No)[mm] (Наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра осевого среза, заданными в координатах максимальной интенсивности),

Показатель 20 – MORPHOLOGICAL_MaxIntensityCoor-PerimeterCoor-2DCoronalSmallestDist(IBSI:No)[mm] (Наименьшее расстояние между

координатами максимальной интенсивности и координатами периметра коронарного среза, заданными в координатах максимальной интенсивности),

Показатель 21 – MORPHOLOGICAL_RadiusSphereNorm-MaxIntensityCoor-PerimeterCoor-2DCoronalSmallestDist(IBSI:No)[mm] (Наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра коронарного среза, заданными в координатах максимальной интенсивности),

Периметр 22 – MORPHOLOGICAL_RadiusRoiNorm-MaxIntensityCoor-PerimeterCoor-2DCoronalSmallestDist(IBSI:No)[mm] (Наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра коронарного среза, заданными в координатах максимальной интенсивности, нормализованное к максимальному радиусу нормализованное к радиусу сферы того же объема),

Показатель 23 – MORPHOLOGICAL_MaxIntensityCoor-PerimeterCoor-2DSagittalSmallestDist(IBSI:No)[mm] (Наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра сагиттального среза, заданными в координатах максимальной интенсивности),

mm Показатель 25 – MORPHOLOGICAL_RadiusRoiNorm-MaxIntensityCoor-PerimeterCoor-2DSagittalSmallestDist(IBSI:No)[mm] (Наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра сагиттального среза, заданными в координатах максимальной интенсивности, нормализованное к максимальному радиусу нормализованное к радиусу сферы того же объема),

Показатель 26 – MORPHOLOGICAL_SphereDiameter(IBSI:No)[mm] (Сферический диаметр (диаметр сферы с равным объемом)),

Показатель 27 – MORPHOLOGICAL_IntegratedIntensity(IBSI:99N0)[Intensity] (Интегрированная интенсивность (сумма интенсивностей всех вокселей)).

Целесообразным считается использовать некоторые основные статистические характеристики текстурных показателей, характеризующих интенсивность зоны интереса, поскольку интенсивность, помимо всего прочего, обусловлена плотностью расположения костных балок в губчатом веществе:

- Показатель 28 – INTENSITY-BASED_MeanIntensity (Средняя интенсивность),
- Показатель 29 – INTENSITY-BASED_IntensityVariance (Дисперсия интенсивности),
- Показатель 30 – INTENSITY-BASED_IntensitySkewness (Асимметрия интенсивности),
- Показатель 31 – INTENSITY-BASED_IntensityKurtosis (Экцесс интенсивности),
- Показатель 32 – INTENSITY-BASED_MedianIntensity (Медиана интенсивности),
- Показатель 33 – INTENSITY-BASED_MinimumIntensity (Минимум интенсивности),
- Показатель 34 – INTENSITY-BASED_StandardDeviation (Стандартное отклонение),
- Показатель 35 – INTENSITY-BASED_MaximumIntensity (Максимальная интенсивность),
- Показатель 36 – INTENSITY-BASED_IntensityInterquartileRange (Межквартильный размах интенсивности),
- Показатель 37 – INTENSITY-BASED_IntensityRange (Диапазон интенсивности),
- Показатель 38 – INTENSITY-BASED_IntensityBasedMeanAbsoluteDeviation (Среднее абсолютное отклонение на основе интенсивности),
- Показатель 39 – INTENSITY-BASED_IntensityBasedRobustMeanAbsoluteDeviation(IBSI:1128) [y.e.] (Устойчивое среднее абсолютное отклонение на основе интенсивности),
- Показатель 40 – INTENSITY-BASED_IntensityBasedMedianAbsoluteDeviation(IBSI:N72L) [y.e.] (Медианное абсолютное отклонение на основе интенсивности),

Показатель	41	–	INTENSITY-BASED_IntensityBasedCoefficientOfVariation(IBSI:7TET)[y.e.] (Коэффициент вариации на основе интенсивности),
Показатель	42	–	HISTOGRAM_IntensityHistogramMean(IBSI:X6K6)[Intensity] (Среднее значение гистограммы интенсивности),
Показатель	43	–	HISTOGRAM_IntensityHistogramSkewness(IBSI:88K1)[Intensity] (Асимметрия гистограммы интенсивности),
Показатель	44	–	HISTOGRAM_IntensityHistogramMinimumGreyLevel(IBSI:1PR8)[Intensity] (Минимальный уровень серого гистограммы интенсивности),
Показатель	45	–	HISTOGRAM_IntensityHistogramMaximumGreyLevel(IBSI:3NCY)[Intensity] (Максимальный уровень серого гистограммы интенсивности).
Показатель	46	–	HISTOGRAM_Uniformity(IBSI:BJ5W)[Intensity] (Неоднородность гистограммы интенсивности). Далее указанные показатели обозначались как Показатель 1, Показатель 2, Показатель 3...и так далее.

Согласованность измерений в обоих случаях оценивалась при помощи метода Блэнда-Алтмана, при этом коэффициент конкордации Кендалла рассчитывался для указанных выше сценариев:

1. Оценка воспроизводимости текстурных признаков при выборе области интереса двумя независимыми врачами-диагностами (Д1 – первый врач-диагност, Д2 – второй врач-диагност) на одном изображении (И1, И2 и т.д.): Д1/Д2 – И1 и Д1/Д2 – И2.
2. Оценка воспроизводимости текстурных признаков при выполнении сканирования на диагностических аппаратах разного класса в разных медицинских учреждениях: Д1 – И1/И2 и Д2 – И1/И2.

Коэффициент конкордации Кендалла – коэффициент согласованности мнений экспертов – рассчитывался по формуле:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^m (S_i - S_{cc})^2}{N^2(m^2 - m) - N \sum_{i=1}^N T_i}$$

где:

N - количество экспертов,

m – количество оцениваемых вариантов,

S_i - сумма рангов, присвоенных решению P_i всеми экспертами:

$$S_j = \sum_{i=1}^N R_{ij},$$

где R_{ij} - ранг, присвоенный этому решению j экспертом.

Воспроизводимость текстурного признака оценивалась при значениях коэффициента конкордации 0,7 (высокая воспроизводимость) и 0,9 (очень высокая воспроизводимость).

Для оценки необходимости постпроцессорной обработки МР-изображений, позволяющих улучшить его качество, использовали последовательное наложение на выбранную зону интереса фильтров Лапласа-Гаусса: edge, periodic, reflect и zero (Рисунок 2.5).

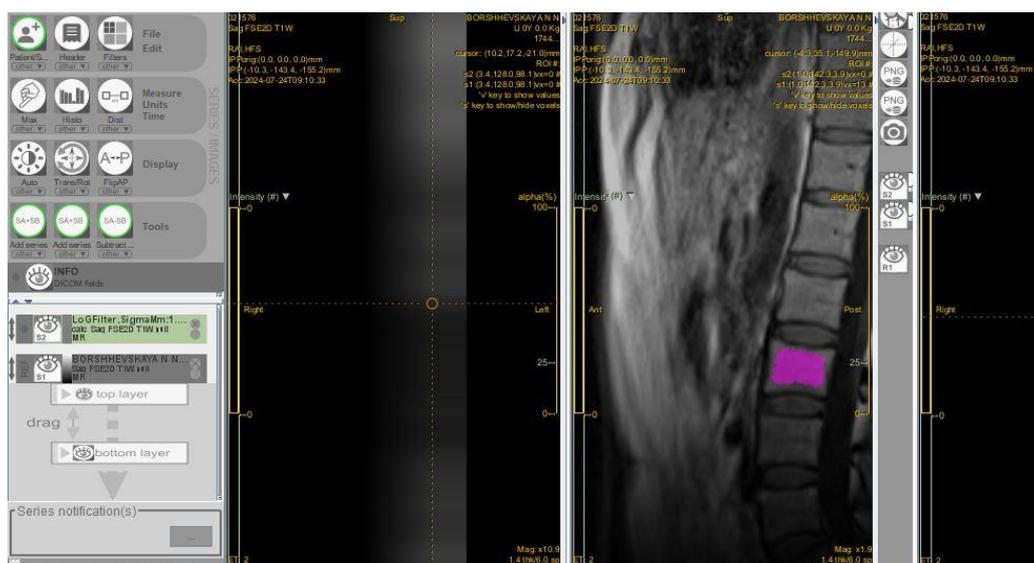


Рисунок 2.5 – Наложение на область интереса магнитно-резонансной томограммы фильтра Лапласа-Гаусса periodic

Далее определялись воспроизводимые текстурные признаки губчатого вещества тел поясничных позвонков на изображениях, обработанных фильтрами Лапласа-Гаусса. Определялись величины показателей текстурного анализа, которые могут быть использованы в качестве эталона нормы строения губчатого вещества тел поясничных позвонков в зависимости от пола и возрастной группы, а также корреляционные связи между характеристиками текстуры и возрастом.

2.3. Статистическая обработка результатов

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) и включала в себя:

- определение закона распределения частот величин с использованием коэффициента Шапиро-Уилка;

- определение параметрических или непараметрических величин описательной статистики: среднее значение, медиана, ошибка среднего, ошибка медианы, стандартное квадратичное отклонение, минимум, максимум, доверительный интервал. Выбор того или иного набора критериев определялся законом распределения частот величин изучаемых переменных;

- определение наличия или отсутствия статистически значимых отличий между несвязанными выборками с использованием параметрического критерия Стьюдента или непараметрического критерия Вилкоксона;

- определение характера связи между изучаемыми величинами при помощи параметрического коэффициента корреляции Пирсона или непараметрического коэффициента корреляции Спирмена. Сила связи оценивалась при помощи шкалы Чеддока.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА КОНФИГУРАЦИИ ТЕЛ ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ В НОРМЕ

3.1. Определение статистических характеристик угловых величин, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков

Для оценки конфигурации тел поясничных позвонков нами использовались не абсолютные или индексные размеры, а угловые параметры, вычисление которых возможно в полуавтоматическом режиме при минимальном участии оператора с небольшими временными затратами.

На первом этапе работы в интерфейсе программе ImageJ, разработанной специально для оценки и анализа медицинских изображений, на МРТ, выполненных в срединно-сагиттальной плоскости, расставлялись морфометрические маркеры и определялись численные значения следующих углов: α – угол между горизонтальной плоскостью и передним отделом верхней замыкательной пластинки тела позвонка ($^{\circ}$), β – угол между горизонтальной плоскостью и задним отделом верхней замыкательной пластинки тела позвонка ($^{\circ}$), μ - угол, образованный линией, проведенной от передне-верхнего угла тела позвонка к середине верхней поверхности тела и линией, проведенной от задне-верхнего угла тела позвонка к середине верхней поверхности ($^{\circ}$), λ – угол, образованный задним отделом верхней замыкательной пластинки и линией, проведенной от задне-верхнего угла тела позвонка к вершине остистого отростка соответствующего позвонка ($^{\circ}$), а также статистические характеристики указанных переменных в общей выборке.

Среднее значение угла α в теле первого поясничного позвонка оказалось равно $8,543 \pm 0,131^{\circ}$, в теле второго поясничного позвонка – $8,342 \pm 0,092^{\circ}$, в третьем поясничном позвонке – $9,021 \pm 0,103^{\circ}$; медиана изучаемой переменной в четвертом поясничном позвонке составила $10,281 \pm 0,115^{\circ}$; среднее значение

величины указанного угла в теле пятого поясничного позвонка оказалось равно $10,281 \pm 0,153^\circ$.



Рисунок 3.1 – Определение значений угловых характеристик в интерфейсе программы ImageJ на магнитно-резонансной томограмме обследуемого М, 37 лет

Величины параметрических или непараметрических статистических критериев, характеризующих вышеуказанные угловые параметры в поясничных позвонках, представлены в таблице (Таблица 3.1).

Среднее значение угла β в теле первого поясничного позвонка составило $9,385 \pm 0,112^\circ$, второго поясничного позвонка – $9,239 \pm 0,093^\circ$, в теле третьего поясничного позвонка – $8,891 \pm 0,081^\circ$; медиана значений изучаемого угла в теле четвертого поясничного позвонка оказалась равна $9,783 \pm 0,110^\circ$, в теле пятого поясничного позвонка – $10,672 \pm 0,105^\circ$.

Угол μ , характеризующий вогнутость верхней поверхности тела, в первом поясничном позвонке составил в среднем $167,321 \pm 0,589^\circ$, во втором поясничном позвонке – $165,271 \pm 0,621^\circ$; медиана изучаемой переменной составила в третьем поясничном позвонке $163,381 \pm 0,587^\circ$; медиана значений изучаемого угла оказалась равна в третьем и четвертом поясничных позвонках $158,371 \pm 0,728^\circ$ и $157,371 \pm 0,729^\circ$ соответственно.

Таблица 3.1 – параметры описательной статистики угловых характеристик тел поясничных позвонков у лиц зрелого возраста по данным магнитно-резонансной томографии

Угол	Номер позвонка	Статистический параметр						
		Среднее (медиана)	Ошибка	min	max	С.К.О.	Левый ДИ (95%)	Правый ДИ (95%)
α	L _I	8,543	0,131	6,274	10,211	4,782	7,211	9,683
	L _{II}	8,342	0,092	5,318	11,219	3,251	7,329	9,281
	L _{III}	9,021	0,103	6,281	10,214	3,315	7,315	10,005
	L _{IV}	9,271*	0,115*	7,167	11,281	4,258	8,148	9,138
	L _V	10,281	0,153	6,518	12,189	4,168	8,319	10,187
β	L _I	9,385	0,112	6,438	13,657	5,351	8,716	12,932
	L _{II}	9,239	0,093	6,963	12,243	4,329	8,129	10,137
	L _{III}	8,891	0,081	7,216	11,217	4,317	9,291	10,427
	L _{IV}	9,783*	0,110*	7,378	13,219	4,1835	9,529	11,174
	L _V	10,672*	0,105*	8,218	12,128	5,031	10,021	11,892
μ	L _I	167,321	0,589	155,327	177,26	11,218	159,654	168,43
	L _{II}	165,271	0,621	154,352	178,31	10,318	161,215	170,321
	L _{III}	163,381*	0,587*	156,376	173,326	9,317	161,627	170,289
	L _{IV}	158,371*	0,728*	153,329	171,328	11,184	162,288	167,273
	L _V	157,371*	0,729*	155,138	175,162	12,125	161,128	179,271
λ	L _I	136,285	0,671	129,382	147,382	10,281	131,182	142,281
	L _{II}	138,217	0,583	129,843	149,382	9,248	133,281	143,218
	L _{III}	129,389	0,611	124,281	143,291	10,288	125,483	139,483
	L _{IV}	129,344*	0,652*	125,483	144,382	11,219	126,754	139,483
	L _V	128,218*	0,557*	124,281	140,182	10,192	126,694	138,047

*- использовались непараметрические статистические критерии - медиана и ошибка медианы

Угол λ , характеризующий высоту тела, в L_I составил в среднем $136,285 \pm 0,671^\circ$, во втором поясничном позвонке – $138,217 \pm 0,583^\circ$, в L_{III} – $129,389 \pm 0,611^\circ$. Медиана значений указанного угла в L_{IV} составила $129,344 \pm 0,652^\circ$, в L_V – $128,218 \pm 0,557^\circ$.

Далее оценивалась значимость отличий между величинами указанных угловых параметров в разных поясничных позвонках. Так, статистически значимые отличия были установлены между величинами угла α в L_{III} и L_{IV} : в теле четвертого поясничного позвонка данный угловой показатель оказался статистически значимо больше ($p^*=0,005$), а также в телах L_{IV} и L_V – в данном случае величина изучаемого угла оказалась достоверно больше в теле пятого поясничного позвонка ($p=0,036$). Такой результат может быть связан с изменением конфигурации верхней поверхности тел поясничных позвонков в связи с увеличивающейся нагрузкой на нижележащие позвонки и отражать функциональные особенности формы тел позвонков поясничного отдела. В остальных позвонках статистически значимые отличия между величинами данного угла отсутствовали ($p \geq 0,05$, $p^* \geq 0,05$). Схожие закономерности отмечались и при изучении статистических характеристик угла β : его значения оказались достоверно больше в теле L_{IV} , чем в теле L_{III} . Угол μ в общей выборке не имел статистически значимых отличий в разных поясничных позвонках ($p \geq 0,05$, $p^* \geq 0,05$). Угол λ статистически значимо не отличался в телах L_I и L_{II} ($p=0,565$), при этом он оказался достоверно меньше в теле L_{II} , чем в теле L_{III} ($p=0,05$), в теле L_{III} , чем в теле L_{IV} ($p^*=0,036$), в теле L_{IV} , чем в теле L_V ($p^*=0,005$). Указанные закономерности отражали увеличение высоты тел поясничных позвонков, имеющее место в норме в связи с увеличивающейся нагрузкой на нижележащие позвонки.

Интересным представлялся вопрос о возрастных изменениях величин изучаемых углов, как в общей выборке, так и в группах лиц, отличающихся по полу и возрастной группе, как отражение изменения формы тела позвонка в связи с функциональной нагрузкой и ремоделированием губчатого костного вещества в процессе онтогенеза. Так, в общей выборке корреляционные связи между численными величинами указанных углов и возрастом обследуемых отсутствовали или характеризовались как линейные, слабые по силе ($r < 0,3$; $p \geq 0,05$).

3.2. Определение статистических характеристик угловых величин, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков, в зависимости от пола

На следующем этапе работы были определены нормативные параметры угловых характеристик тел поясничных позвонков в зависимости от пола. Среднее значение угла α в теле L_I в группе лиц мужского пола оказалось равно $7,653 \pm 0,119^\circ$, в группе лиц женского пола – $8,148 \pm 0,143,4^\circ$ в теле L_{II} – $8,237 \pm 0,103^\circ$ и $8,718 \pm 0,129^\circ$ в группе лиц мужского и женского пола соответственно, в теле L_{III} – $8,917 \pm 0,421^\circ$ и $8,713 \pm 0,397^\circ$ соответственно. Медиана значений изучаемого показателя в теле L_{IV} у мужчин составила $9,915 \pm 0,215^\circ$, у женщин – $10,271 \pm 0,236^\circ$, в теле L_V – $9,163 \pm 0,099^\circ$ и $10,162 \pm 0,125^\circ$ соответственно.

Изучаемый угол β в теле L_I составил в среднем в группе лиц мужского пола $9,781 \pm 0,128^\circ$, в группе лиц женского пола – $8,891 \pm 0,137^\circ$, в теле L_{II} – $9,463 \pm 0,128^\circ$ и $9,733 \pm 0,143^\circ$ соответственно, в теле L_{III} – $9,896 \pm 0,167^\circ$ в группе лиц мужского пола, при этом медиана указанного угла в группе лиц женского пола составила $10,155 \pm 0,129^\circ$; в теле L_{IV} медиана угла в группах лиц мужского и женского пола составила $9,271 \pm 0,129^\circ$ и $10,281 \pm 0,097^\circ$ соответственно. В теле L_V медианы значений изучаемого угла у мужчин и женщин составили соответственно $10,125 \pm 0,107^\circ$ и $10,261 \pm 0,111^\circ$.

Угол μ в теле L_I в группе лиц мужского пола оказался равен в среднем $165,452 \pm 0,673^\circ$, в группе лиц женского пола – $167,466 \pm 0,764^\circ$, в L_{II} – $165,451 \pm 0,763^\circ$ и $167,563 \pm 0,783^\circ$ у мужчин и женщин соответственно; медиана значений изучаемого угла составила в L_{III} в группе лиц мужского и женского пола $157,377 \pm 0,687$ и $158,466 \pm 0,783^\circ$ соответственно.

Медиана величин угла μ в теле L_{IV} в группе лиц мужского пола оказалась равна $155,372 \pm 0,766^\circ$, среднее значение данного угла в группе лиц женского пола составило $157,375 \pm 0,876^\circ$. В теле L_V среднее значение изучаемого угла составило $154,462 \pm 0,982^\circ$ и $156,563 \pm 0,897^\circ$ у мужчин и женщин соответственно.

Угол λ в теле L_I в среднем составил $135,473 \pm 0,764^\circ$ в группе лиц мужского пола и $136,384 \pm 0,874^\circ$ в группе лиц женского пола, в L_{II} средние значения изучаемого угла у мужчин и женщин оказались равны $137,373 \pm 0,673^\circ$ и $138,384 \pm 0,784^\circ$ соответственно, в L_{III} медиана величин данного угла у мужчин составила $130,372 \pm 0,783^\circ$, среднее значение угла в данном позвонке у женщин оказалось равно $129,365 \pm 0,872^\circ$.

Медиана значений указанного угла в L_{IV} составила $129,455 \pm 0,877^\circ$ и $130,275 \pm 0,892^\circ$ у мужчин и женщин соответственно, в L_V – $129,236 \pm 0,875^\circ$ и $127,372 \pm 0,899^\circ$ соответственно (Рисунок 3.2).

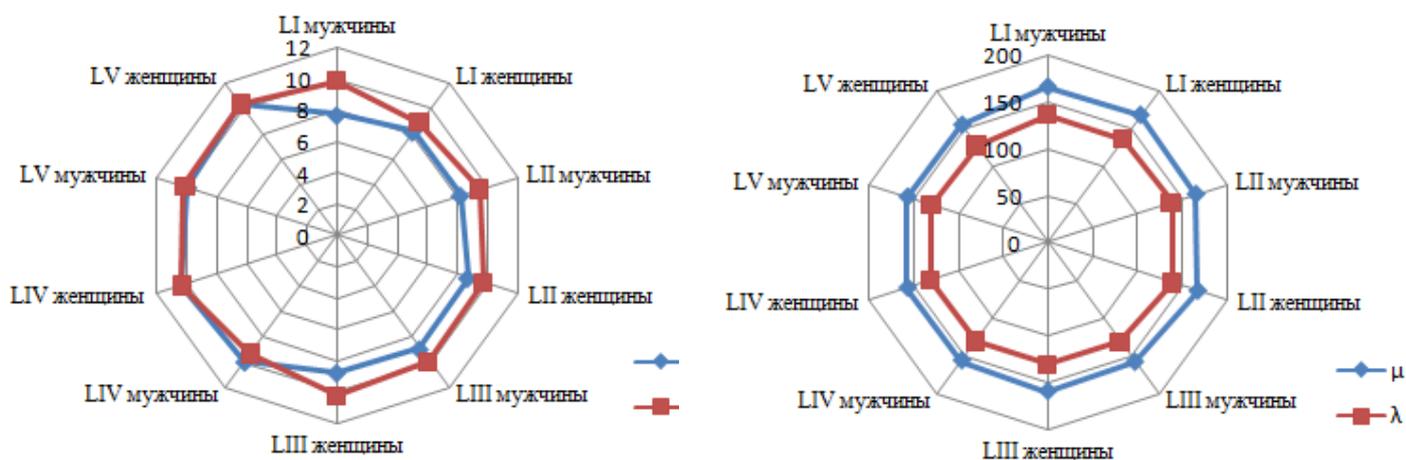


Рисунок 3.2 – Величины углов, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков у лиц разного пола по данным магнитно-резонансной томографии

Парные статистические сравнения позволили установить следующие закономерности: величины угла α оказались статистически значимо больше в группе лиц женского пола, чем в группе лиц мужского пола в телах L_{IV} и L_V ($p^*=0,045$ и $p^*=0,034$ соответственно).

Схожие статистические закономерности наблюдались и в отношении величин угла β : у женщин величины указанного угла оказались статистически значимо больше, чем у мужчин, в четвертом и пятом поясничных позвонках ($p^*=0,033$ и $p^*=0,05$ соответственно).

Величины угла μ также оказались статистически значимо больше у женщин, чем у мужчин, в L_I , L_{IV} и L_V ($p=0,005$, $p^*=0,031$, $p^*=0,012$ соответственно). Величины изучаемого угла λ оказались статистически значимо в группе лиц мужского пола, чем в группе лиц женского пола, в теле L_V ($p^*=0,045$). Выявленные статистические закономерности отражают существующий половой диморфизм в конфигурации тел поясничных позвонков, из чего следует, что для оценки угловых параметров данного отдела позвоночного столба следует использовать разные эталонные значения. При этом парные статистические сравнения не выявили достоверных отличий между величинами указанных углов в телах разных поясничных позвонков отдельно в группе лиц мужского и женского пола, за исключением величины угла μ , который в группе лиц женского пола оказался достоверно больше в теле L_{III} , чем в теле L_{IV} ($p^*=0,05$).

Изучение корреляционных связей между величинами предложенных угловых показателей и возрастом обследуемых позволило выявить наличие средних по силе отрицательных линейных связей между величинами угла μ и возрастом обследуемых в группе лиц женского пола в теле четвертого поясничного позвонка.

График выявленной корреляционной зависимости представлен на рисунке 3.3.

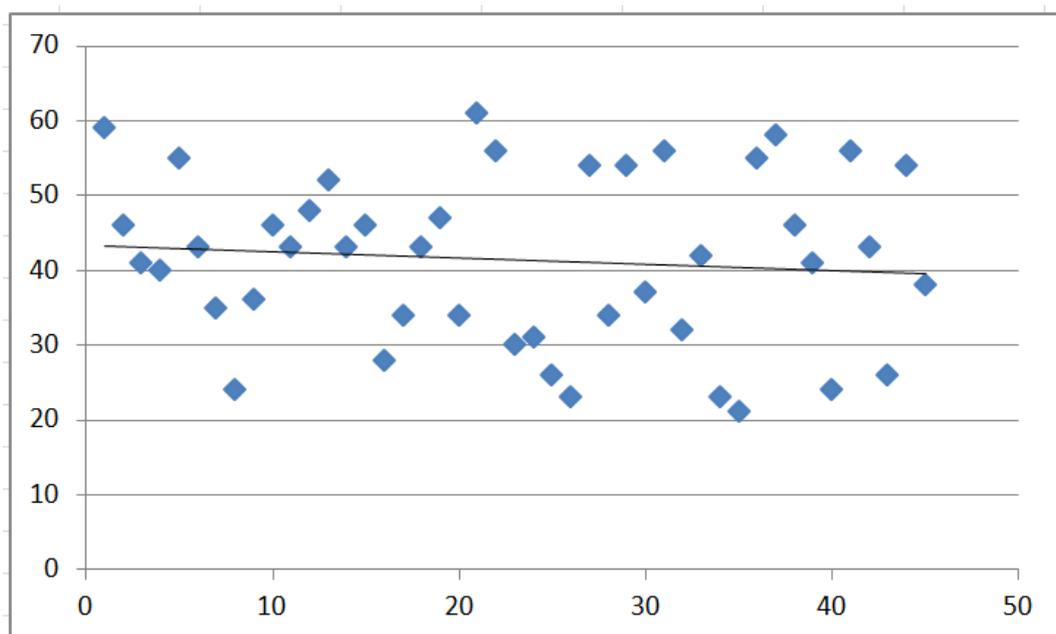


Рисунок 3.3 – График зависимости между величинами угла μ в телах четвертого поясничного позвонка и возрастом обследуемых в группе лиц женского пола по данным магнитно-резонансной томографии

Другие статистически значимые корреляционные связи между величинами изучаемых угловых параметров и возрастом обследуемых отдельно в группах, различающихся по полу, не установлены или не являлись статистически значимыми ($r < 0,3$).

3.3. Определение статистических характеристик угловых величин, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков, в зависимости от возрастной группы

Далее определялись показатели изучаемых угловых параметров у лиц первого и второго периодов зрелого возраста, которые могут быть использованы в качестве численного эталона анатомической нормы. Изучение показателей описательной статистики позволило установить, что среднее значение угла α в теле L_I у представителей первого периода зрелого возраста составило $7,873 \pm 0,231^\circ$, второго периода зрелого возраста – $9,021 \pm 0,118^\circ$, в теле L_{II} – $8,117 \pm 0,287^\circ$ и $9,118 \pm 0,277^\circ$ в группе лиц I и II периодов зрелого возраста соответственно. Медиана значений указанного угла в группе лиц I периода зрелого возраста в L_{III} составила $7,991 \pm 0,241^\circ$, в группе лиц II периода зрелого возраста – $8,016 \pm 0,301^\circ$. В теле L_{IV} медиана значений угла α оказалась равна $9,673 \pm 0,315^\circ$ и $10,677 \pm 0,316^\circ$ у лиц I и II периодов зрелого возраста соответственно, в теле L_V – $10,271 \pm 0,317^\circ$ и $10,781 \pm 0,351^\circ$ соответственно.

Угол β , имеет следующие средние значения в теле L_I : $8,566 \pm 0,341^\circ$, у лиц первого периода зрелого возраста и $10,233 \pm 0,298^\circ$ – у лиц второго периода зрелого возраста. В L_{II} среднее значение изучаемого угла оказалось равно $9,112 \pm 1,102^\circ$ и $9,561 \pm 0,998^\circ$ у лиц изучаемых возрастных групп соответственно. Медиана значений указанного угла у представителей первого и второго

периодов зрелого возраста в L_{III} составила $8,128 \pm 0,327^\circ$ и $10,172 \pm 0,298^\circ$ соответственно, в теле четвертого поясничного позвонка L_{IV} а – $9,037 \pm 0,327^\circ$ и $11,026 \pm 0,271^\circ$ соответственно. В теле L_V у лиц первого периода зрелого возраста среднее значение угла β составило $11,371 \pm 0,281^\circ$, медиана значений того же угла у лиц второго периода зрелого возраста оказалась равна $10,998 \pm 0,316^\circ$ (Рисунок 3.4).

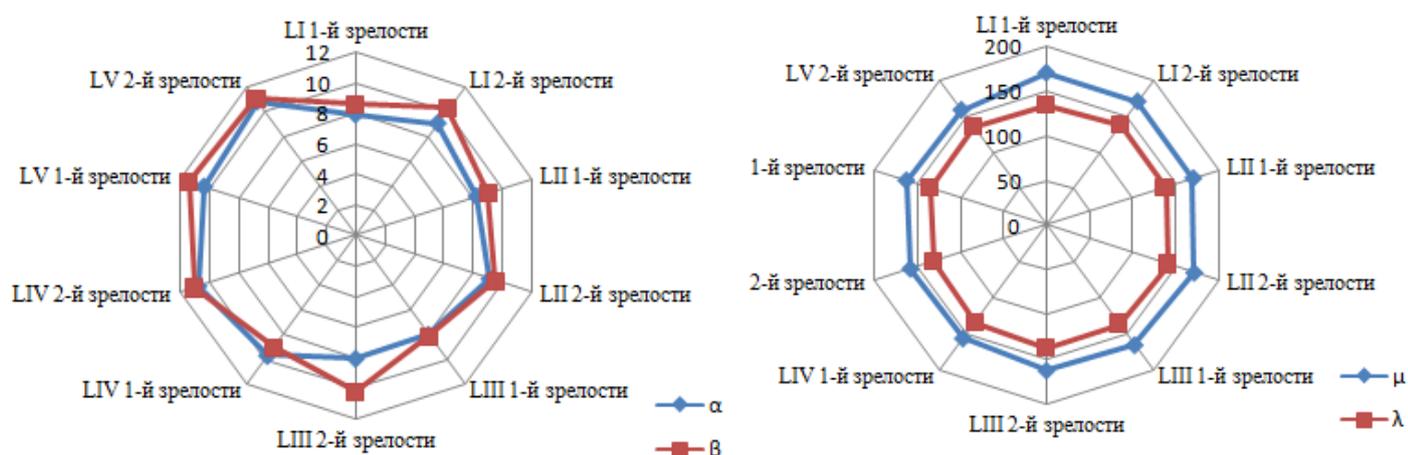


Рисунок 3.4 – величины углов, характеризующих конфигурацию тел поясничных позвонков у лиц первого и второго периодов зрелого возраста по данным магнитно-резонансной томографии

Угол μ в теле L_I у представителей I периода зрелого возраста составил в среднем $169,371 \pm 0,893^\circ$, у представителей II периода зрелого возраста – $170,137 \pm 0,981^\circ$. Среднее значение указанного угла у лиц первого и второго периодов зрелого возраста в теле L_{II} составило $169,384 \pm 0,899^\circ$ и $170,482 \pm 0,893^\circ$ соответственно. Медиана значений угла μ составила в L_{III} $164,535 \pm 0,983$ у лиц I периода зрелого возраста и $161,367 \pm 0,892^\circ$ у лиц II периода зрелого возраста. Медиана величин угла μ в теле L_{IV} у представителей первого периода зрелого возраста оказалась равна $161,463 \pm 0,872^\circ$, второго периода зрелого возраста – $158,377 \pm 0,912^\circ$. В теле L_V среднее значение изучаемого угла у лиц первого

периода зрелого возраста составило $156,271 \pm 0,998^\circ$, медиана значений того же угла у лиц второго периода зрелого возраста оказалась равна $158,676 \pm 1,281^\circ$.

Величины угла λ у обследуемых I и II периодов зрелого возраста в теле L_I составили в среднем $133,673 \pm 0,983^\circ$ и $138,473 \pm 1,199^\circ$ соответственно. В теле L_{II} величины указанного угла у представителей изучаемых возрастных групп составили в среднем $137,273 \pm 0,891^\circ$ и $140,388 \pm 0,811^\circ$ соответственно. Медиана значений угла λ в L_{III} у представителей I периода зрелого возраста оказалась равна $135,271 \pm 0,892^\circ$, среднее значение угла в данном позвонке у представителей второго периода зрелого возраста составило $136,288 \pm 0,911^\circ$. Медиана значений изучаемого угла в теле L_{IV} составила $133,391 \pm 0,977^\circ$ и $131,111 \pm 0,897^\circ$ в группах обследуемых I и II периодов зрелого возраста соответственно, в теле L_V – $135,281 \pm 1,218^\circ$ и $136,672 \pm 1,291^\circ$ соответственно.

Изучение статистических закономерностей показателей предложенных углов у представителей первого и второго периодов зрелого возраста позволяет говорить о том, что величины углов α и β в телах первого и четвертого поясничных позвонков оказались статистически значимо больше во втором периоде зрелого возраста, чем в первом ($p=0,031$, $p^*=0,004$ в первом периоде зрелого возраста соответственно; $p=0,033$ и $p^*=0,05$ во втором периоде зрелого возраста соответственно). Кроме этого, статистически значимые отличия установлены и для третьего поясничного позвонка: величина угла β здесь оказалась также статистически значимо больше во втором периоде зрелого возраста, чем в первом. Угол μ приобретал достоверно большие значения в первом периоде зрелого возраста в третьем и пятом поясничных позвонка ($p=0,032$ и $p^*=0,012$ соответственно).

Величины угла λ оказались статистически значимо больше во втором периоде зрелого возраста, чем в первом, в теле первого поясничного позвонка ($p=0,011$). Полученные статистические закономерности отражают изменение формы тел поясничных позвонков от первого ко второму периоду зрелого возраста, выражающееся в некотором уменьшении высоты средней части тела позвонка, преимущественно в телах L_I , L_{III} , L_{IV} и L_V . Как и в случае с

исследуемыми гендерными группами, для определения нормы или отклонения от нее у лиц разных периодов зрелого возраста следует использовать разные эталонные значения.

Изучение корреляционных связей между величинами изучаемых угловых показателей и возрастом обследуемых в данных возрастных группах также позволило установить среднюю по силе отрицательную линейную корреляционную связь между величинами угла μ в L_{IV} и возрастом обследуемых во втором периоде зрелого возраста, которая описывается следующим уравнением регрессии:

$$x = -1,0584y + 215,93, r^2 = 0,4527,$$

где: x – рассчитываемая величина углового показателя,

y – возраст обследуемого,

r – коэффициент достоверности аппроксимации.

Указанная зависимость отражает уменьшение средней высоты тела четвертого поясничного позвонка с возрастом во втором периоде зрелого возраста.

Другие статистически значимые корреляционные связи между величинами изучаемых угловых параметров и возрастом обследуемых не установлены или не являлись статистически значимыми ($r < 0,3$), (Рисунок 3.5).

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 .

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} .

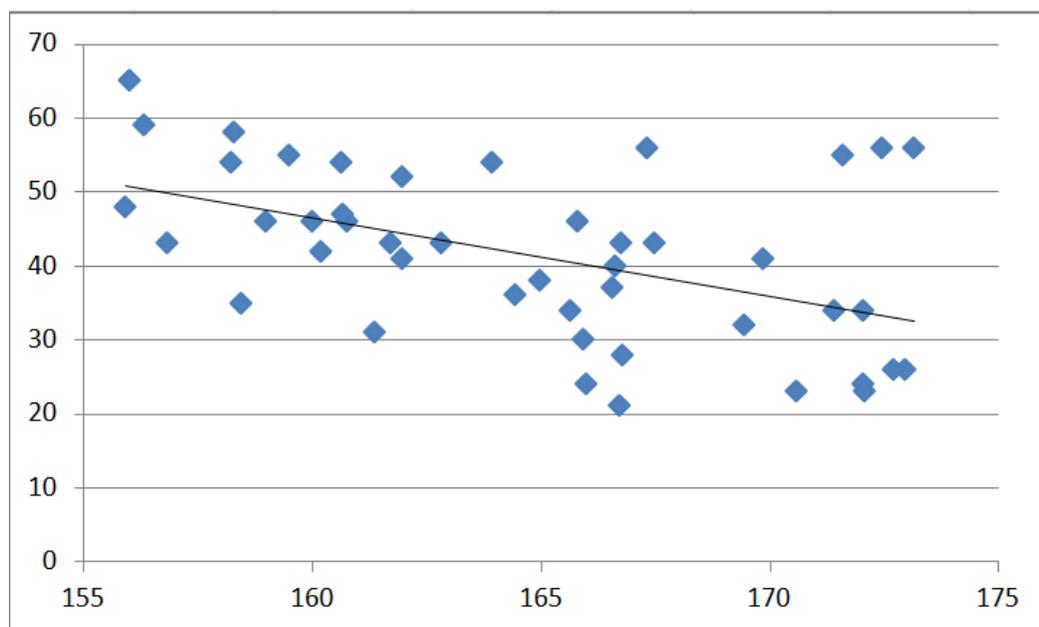


Рисунок 3.5 – График зависимости между величинами угла μ в телах четвертого поясничного позвонка и возрастом обследуемых в группе лиц второго периода зрелого возраста по данным магнитно-резонансной томографии

Угол μ оказался больше во втором периоде зрелого возраста в телах L_1 , L_{II} , и L_V , а угол λ – статистически значимо больше в I периоде зрелого возраста в теле L_1 , что отражает естественные инволюционные изменения архитектоники позвонков, предшествующие клиническому остеопорозу.

ГЛАВА 4. МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ АНАТОМИЯ ТЕКСТУРЫ ГУБЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ТЕЛ ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ У ЛИЦ ЗРЕЛОГО ВОЗРАСТА

4.1. Коэффициент структурной гетерогенности как показатель однородности распределения элементов губчатого вещества тел поясничных позвонков

Одной из основных характеристик изображения (или зоны интереса) – а значит и характеристик морфологического субстрата полученного изображения – является интенсивность сигнала, которая служит своеобразным биомаркером в оценке структуры трабекулярной кости в норме и в случае ее редификации [13].

Использование характеристик интенсивности сигнала для оценки структуры костной ткани сдерживается отсутствием эталона нормы данных показателей в зависимости от пола и возрастной группы, что нацеливает на детальное их математическое и статистическое изучение и определение численных величин, которые могут стать количественным критерием нормальной структуры губчатого вещества тел поясничных позвонков у лиц разного пола зрелого возраста.

4.1.1. Определение статистических характеристик величины интенсивности сигнала губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томографии в норме

На первом этапе исследования на магнитно-резонансных томограммах поясничного отдела позвоночного столба, выполненных в срединно-сагиттальной проекции, в интерактивной среде программы RadiAnt DICOM Viewer выделялась зона интереса, включающая губчатое вещество тел первого-пятого поясничных позвонков.

Далее фиксировались:

- площадь изучаемой области;
- среднее значение интенсивности сигнала выбранной зоны интереса;

- минимальное и максимальное значения интенсивности сигнала;
- стандартное квадратичное отклонение величины интенсивности сигнала.

Определить абсолютное значение проекционной площади губчатого вещества тел поясничных позвонков не представлялось возможным ввиду отсутствия морфометрической метки на полученных томограммах. Учитывая одинаковый масштаб снимков, достоверность отличий проекционной площади выбранной области интереса определили с помощью инструмента выделения «Open poligone», доступного для использования в интерактивной среде программы.

Статистически значимых отличий между величинами проекционной площади губчатого вещества тел L_I, L_{II} и L_{III} на МРТ не установлено (Рисунок 4.1).

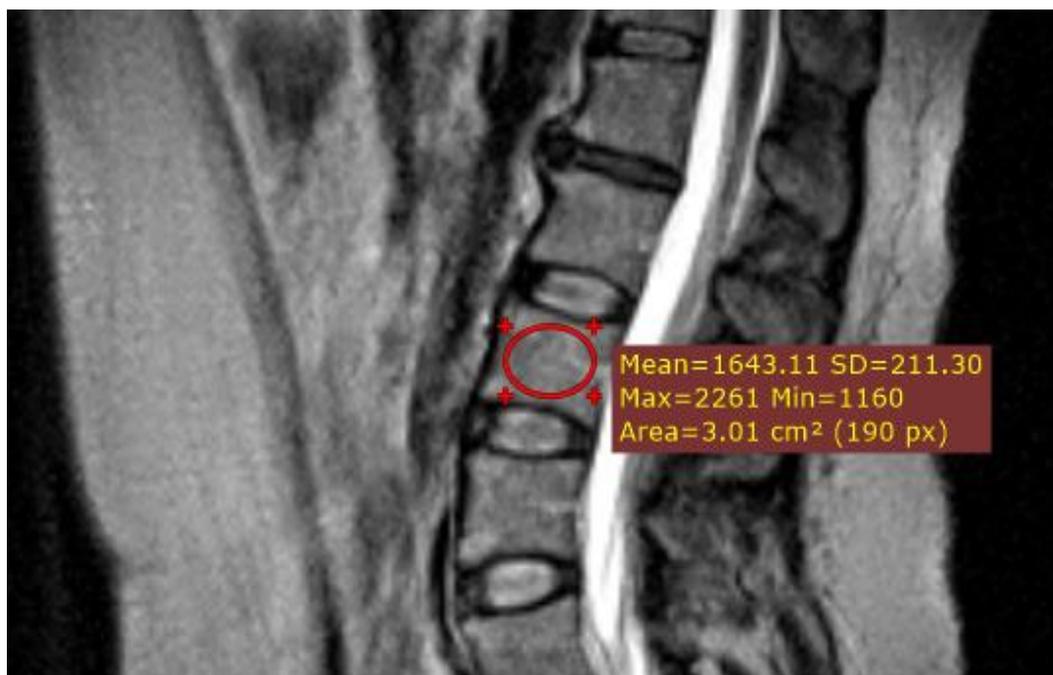


Рисунок 4.1 – Определение значений интенсивности сигнала, стандартного квадратичного отклонения и площади выбранной области интереса тела четвертого поясничного позвонка в интерактивной среде программы RadiAnt Dicom Viewer на магнитно-резонансной томограмме женщины А, 33 лет ($p^* > 0,05$, где p^* - уровень значимости при коэффициенте Вилкоксона, здесь и далее по тексту),

Проекционная площадь губчатого вещества тела четвертого поясничного позвонка оказалась статистически значимо больше, чем тела третьего поясничного позвонка ($p^*=0,036$). Статистически значимых отличий между величинами данного показателя тел четвертого и пятого поясничных позвонков также установлено не было ($p^*=0,055$).

Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием параметрических и непараметрических критериев в зависимости от того, соответствовали ли данные нормальному закону распределения частот величин или были отличны от него. Соответствие нормальному закону распределения частот определялось при помощи критерия Д'Агостино-Пирсона (нормальным считалось распределение при величине уровня значимости при данном критерии более 0,05).

Медиана величин интенсивности сигнала от зоны интереса в телах L_I в общей выборке составила $1731,31 \pm 12,21$ абсолютных безразмерных единиц (а.б.е. здесь и далее по тексту), при этом размах крайних значений составил 330,46 а.б.е. (19,09% величины медианы изучаемой переменной), в телах L_{II} – $1687,19 \pm 17,24$ а.б.е., размах значений в данном случае оказался равен – 474,56 а.б.е. (28,13% величины медианы). Медиана значений изучаемой переменной в телах L_{III} составила $1737,06 \pm 13,95$ а.б.е., размах крайних значений в данном случае оказался равен 425,8 а.б.е. или 24,51% величины медианы интенсивности сигнала в данном поясничном позвонке. Среднее значение изучаемой переменной в телах L_{IV} оказалось равно $1720 \pm 9,54$ а.б.е. (разница крайних значений составила в данном случае 330,99 а.б.е. или 19,25% величины среднего значения). Медиана величин интенсивности сигнала от губчатого вещества тел L_V составила $1690,66 \pm 16,69$ а.б.е., размах значений оказался равен 477,73 а.б.е. или 28,26% величины медианы изучаемого показателя. В общей выборке имеет место смещение величины среднего (медианы) в сторону больших значений в телах L_I и L_{IV} , в сторону меньших значений – в телах L_{II} , L_{III} и L_V .

Другие статистические величины, характеризующие интенсивность сигнала от тел поясничных позвонков, представлены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметрические и непараметрические статистические критерии, характеризующие величину интенсивности сигнала от губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томографии (n=89)

Переменная	L _I	L _{II}	L _{III}	L _{IV}	L _V
M	-	-	-	1720	-
Me	1731,31	1687,19	1737,06	-	1690,66
m	-	-	-	9,538	-
m*	12,21	17,24	13,95		16,69
min	1543,71	1470,29	1528,43	1543,71	1468,74
max	1874,17	1944,85	1954,23	1874,17	1946,47
С.К.О.	-	-	-	87,42	-
Левый ДИ (95%)	1680,54	1653,27	1694,56	1701	1661,16
Правый ДИ (95%)	1744,88	1733,07	1771,6	1739	1734,45

Примечание – M – среднее значение, Me – медиана значений, m – ошибка среднего, m* – ошибка медианы, min – минимальное значение, max – максимальное значение, С.К.О. – среднее квадратичное отклонение, n – количество исследованных томограмм поясничных позвонков, ДИ – доверительный интервал

При проведении парных статистических сравнений центров двух независимых выборок не удалось определить статистически значимых отличий между величинами интенсивности сигнала от губчатого вещества тел L_I и L_{II}, L_{II} и L_{III} ($p^*=0,364$, $p^*=0,053$ соответственно, где p^* – уровень значимости при коэффициенте Вилкоксона, здесь и далее по тексту). При этом, значение изучаемой переменной оказалось достоверно больше в губчатом веществе тел L_{III}, чем L_{IV} ($p=0,044$, где p – уровень значимости при коэффициенте Стьюдента, здесь и далее по тексту). А в L_{IV} величина интенсивности сигнала от губчатого вещества тела оказалась статистически значимо больше, чем в L_V ($p^*=0,011$). Таким образом, в общей выборке величина интенсивности сигнала от губчатого вещества тел позвонков без учета пола и возрастной группы не меняется от

первого к третьему поясничному позвонку, а затем уменьшается от третьего к пятому поясничному позвонку.

Корреляционная связь между величинами изучаемой переменной и возрастом всех обследуемых в телах всех поясничных позвонков отсутствует или характеризуется как линейная, слабая по силе, положительная (коэффициент корреляции Спирмена и уровень значимости при данном коэффициенте оказались равны в первом поясничном позвонке – $r=0,05$, $p>0,05$; во втором поясничном позвонке – $r=0,005$, $p>0,05$; в третьем поясничном позвонке – $r=0,003$, $p>0,05$, в четвертом поясничном позвонке – $r=0,169$, $p>0,05$, в пятом поясничном позвонке – $r=0,029$, $p>0,05$). Полученные данные требуют уточнения в отдельных группах лиц, отличающихся по полу и возрастной группе.

У обследуемых мужского пола величина изучаемой переменной оказалась равна в среднем $1735,74 \pm 27,55$ а.б.е. (разница между минимальным и максимальным значениями – $371,58$ а.б.е. или $22,22\%$ величины среднего). Медиана показателя интенсивности сигнала в L_I составила $1733,82 \pm 18,00$ а.б.е. (размах значений – $312,66$ а.б.е. или $18,03\%$ величины медианы), в L_{II} среднее значение указанной переменной составило $1699 \pm 16,72$ а.б.е. (размах значений – $456,54$ а.б.е. или $26,87\%$ величины среднего в телах данного позвонка). Величина интенсивности сигнала от губчатого вещества L_{III} у мужчин составила в среднем $1732 \pm 15,62$ а.б.е. (размах крайних значений оказался равен $425,8$ а.б.е. или $24,58\%$ величины среднего изучаемого показателя), от губчатого вещества L_{IV} – $1764 \pm 16,96$ а.б.е. (размах значений – $382,19$ а.б.е. или $21,67\%$ величины среднего). Среднее значение изучаемого показателя в теле L_V в группе лиц мужского пола составило $1707 \pm 18,12$ а.б.е. (разница крайних значений оказалась равна $456,93$ а.б.е. или $26,77\%$ величины медианы). Имеет место смещение средних (медиан) в сторону больших значений в L_I , L_{II} , L_{III} и L_{IV} , в сторону меньших значений – в L_V .

В группе лиц женского пола среднее значение указанной переменной в телах всех поясничных позвонков составило $1772,59 \pm 27,55$ а.б.е. (разница между минимальным и максимальным значениями – $329,91$ а.б.е. или $18,62\%$ величины

среднего). Среднее значение интенсивности сигнала в L_I оказалось равно – $1705 \pm 13,17$ а.б.е. (разница крайних значений составила 273,4 а.б.е. или 23,4% величины среднего значения изучаемого показателя). В L_{II} медиана значений составила $1654,615 \pm 27,64$ а.б.е. (разница крайних значений – 458,23 а.б.е. или 27,69% величины медианы), в L_{III} – $1716,81 \pm 20,42$ а.б.е. (разница крайних значений – 371,58 а.б.е. или 21,64% величины медианы). Среднее значение интенсивности сигнала от губчатого вещества L_{IV} составило в группе лиц женского пола $1734 \pm 13,91$ а.б.е. (разница крайних значений – 412,05 а.б.е. или 23,76% величины среднего), от губчатого вещества L_V – $1695 \pm 19,69$ а.б.е. (разница крайних значений составила 458,57 а.б.е. или 27,05% величины среднего значения).

В группе лиц мужского пола отсутствовали статистически значимые отличия между величинами интенсивности сигнала от губчатого вещества тел L_I и L_{II} ($p^*=0,325$), второго и третьего поясничных позвонков ($p=0,157$). При этом, величина указанной переменной оказалась достоверно больше в L_{III} , чем в L_{IV} ($p=0,008$), а в L_{IV} величина интенсивности сигнала оказалась статистически значимо больше, чем в губчатом веществе тела L_V ($p=0,023$).

У женщин наблюдались несколько отличные закономерности: величина интенсивности сигнала от губчатого вещества достоверно не отличалась от тел L_I и L_{II} ($p^*=0,635$), L_{II} и L_{III} ($p^*=0,316$), L_{III} и L_{IV} ($p^*=0,366$), L_{IV} и L_V ($p=0,109$). Таким образом, для того чтобы лучше понять общие закономерности изменений, происходящих в губчатом веществе тел позвонков у лиц разного пола, а следовательно – изменений интенсивности сигнала от магнитно-резонансного изображения губчатого вещества тел позвонков, следует изучить корреляционные связи между величинами изучаемой переменной и возрастом, поскольку закономерное снижение минеральной плотности губчатого вещества кости с возрастом может происходить одновременно во всех поясничных позвонках. Это приводит к отсутствию статистически значимых отличий между величинами интенсивности сигнала в разных поясничных позвонках (что можно наблюдать в группе лиц женского пола) либо преимущественно в отдельных

позвонках, что ведет к наличию статистически значимых отличий величины интенсивности сигнала между отдельными позвонками (что можно наблюдать в группе лиц мужского пола). Все сказанное требует уточнения, а именно – изучения достоверности отличий между величинами указанной переменной в группах лиц разного пола и возрастных групп.

При проведении парных сравнений между величинами изучаемой переменной у представителей разного пола были установлены статистически значимые отличия интенсивности сигнала у мужчин и женщин в L_{III} ($p^*=0,022$): у женщин величина интенсивности сигнала оказалась достоверно меньше. Такой результат, по всей видимости, связан с тем, что с возрастом снижение минеральной плотности губчатого вещества тел поясничных позвонков, которое имеет место в норме, происходит у женщин несколько быстрее, чем у мужчин, а значит – у мужчин и женщин необходимо использовать разные численные критерии нормы величины интенсивности сигнала для оценки состояния костной ткани в норме и при ее патологических изменениях.

Изучение корреляционных связей между величинами интенсивности сигнала и возрастом отдельно у лиц мужского и женского пола не позволили установить наличие таковых между численными значениями указанных переменных во всех поясничных позвонках ($r=0$, $p>0,05$). Такие результаты, вероятно, связаны с тем, что величина интенсивности сигнала учитывает не только пространственное распределение костных элементов, но и наличие красного костного мозга между ячейками губчатого вещества тел поясничных позвонков. В то же время в качестве количественного критерия нормы может быть использовано одно и то же «универсальное» численное значение, что может значительно облегчить оценку.

На дальнейшем этапе определены показатели описательной статистики значений интенсивности сигнала от губчатого вещества тел поясничных позвонков у представителей разных возрастных групп. В I периоде зрелого возраста среднее значение интенсивности сигнала от губчатого вещества без учета номера позвонка составило $1738 \pm 12,62$ а.б.е (размах значений – 324,7 а.б.е.

или 18,19% величины среднего изучаемой переменной). Во II периоде зрелого возраста показатель интенсивности сигнала оказался равен в среднем $1714 \pm 17,35$ а.б.е. Размах значений в данном случае составил 392,64 а.б.е. или 24,26% величины среднего значения. В обеих возрастных группах имеет место смещение среднего в сторону меньших значений. У мужчин этот показатель составляет $1738,31 \pm 17,35$ а.б.е. или 23,21% величины среднего в I периоде зрелого возраста и $1785,28 \pm 17,02$ а.б.е. или 23,21% величины среднего во II периоде зрелого возраста, у женщин – $1724,12 \pm 16,92$ а.б.е. или 24,17% величины среднего в I периоде зрелого возраста, $1710,68 \pm 17,35$ а.б.е. или 28,40% величины среднего во II периоде зрелого возраста.

Так, величина изучаемой переменной в губчатом веществе тел L_I у лиц первого периода зрелого возраста составила в среднем $1715 \pm 12,77$ а.б.е. (размах значений – 311,7 а.б.е. или 18,17% величины среднего указанной переменной, у мужчин величина интенсивности сигнала составила в среднем $1734 \pm 19,68$ а.б.е., у женщин – $1701 \pm 16,01$ а.б.е.), в губчатом веществе тел L_{II} – $1693 \pm 17,95$ а.б.е. (размах значений – 372,8 а.б.е. или 25,68% величины медианы, у мужчин данный показатель оказался равен в среднем $1699 \pm 20,24$ а.б.е., у женщин – $1684 \pm 32,67$ а.б.е.). Среднее значение интенсивности сигнала от губчатого вещества тел L_{III} составило $1723 \pm 17,55$ а.б.е. (размах значений – 425,8 а.б.е. или 24,71% величины среднего, в группе лиц мужского пола интенсивность сигнала от губчатого вещества тел L_{III} составила в среднем $1733 \pm 23,32$ а.б.е., медиана изучаемой переменной у женщин I периода зрелого возраста оказалась равна – $1675,91 \pm 33,91$ а.б.е.).

Среднее значение изучаемой переменной при выборе области интереса в теле L_{IV} у лиц I периода зрелого возраста оказалось равно $1769 \pm 15,65$ а.б.е, при этом размах крайних значений изучаемой переменной составил 21,6% от величины среднего значения или 382,19 а.б.е. (при этом, у мужчин величина интенсивности сигнала в выбранной области составила в среднем $1777 \pm 22,2$ а.б.е, у женщин – $1758 \pm 21,85$ а.б.е.). В телах L_V величина интенсивности сигнала от губчатого вещества составила в среднем $1706 \pm 18,58$ а.б.е., разница крайних

значений – 26,8% от величины среднего значения (457,6 а.б.е.), при этом в группе лиц мужского пола данный показатель в L_V составил $1706 \pm 25,81$ а.б.е., у женщин – $1706 \pm 27,23$ а.б.е.

Во втором периоде зрелого возраста величина изучаемой переменной (медиана) в губчатом веществе тел L_I составила $1731,67 \pm 18,64$ а.б.е. (размах значений – 330,5 а.б.е. или 19,1% величины медианы изучаемой переменной, у мужчин значение данной переменной составило в среднем $1723 \pm 22,79$ а.б.е., у женщин – $1708 \pm 19,95$ а.б.е.), в губчатом веществе тел L_{II} среднее значение интенсивности сигнала составило $1700 \pm 21,06$ а.б.е (размах значений – 204,6 а.б.е. или 12,03% величины медианы изучаемой переменной, у мужчин данный показатель оказался равен в среднем $1700 \pm 28,87$ а.б.е., у женщин – $1699 \pm 30,36$ а.б.е.). Среднее значение интенсивности сигнала от губчатого вещества тел L_{III} составило $1732 \pm 14,19$ а.б.е (размах значений – 362,04 а.б.е. или 20,9% величины среднего), в группе лиц мужского пола величина интенсивности сигнала составила в среднем $1731 \pm 19,79$ а.б.е., у женщин – $1734 \pm 20,26$ а.б.е.).

Среднее значение интенсивности сигнала при выборе области интереса в теле L_{IV} у лиц первого периода зрелого возраста оказалось равно 1729 ± 1511 а.б.е, при этом размах крайних значений изучаемой переменной составил 27,65% величины среднего значения или 478,14 а.б.е. (при этом у мужчин величина интенсивности сигнала в выбранной области составила в среднем $1747 \pm 26,46$ а.б.е, у женщин – $1716 \pm 17,49$ а.б.е.). В теле L_V величина интенсивности сигнала от губчатого вещества составила в среднем $1695 \pm 19,26$ а.б.е., или 27,01% величины среднего значения (458,57 а.б.е.), при этом в группе лиц мужского пола данный показатель оказался равен $1707 \pm 25,41$ а.б.е., у женщин – $1687 \pm 28,13$ а.б.е.

При проведении парных сравнений величин интенсивности сигнала от губчатого вещества тел поясничных позвонков у лиц I периода зрелого возраста не было установлено статистически значимых отличий между численными значениями указанной переменной в L_I и L_{II} ($p=0,311$), L_{II} и L_{III} ($p=0,234$), L_{III} и L_{IV} ($p=0,052$), L_{IV} и L_V ($p=0,524$). Таким образом, в первом периоде зрелого

возраста интенсивность сигнала не зависит от номера позвонка. Во втором периоде зрелого возраста установлены статистически значимые отличия между величинами изучаемой переменной в L_{III} и L_{IV} ($p=0,039$), а также в L_{IV} и L_V ($p=0,022$): сигнал от губчатого вещества тела L_{III} оказался достоверно интенсивнее, чем от тела L_{IV} , а от тела L_{IV} – достоверно интенсивнее, чем от тела L_V . Такие результаты требуют уточнения, поскольку могут отличаться у лиц разного пола.

При сравнении величин указанных переменных в разных возрастных группах оказалось, что достоверные отличия между величинами интенсивности сигнала в первом и втором периодах зрелого возраста отсутствуют во всех поясничных позвонках ($p>0,05$ и $p^*>0,05$), как и отсутствует линейная корреляционная связь между величинами интенсивности сигнала и возрастом обследуемых в обеих возрастных группах, включенных в исследование, либо такая связь характеризуется как слабая по силе, линейная, отрицательная и не может быть учтена как статистически значимая ($r<0,4$, $p\geq 0,05$).

Изучение статистических характеристик величины интенсивности сигнала от губчатого вещества тел поясничных позвонков отдельно у лиц разного пола – представителей разных возрастных групп позволило установить достоверные отличия лишь в теле L_{IV} у представителей разного пола первого периода зрелого возраста. Величины уровней значимости при коэффициентах достоверности отличий представлены в таблице (Таблица 4.2).

Выявленные статистические отличия носили случайный, ненаправленный характер, а величина интенсивности сигнала в целом не зависела от пола, возрастной группы и номера позвонка, что делает данный показатель «универсальным»: в качестве численного критерия нормы можно использовать одно значение, лишь при оценке интенсивности сигнала от губчатого вещества тела четвертого поясничного позвонка у мужчин и женщин численный эталон нормы имел несколько иные значения.

Таблица 4.2 – Уровни значимости при коэффициентах достоверности отличий между величинами интенсивности сигнала от губчатого вещества тел поясничных позвонков у лиц разного пола первого и второго периодов зрелого возраста

Возрастная группа, пол обследуемых		I период зрелого возраста		II период зрелого возраста
		Мужской пол	Женский пол	Мужской пол
I период зрелого возраста	Женский пол	L _I - p=0,343		
		L _{II} - p=0,691		
		L _{III} - p*=0,360	-	-
		L _{IV} - p=0,562		
		L _V - p=0,992		
II период зрелого возраста	Мужской пол	L _I - p=0,913	L _I - p=0,441	
		L _{II} - p=0,976	L _{II} - p=0,721	
		L _{III} - p=0,937	L _{III} - p*=0,393	-
		L _{IV} - p=0,389	L _{IV} - p=0,758	
		L _V - p=0,282	L _V - p=0,976	
	Женский пол	L _I - p=0,513	L _I - p=0,804	L _I - p=0,627
		L _{II} - p=0,992	L _{II} - p=0,736	L _{II} - p=0,992
		L _{III} - p=0,984	L _{III} - p*=0,089	L _{III} - p=0,913
		L _{IV} - p=0,036 [#]	L _{IV} - p=0,136	L _{IV} - p=0,309
		L _V - p=0,606	L _V - p=0,634	L _V - p=0,368

Примечание: p – уровень значимости при коэффициенте Стьюдента, p* - уровень значимости при коэффициенте Вилкоксона, p[#] - наличие статистически значимых отличий.

Действительно, распределение и плотность упаковки трабекул губчатого вещества кости у женщин менялось с возрастом и происходило это интенсивнее, чем у мужчин, что было связано со снижением уровня эстрогена [2].

Минимальное значение величины интенсивности сигнала в выбранной области интереса тел L_I колебалось от 1110 до 1200 а.б.е. (в группе лиц мужского пола – от 1110 до 1200 а.б.е., в группе лиц женского пола – от 1113 до

1198 а.б.е., у обследуемых первого периода зрелого возраста – от 1110 до 1200 а.б.е., второго периода зрелого возраста – от 1110 до 1198 а.б.е.). В губчатом веществе тел L_{II} минимальные значения изучаемой переменной находились между величинами 1108 и 1188 а.б.е. (у мужчин – между 1108 и 1187 а.б.е., у женщин – между 1110 и 1088 а.б.е., у обследуемых первого периода зрелого возраста – между значениями 1111 и 1185 а.б.е., второго периода зрелого возраста – между значениями 1108 и 1188 а.б.е.). В губчатом веществе тел L_{III} наименьшие значения величины интенсивности сигнала колебались от 1121 до 1200 а.б.е. (в группе обследуемых мужчин – от 1121 до 1194 а.б.е., в группе обследуемых женщин – от 1125 до 1200 а.б.е., у лиц первого периода зрелого возраста – от 1121 до 1200 а.б.е., у лиц второго периода зрелого возраста – от 1125 до 1195 а.б.е.). Минимальные значения интенсивности сигнала от губчатого вещества тел L_{IV} колебались от 1131 до 1190 а.б.е. (у обследуемых мужчин от 1138 до 1190 а.б.е., у обследуемых женщин – от 1131 до 1189 а.б.е., в группе лиц первого периода зрелого возраста – от 1131 до 1189 а.б.е., в группе лиц второго периода зрелого возраста – от 1134 до 1190 а.б.е.). В губчатом веществе тел L_V наименьшие значения изучаемого показателя колебались от 1108 до 1189 а.б.е. (у мужчин – от 1108 до 1189 а.б.е., у женщин – от 1109 до 1188 а.б.е., у обследуемых первого периода зрелого возраста – от 1109 до 1189 а.б.е., у обследуемых второго периода зрелого возраста – от 1108 до 1188 а.б.е.).

Максимальные значения интенсивности сигнала выбранной области интереса в теле L_I колебались от 2250 до 2319 а.б.е. (у мужчин – от 2250 до 2316 а.б.е., у женщин – от 2251 до 2319 а.б.е., в группе лиц первого периода зрелого возраста – от 2250 до 2316 а.б.е., в группе лиц второго периода зрелого возраста – от 2251 до 2319 а.б.е.). В теле L_{II} максимальные значения интенсивности сигнала колебались от 2237 до 2319 а.б.е. (в группе лиц мужского пола – от 2240 до 2319 а.б.е., в группе лиц женского пола – от 2237 до 2319 а.б.е., в первом периоде зрелого возраста – от 2238 до 2319 а.б.е., во втором периоде зрелого возраста – от 2237 до 2318 а.б.е.). В губчатом веществе тел L_{III} максимальные значения изучаемой переменной находились в интервале между 2263 и 2330

а.б.е. (у мужчин максимальные значения находились в интервале между 2265 и 2330 а.б.е., у женщин – в интервале между 2263 и 2366 а.б.е., в первом периоде зрелого возраста – между 2263 и 2330 а.б.е., во втором периоде зрелого возраста – между 2267 и 2322 а.б.е.) При выборе области интереса в теле L_{IV} максимальные значения интенсивности сигнала колебались от 2242 до 2310 а.б.е. (у мужчин – от 2242 до 2295 а.б.е., у женщин – от 2249 до 2310 а.б.е., в первом периоде зрелого возраста – от 2249 до 2303 а.б.е., во втором периоде зрелого возраста – от 2242 до 2310 а.б.е.). Максимальные значения выбранной области интереса в теле L_V колебались от 2254 до 2327 а.б.е. (в группе лиц мужского пола – от 2254 до 2327 а.б.е., в группе лиц женского пола – от 2256 до 2327 а.б.е., у обследуемых первого периода зрелого возраста – от 2254 до 2326 а.б.е., второго периода зрелого возраста – от 2256 до 2327 а.б.е.).

4.1.2. Определение статистических характеристик коэффициента структурной гетерогенности губчатого вещества тел поясничных позвонков в норме по данным магнитно-резонансной томографии

Коэффициент структурной гетерогенности – интегрированный показатель, который позволяет уточнить текстуру изображения, обусловленную не только собственно костными трабекулами, но и химическим окружением, а именно – количеством протонов в единице объема. На данном этапе развития медицинской науки количественные критерии анатомической нормы коэффициента структурной гетерогенности отсутствуют, что сдерживает его применение для оценки пространственной геометрии костных трабекул. Указанный показатель рассчитывался по формуле:

$$\text{КСГ} = \text{квадратичное отклонение/интенсивность сигнала} \quad (1)$$

где КСГ – коэффициент структурной гетерогенности

Оценка структуры губчатого вещества тел поясничных позвонков может производиться в полуавтоматическом режиме, с минимальными временными

затратами в связи с тем, что программный комплекс большинства цифровых диагностических аппаратов включает в себя средство просмотра и обработки изображений формата DICOM.

Статистическая обработка полученных результатов проведена с использованием параметрических статистических критериев, так как данные соответствовали нормальному закону распределения частот величин (уровень значимости при критерии Д'Агостино-Пирсона составлял более 0,05).

Среднее значение коэффициента структурной гетерогенности (КСГ) в L_I в общей выборке составило $0,1237 \pm 0,0024$, при этом размах значений данной переменной составил 0,0687 (55,54% величины среднего значения), в L_{II} среднее значение КСГ оказалось равно $0,1223 \pm 0,0025$, размах значений в данном случае составил 0,0632 (51,67% величины среднего значения), в L_{III} среднее значение КСГ составило $0,1217 \pm 0,0028$, при этом размах значений в данном случае составил 0,07 или 57,74% величины среднего. Среднее значение изучаемой переменной в теле L_{IV} оказалось равно $0,1196 \pm 0,0029$ (разница крайних значений составила в данном случае 0,0671 или 56,17% величины среднего). Медиана КСГ в теле L_V составила $0,1246 \pm 0,0028$, размах значений в данном случае был равен 0,0741 или 59,50% величины среднего значения. Имеет место смещение величин среднего в сторону больших значений в телах всех изучаемых позвонков.

Парные статистические сравнения центров двух независимых выборок не выявили статистически значимых отличий между величинами КСГ в телах всех поясничных позвонков ($p > 0,05$, где p – уровень значимости при коэффициенте Стьюдента, здесь и далее по тексту) (Таблица 4.3).

Таким образом, в общей выборке величина КСГ не меняется от первого к пятому поясничному позвонку, а значит для оценки структуры губчатого вещества поясничных позвонков может быть использовано одно эталонное значение, однако данные относительно абсолютных величин КСГ в норме должны быть скорректированы с учетом пола и изучаемых возрастных групп.

Таблица 4.3 – Параметрические статистические критерии, характеризующие величину КСГ губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томографии (n=89)

Переменная	L _I	L _{II}	L _{III}	L _{IV}	L _V
M	0,1237	0,1223	0,1217	0,1196	0,1246
Me	0,0024	0,0025	0,0028	0,0029	0,0028
min	0,0886	0,0957	0,0914	0,0866	0,0918
max	0,1574	0,1588	0,1617	0,1590	0,1659
СКО	0,01529	0,1616	0,01802	0,01878	0,01792
Левый ДИ (95%)	0,1189	0,1173	0,1161	0,1138	0,119
Правый ДИ (95%)	0,1285	0,1273	0,1273	0,1255	0,1301

Примечание – M – среднее значение, m – ошибка среднего, min – минимальное значение, max – максимальное значение, СКО – среднее квадратичное отклонение, n – количество исследованных магнитно-резонансных томограмм поясничных позвонков, ДИ – доверительный интервал

Далее определяли наличие корреляционных связей между величинами КСГ и возрастом в общей выборке. Так, параметрический корреляционный анализ выявил отсутствие таковых на уровне значимости при коэффициенте корреляции Пирсона $r > 0,05$ во всех поясничных позвонках. Полученные данные требуют уточнения в отдельных группах лиц, отличающихся по полу и возрасту.

Среднее значение КСГ в группе лиц мужского пола составило $0,1196 \pm 0,0030$ в теле L_I (размах крайних значений – 0,0576 или 48,18% величины среднего); $0,1216 \pm 0,0030$ – в теле L_{II} (размах значений – 0,0477 или 39,23% величины среднего значения КСГ); $0,1138 \pm 0,0033$ – в теле L_{III}, при этом разница крайних значений оказалась равна 0,0652 (57,23% величины среднего); $0,1206 \pm 0,0045$ – в теле L_{IV} (размах крайних значений – 0,0725 или 60,09% величины среднего); $0,1236 \pm 0,0042$ – в теле L_V, при этом размах крайних значений изучаемого коэффициента оказался равен 0,0741 или 59,99% величины среднего. В данной исследуемой группе имеет место смещение среднего в сторону меньших значений в телах всех поясничных позвонков.

В группе лиц женского пола среднее значение КСГ в губчатом веществе тела L_I составило $0,1278 \pm 0,0045$, при этом разница крайних значений – $0,0569$ или $44,59\%$ величины среднего для данного позвонка. В L_{II} среднее значение КСГ оказалось равно $0,1229 \pm 0,0040$, размах значений КСГ в теле данного позвонка – $0,0624$ или $50,77\%$ величины среднего. В теле L_{III} изучаемый коэффициент составил в среднем $0,1296 \pm 0,0037$, размах значений – $0,0620$ или $47,90\%$ величины среднего, в теле L_{IV} – $0,1187 \pm 0,0037$, разница крайних значений составила $0,0532$ или $44,80\%$ среднего значения. Среднее значение КСГ в теле L_V оказалось равно $0,1255 \pm 0,0037$ (размах крайних значений – $0,0612$ или $48,73\%$ величины среднего).

В группе лиц мужского пола отсутствовали статистически значимые отличия между величинами коэффициента структурной гетерогенности губчатого вещества тел поясничных позвонков ($p \geq 0,05$). В группе лиц женского пола отсутствовали статистически значимые отличия между величинами КСГ в телах L_I и L_{II} ($p=0,368$), в телах L_{II} и L_{III} ($p=0,233$), в телах L_{IV} и L_V ($p=0,198$). При этом величина изучаемого коэффициента оказалась статистически значимо больше в губчатом веществе L_{III} , чем в теле L_{IV} ($p=0,045$), что может быть связано с характерными особенностями структуры губчатого вещества у лиц женского пола.

На следующем этапе работы определялось наличие корреляционных связей между величинами КСГ и возрастом в группах лиц мужского и женского пола. У лиц мужского пола такие связи отсутствовали (на уровне значимости при коэффициенте Пирсона $>0,05$). В группе лиц женского пола установлена средняя по силе линейная положительная корреляционная связь между величинами КСГ и возрастом в L_I ($r=0,460$; $p=0,036$). Данная зависимость может быть описана следующим уравнением:

$$y = 288,96x + 1,4113, r^2 = 0,2115,$$

где y – предполагаемая величина КСГ, x – возраст обследуемого, r – величина коэффициента достоверности аппроксимации (Рисунок 4.2).

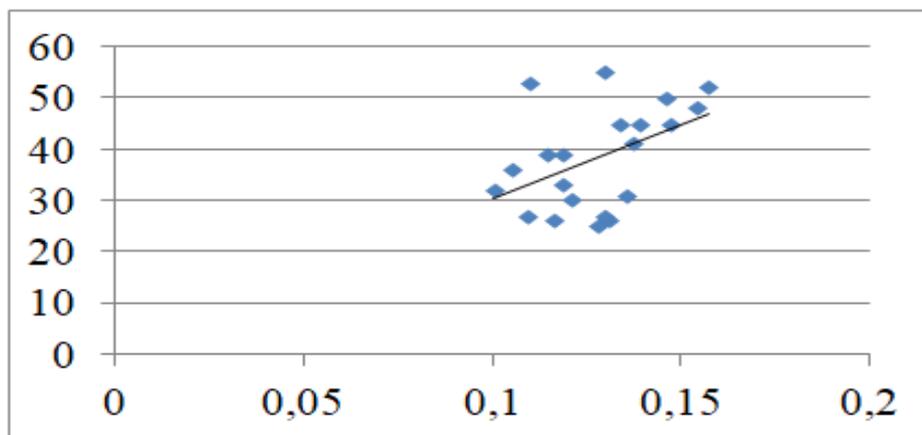


Рисунок 4.2 – График корреляционной зависимости между величинами коэффициента структурной гетерогенности и возрастом в губчатом веществе тел первого поясничного позвонка у лиц женского пола

В телах других позвонков у женщин наличия линейных корреляционных связей установлено не было.

При проведении парных сравнений между величинами КСГ у представителей разного пола было установлено, что величина указанного коэффициента оказалась достоверно больше у женщин, чем у мужчин ($p=0,045$) в теле L_{III} , в губчатом веществе тел других поясничных позвонков величины КСГ статистически значимо не отличались ($p>0,05$).

Далее были определены показатели описательной статистики величины коэффициента структурной гетерогенности тел поясничных позвонков у представителей разных возрастных групп. В I периоде зрелого возраста среднее значение КСГ губчатого вещества тел L_I составило $0,1217\pm 0,0026$, при этом размах крайних значений – 0,0459 или 37,69% величины среднего (у мужчин среднее значение КСГ составило $0,1267\pm 0,0022$, у женщин – $0,1219\pm 0,0024$). В L_{II} среднее значение КСГ оказалось равно $0,126\pm 0,0035$, разница между крайними значениями КСГ – 0,0631 (50,12% величины среднего) (у мужчин данный показатель в среднем оказался равен $0,1236\pm 0,0020$, у женщин – $0,1290\pm 0,0033$). В L_{III} величина КСГ у лиц I периода зрелого возраста – $0,1196\pm 0,0043$ (размах величин составил 0,0703 или 58,75% среднего значения)

(у женщин среднее значение КСГ составило $0,1219 \pm 0,0042$, у мужчин – $0,1217 \pm 0,0035$). В L_{IV} среднее значение КСГ – $0,1217 \pm 0,0043$ (разница крайних значений – $0,0676$ или $55,54\%$ величины среднего значения) (в группе лиц мужского пола среднее значение КСГ – $0,1216 \pm 0,0035$). В теле L_V среднее значение КСГ у лиц I периода зрелого возраста оказалось равно $0,1249 \pm 0,0047$ (разница крайних значений – $0,0441$ или $59,36\%$ величины среднего значения) (у женщин среднее значение КСГ – $0,1217 \pm 0,0030$, у мужчин – $0,126 \pm 0,0032$).

Во II периоде зрелого возраста величина КСГ в теле L_I составила в среднем $0,1257 \pm 0,0039$, разница крайних значений оказалась равна $0,0687$ или $54,69\%$ величины среднего (в группе лиц мужского пола среднее значение КСГ составило – $0,1216 \pm 0,0045$, у женщин – $0,1217 \pm 0,0022$). В L_{II} среднее значение КСГ оказалось равно $0,1186 \pm 0,0034$ (разница крайних значений – $0,0529$ ($44,57\%$ величины среднего значения) (у мужчин данный показатель оказался равен в среднем $0,1219 \pm 0,0028$, у женщин – $0,1219 \pm 0,0030$). В теле L_{III} КСГ в среднем – $0,1238 \pm 0,0036$ (размах данного коэффициента – $0,606$, что составило $48,93\%$ величины среднего значения, при этом, у мужчин КСГ составил в среднем $0,1217 \pm 0,0032$, у женщин – $0,1216 \pm 0,0054$). В теле L_{IV} КСГ оказался равен $0,1176 \pm 0,0039$ (размах – $0,0691$ или $58,83\%$ величины среднего в данном позвонке, в группе лиц мужского пола данной возрастной группы средняя величина КСГ оказалась равна $0,1218 \pm 0,0024$, у женщин – $0,1217 \pm 0,0033$). В теле L_V КСГ в среднем – $0,1242 \pm 0,0029$ (разница крайних значений – $0,0610$ или $49,12\%$ величины среднего значения КСГ в данном позвонке, у обследуемых мужчин данной возрастной группы – $0,1220 \pm 0,0048$, у обследуемых женщин – $0,1219 \pm 0,0024$).

Величины коэффициента структурной гетерогенности у лиц как первого, так и второго периода зрелого возраста статистически значимо не отличались в телах всех поясничных позвонков ($p > 0,05$). Таким образом, возраст обследуемых не влияет на величину изучаемого коэффициента, а нормативные значения такового могут быть использованы без учета возраста.

Как и в случае с величиной интенсивности сигнала от тел поясничных позвонков, величины КСГ в разных возрастных группах статистически значимо не отличались в I и II периодах зрелого возраста в телах всех поясничных позвонков ($p > 0,05$), также отсутствует линейная корреляционная связь между величинами интенсивности сигнала и возрастом обследуемых в обеих возрастных группах, включенных в исследование ($r=0$, $p > 0,05$).

Парные статистические сравнения позволили установить достоверные отличия величин КСГ в L_{III} между исследуемыми группами лиц мужского пола, I периода зрелого возраста и лиц женского пола II периода зрелого возраста, а также в L_I между группами лиц мужского пола II периода зрелого возраста и лиц женского пола II периода зрелого возраста. Величины уровней значимости при коэффициенте достоверности отличий Стьюдента представлены в Таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Уровни значимости при коэффициентах достоверности отличий между величинами коэффициента структурной гетерогенности губчатого вещества тел поясничных позвонков у лиц разного пола первого и второго периодов зрелого возраста

Возрастная группа, пол обследуемых		I период зрелого возраста		II период зрелого возраста
		Мужской пол	Женский пол	Мужской пол
I период зрелого возраста	Женский пол	$L_I - p=0,836$		
		$L_{II} - p=0,969$		
		$L_{III} - p=0,543$	-	-
		$L_{IV} - p=0,616$		
		$L_V - p=0,604$		
II период зрелого возраста	Мужской пол	$L_I - p=0,335$	$L_I - p=0,441$	
		$L_{II} - p=0,969$	$L_{II} - p=0,178$	
		$L_{III} - p=0,928$	$L_{III} - p=0,077$	-
		$L_{IV} - p=0,616$	$L_{IV} - p=0,791$	
		$L_V - p=0,680$	$L_V - p=0,694$	
	Женский	$L_I - p=0,105$	$L_I - p=0,096$	$L_I - p=0,034^*$

	пол	L _{II} - p=0,432 L _{III} - p=0,022*	L _{II} - p=0,060 L _{III} - p=0,953	L _{II} - p=0,474 L _{III} - p=0,070
		L _{IV} - p=0,491 L _V - p=0,969	L _{IV} - p=0,679 L _V - p=0,875	L _{IV} - p=0,945 L _V - p=0,848

Примечание: p – уровень значимости при коэффициенте Стьюдента,

* - статистически значимые отличия.

Несмотря на то, что разброс абсолютных значений коэффициента структурной гетерогенности был меньше (0,08655-0,16598), чем в случае с показателем интенсивности сигнала изучаемой области (1108-2330 а.б.е.), относительная разница крайних значений интенсивности сигнала оказалась меньше (18,03%-28,3%, в случае в КСГ данная разница составила 37,69-59,99% величины среднего значения), что делает данный показатель предпочтительным для использования в качестве численного эталона при определении наличия или отсутствия отклонений от нормы строения губчатого вещества тел поясничных позвонков.

Статистически значимые отличия между величинами как интенсивности сигнала, так и КСГ губчатого вещества тел в L_I и L_{II}, L_{II} и L_{III}, как у мужчин, так и у женщин отсутствовали. Величины интенсивности сигнала у мужчин достоверно уменьшались по направлению от L_{III} к L_V, у женщин – статистически значимо не отличались в телах всех поясничных позвонков. Величины КСГ статистически значимо не отличались в L_{III}, L_{IV} и L_V у мужчин, а в группе лиц женского пола – в L_{IV} и L_V, при этом были достоверно больше в теле L_{III}, чем L_{IV}.

Величины как показателя интенсивности сигнала от губчатого вещества тел поясничных позвонков, так и коэффициента структурной гетерогенности статистически значимо не отличались в разных позвонках у обследуемых первого периода зрелого возраста и в L_I, L_{II} и L_{III} у обследуемых второго периода зрелого возраста. Однако КСГ у представителей второго периода зрелого возраста оказался статистически значимо больше в теле L_{III}, чем L_{IV}, а в теле L_{IV} – статистически значимо больше, чем в теле L_V.

Величины обоих вышеуказанных показателей статистически значимо не отличались у обследуемых разного пола и разных возрастных групп, кроме следующих случаев: величина интенсивности сигнала оказалась достоверно больше у лиц мужского пола I периода зрелого возраста, чем у лиц женского пола II периода зрелого возраста в губчатом веществе тела L_{IV} , а величина КСТ оказалась достоверно больше у лиц женского пола II периода зрелого возраста, чем у лиц мужского пола II периода зрелого возраста в губчатом веществе тела L_{III} , а также достоверно больше у женщин во II периоде зрелого возраста, чем у мужчин во II периоде зрелого возраста в губчатом веществе тела L_I .

4.2. Уровень серого как один из показателей математической морфологии тел поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томографии

Структура губчатого вещества костной ткани может быть охарактеризована с использованием показателя текстурного анализа – уровня серого. Для оценки математической морфологии зоны интереса использовали стандартный программный продукт с открытым кодом доступа – утилиту ImageJ, которая позволяет численно оценить морфологию выбранной области (Рисунок 4.3).

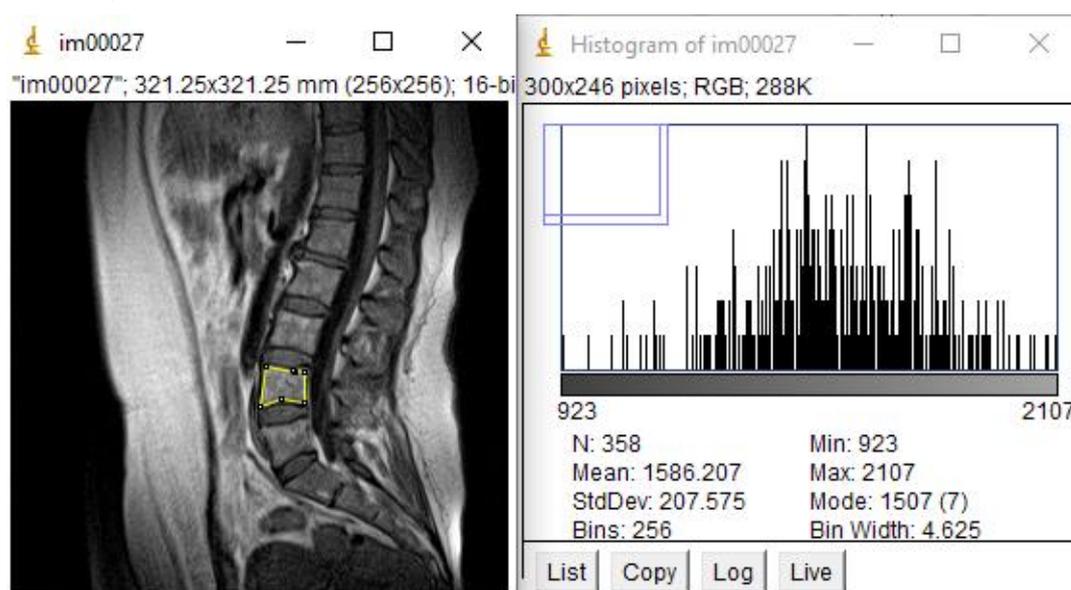


Рисунок 4.3 - Гистограмма и некоторые статистические показатели уровня серого в выбранной области интереса (тело L_{IV}) у обследуемой Н, 45 лет

МРТ обладает мощными способностями визуализации и представляет интерес в плане получения объективной информации о происходящих микроструктурных сдвигах в той или иной области тела человека, а также является наиболее адекватным объектом для проведения текстурного анализа

Ранее было установлено, что текстурные характеристики статистически значимо не отличаются в губчатом веществе тел поясничных позвонков, некоторая разница показателей текстуры установлена у лиц разного пола и разных возрастных групп в L_{III} и L_{IV}, L_{IV} и L_V. Учитывая сказанное, целесообразным представлялось определение величин, характеризующих уровень серого цвета, именно в телах L_{III} и L_{IV}, поскольку данные, характеризующие L_V, обычно не используются в диагностических целях. Для определения статистических характеристик уровня серого использовались МРТ позвоночного столба, выполненные на одном и том же диагностическом оборудовании.

4.2.1. Определение статистических характеристик величин уровня серого LIII и LIV по данным магнитно-резонансной томограммы

В соответствии с целью и задачами работы были определены показатели описательной статистики величин уровня серого губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков по результатам текстурного анализа с применением программного обеспечения ImageJ (National Institutes of Health, США). При проведении статистического анализа полученных результатов были использованы параметрические и непараметрические критерии в зависимости от того, подчинялось ли распределение частот изучаемых величин нормальному закону или отличалось от него (Рисунок 4.4).

Размах значений показателя уровня серого в губчатом веществе тела третьего поясничного позвонка оказался равен 170,775, что составляет 141,3% от величины медианы данного показателя, размах значений показателя уровня серого в губчатом веществе тела четвертого поясничного позвонка – 160,392

(152,2% от величины соответствующей медианы). Другие статистические величины, характеризующие уровень серого в телах L_{III} и L_{IV} , представлены в таблице 4.5.

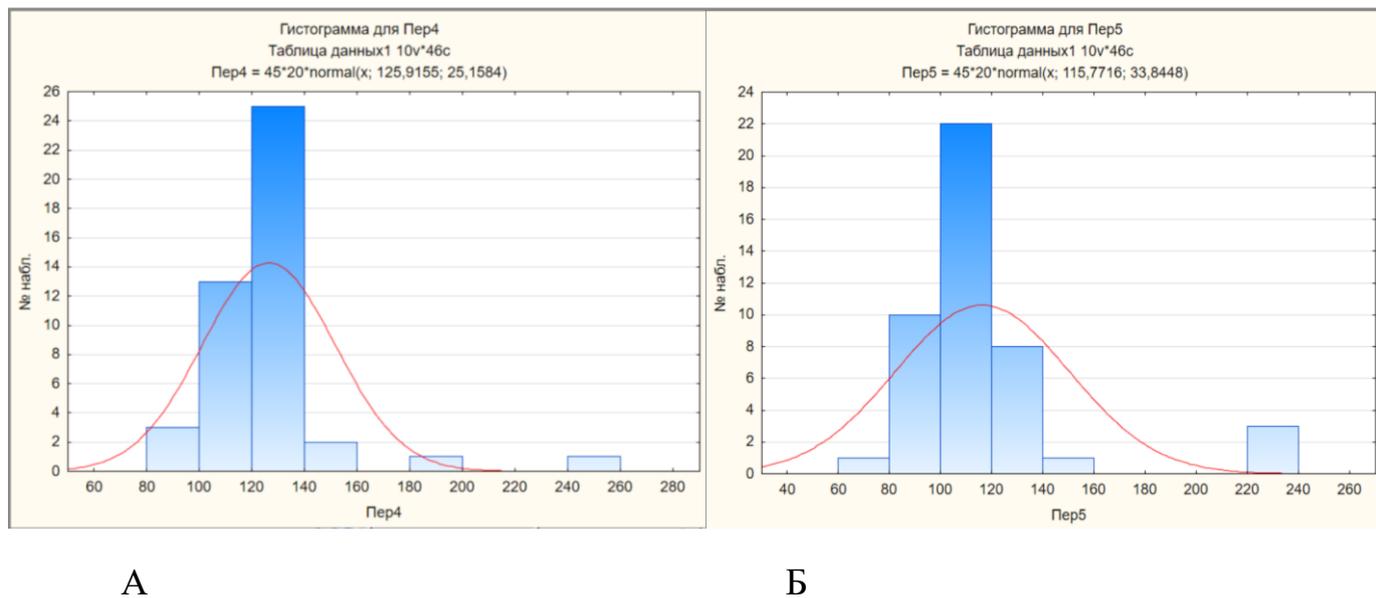


Рисунок 4.4 - Гистограммы распределения частот уровня серого в губчатом веществе тел L_{III} (А) и L_{IV} (Б) по результатам текстурного анализа

Таблица 4.5 - Параметры описательной статистики величин уровня серого в губчатом веществе тел L_{III} и L_{IV} по результатам текстурного анализа (n=89)

Статистическая переменная	L_{III}	L_{IV}
Me	120,861	105,157
m	7,779	7,257
min	86,412	73,145
max	257,187	233,537
I квартиль	111,085	94,309
III квартиль	136,814	121,404
Левый ДИ (95%)	113,747	94,755
Правый ДИ (95%)	133,527	116,05

Примечание: Me – медиана, m – ошибка медианы, min – минимальное значение, max – максимальное значение, ДИ – доверительный интервал, n – количество исследованных магнитно-резонансных томограмм.

При проведении парных сравнений между величинами изучаемой переменной в губчатом веществе тел L_{III} и L_{IV} были установлены статистически значимые отличия: значения уровня серого в теле L_{III} оказались статистически значимо больше, чем соответствующие значения в теле L_{IV} ($p^*=0,005$, где p^* – уровень значимости при критерии Вилкоксона). Таким образом, в общей выборке величина уровня серого тел позвонков без учета пола и возрастной группы уменьшается от третьего к четвертому поясничному позвонку.

Корреляционная связь между величинами изучаемой переменной и возрастом всех обследуемых в губчатом веществе тел L_{III} и L_{IV} отсутствует или характеризуется как линейная, слабая по силе, положительная (коэффициент корреляции Спирмена и уровень значимости при данном коэффициенте оказались равны в L_{III} – $r^*=0,167$, $p>0,05$; в L_{IV} – $r^*=0,288$, $p>0,05$). Полученные данные требуют уточнения в отдельных группах лиц, отличающихся по полу и возрастной группе, но при этом позволяют говорить об изучаемом параметре как о достаточно стабильной величине, которая не связана с возрастом в выборке лиц первого и второго периодов зрелого возраста. При этом в норме показатели уровня серого принимают статистически отличающиеся значения при анализе изображений губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} : ткани изучаемых позвонков в норме имеют неодинаковую структуру, которая может быть связана с разной нагрузкой на изучаемые компоненты осевого скелета.

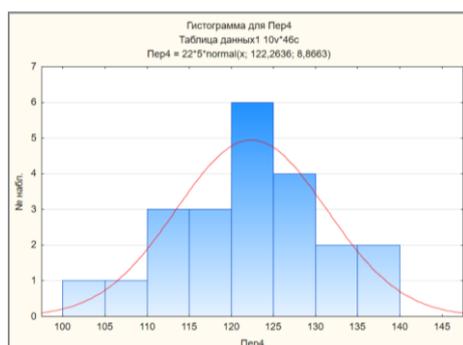
Также представителями численных параметров структуры губчатого вещества тел поясничных позвонков являются такие характеристики меры отклонения формы распределения, как асимметрия и эксцесс. Эксцесс (Kurtosis) является мерой сглаженности (остро- или плосковершинности) гистограммы распределения частот уровней серого выбранной области интереса. Асимметрия (Skewness) характеризует, в какую сторону относительно центра смещена гистограмма частот уровней серого, то есть в какую сторону сдвинуто большинство значений распределения. Поскольку значение асимметрии может принимать как положительные, так и отрицательные величины, определить статистические характеристики указанной переменной не представляется

возможным. Так, левонаправленную асимметрию (значение асимметрии больше 0, сдвиг графика распределения частот уровней серого в сторону меньших значений) в области интереса в третьем поясничном позвонке имели 38%, в четвертом поясничном позвонке – 42% изученных магнитно-резонансных томограмм, правонаправленную асимметрию (значение асимметрии меньше 0, сдвиг графика распределения частот уровней серого в сторону больших значений) – 62% изученных медицинских изображений при сегментации губчатого вещества тела L_{III} , 58% - при сегментации губчатого вещества тела L_{IV} .

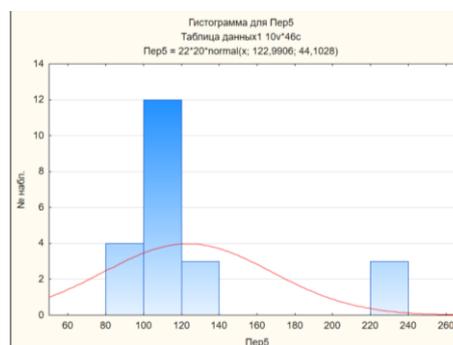
Экссесс (Kurtosis) характеризует «крутизну» подъема кривой распределения и указывает, является ли распределение пологим или крутым. При этом коэффициент эксцесса принимает значения больше 0 при островершинном распределении, меньше 0 – при плосковершинном. Данный коэффициент распределения также может принимать как положительные, так и отрицательные значения, ввиду чего определять параметры описательной статистики и подвергать статистическому анализу такие величины представляется некорректным. Островершинное распределение (большинство значений уровня серого на гистограмме распределения изучаемой величины близки к центральным тенденциям) было характерно для 71,3% изученных магнитно-резонансных томограмм при сегментации губчатого вещества тела третьего поясничного позвонка и для 67,7% – при изучении губчатого вещества тела четвертого поясничного позвонка. Плосковершинное распределение (большинство значений уровня серого на гистограмме распределения изучаемой величины были далеки от центральных тенденций – много низких и высоких значений) оказалось присуще 28,7% изученных медицинских изображений при анализе зоны интереса в теле третьего поясничного позвонка, 32,3% – при сегментации губчатого вещества тела четвертого поясничного позвонка.

4.2.2. Определение статистических характеристик величин уровня серого третьего и четвертого поясничных позвонков в зависимости от возрастной группы

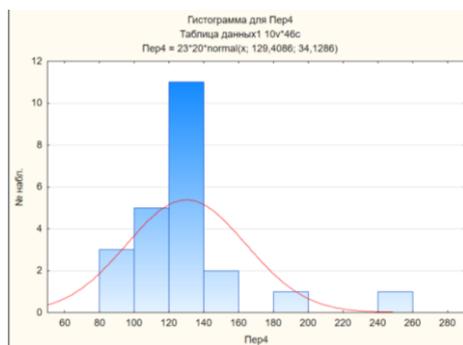
Следующим этапом исследования явилось определение параметров описательной статистики величины уровня серого в губчатом веществе тел L_{III} и L_{IV} в зависимости от возрастной группы обследуемых в норме. Выбор статистических критериев обуславливался соответствием распределения частот изучаемых величин нормальному закону (Рисунок 4.5).



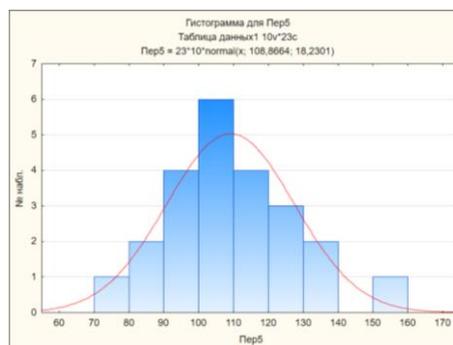
А



Б



В



Г

Рисунок 4.5 - Гистограммы распределений частот величин уровня серого в губчатом веществе тел третьего и четвертого поясничных позвонков у лиц первого периода зрелого возраста (А, В), второго периода зрелого возраста (Б, Г) по результатам текстурного анализа магнитно-резонансных томограмм

В группе лиц I периода зрелого возраста среднее значение уровня серого в губчатом веществе тел L_{III} составило 122,5±5,517, медиана значений изучаемого показателя в L_{IV} оказалась равна 103,805±23,74. Среди лиц II периода зрелого возраста медиана значений уровня серого в губчатом веществе L_{III} зафиксирована на уровне 120,7345±10,26, среднее значение изучаемой характеристики в L_{IV} составило 108,5±4,368 (Таблица 4.6).

Таблица 4.6 - Параметры описательной статистики величин уровня серого губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков в зависимости от возрастной группы по результатам текстурного анализа (n=89)

Переменная	Первый период зрелого возраста		Второй период зрелого возраста	
	L _{III}	L _{IV}	L _{III}	L _{IV}
Me	-	103,805	120,7345	-
M	122,5	-	-	108,5
m	-	23,74	10,26	-
m*	5,517	-	-	4,368
С.к.о.	14,6	-	-	19,54
I квартиль	-	94,373	112,4475	-
III квартиль	-	128,665	136,544	-
min	103,57	86,472	86,412	73,145
max	138,732	248,537	257,187	159,434
Левый ДИ (95%)	109	90,426	113,747	99,38
Правый ДИ (95%)	136	233,537	135,167	117,7

Примечание: Me – медиана, M – среднее, m – ошибка среднего, m* – ошибка медианы, С.к.о. – среднее квадратичное отклонение, min – минимальное значение, max – максимальное значение, ДИ – доверительный интервал, n – количество проанализированных магнитно-резонансных томограмм

Наименьшее минимальное значение уровня серого зарегистрировано при анализе изображений четвертого поясничного позвонка среди лиц II периода

зрелого возраста и составило 73,145, наибольшее максимальное значение – при анализе изображений третьего поясничного позвонка в указанной возрастной группе (257,187). Размах величин изучаемого показателя в группе лиц первого периода зрелого возраста составил 35,162 (28,7% среднего значения) и 143,111 (137,95% медианы) для третьего и четвертого поясничных позвонков соответственно, в группе лиц второго периода зрелого возраста – 170,775 (141,5% медианы) для третьего поясничного позвонка и 86,289 (79,5% среднего значения) для четвертого поясничного позвонка.

В результате проведения парных статистических сравнений величин уровня серого губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} в пределах одной возрастной группы выявлено, что среди лиц I периода зрелого возраста искомые величины в телах L_{III} и L_{IV} статистически значимо не отличаются ($p^* > 0,05$). Для представителей II периода зрелого возраста величины изучаемого показателя тел L_{III} оказались статистически значимо выше значений переменной L_{IV} ($p^* = 0,013$). При парных сравнениях величин уровня серого тел L_{III} у лиц I и II периода зрелого возраста статистически значимых отличий выявлено не было ($p^* > 0,05$), аналогичные результаты получены для тел L_{IV} .

Таким образом, значения уровня серого L_{III} и L_{IV} сходны в первом периоде зрелого возраста и принимают неодинаковые значения ко второму периоду зрелого возраста, что может свидетельствовать об особенностях возрастных изменений минеральной плотности костной ткани данных элементов осевого скелета. Важно отметить, что тканевая структура и третьего, и четвертого поясничных позвонков в отдельности в их «онтогенезе» от первого ко второму периоду зрелого возраста остается относительно неизменной в контексте изучения величин уровней серого. Полученные данные позволяют говорить о сходной морфологической структуре L_{III} и L_{IV} у лиц зрелого возраста в норме, что может быть связано с равномерной нагрузкой и одинаковой выполняемой функцией указанных элементов осевого скелета.

При этом нельзя считать, что плотность костной ткани изучаемых объектов, равно как и величина уровня серого их изображений, будет

тождественно меняться при развитии той или иной патологии, поскольку в каждом конкретном случае могут иметь место индивидуальные особенности труда и отдыха человека, неодинаковое распределение нагрузки на тот или иной позвонок, аспекты кровоснабжения и иннервации. Данные заключения обуславливают необходимость изучения эталонных значений уровня серого для третьего и четвертого поясничных позвонков отдельно, а также в пределах разных возрастных групп.

В результате изучения наличия и характера связи между величинами уровня серого L_{III} и L_{IV} была установлена средняя по силе линейная положительная корреляционная связь между данными показателями во втором периоде зрелого возраста для четвертого поясничного позвонка ($r=0,542$ на уровне значимости $p=0,014$, где r – коэффициент корреляции Пирсона) (Рисунок 4.6).

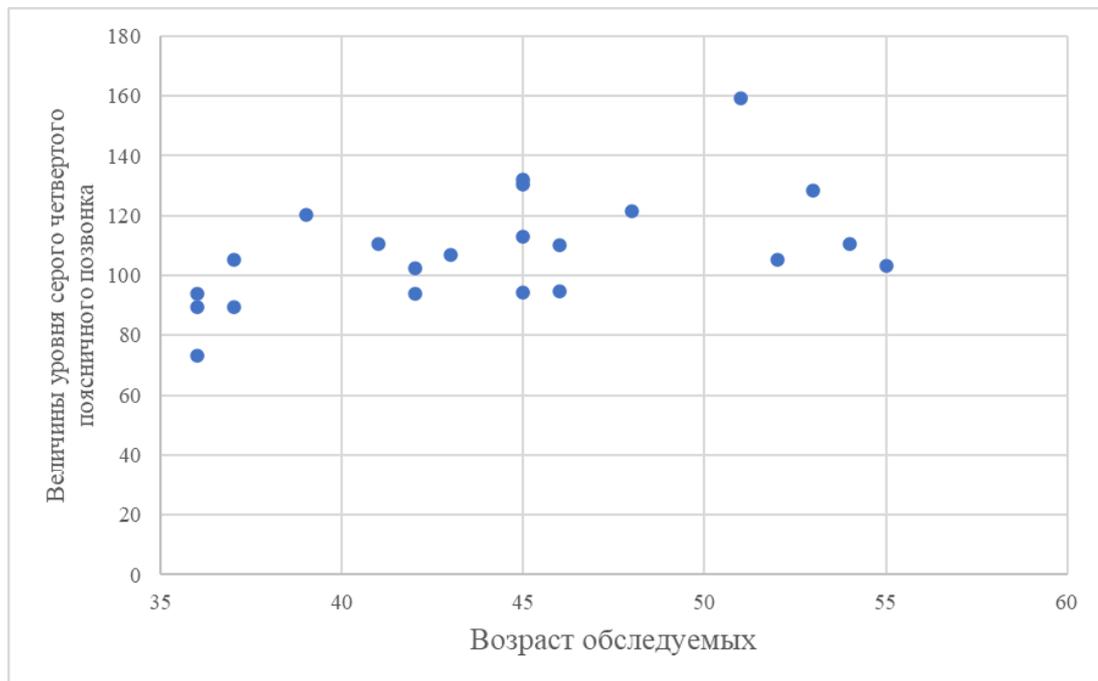


Рисунок 4.6 - График зависимости величины уровня серого губчатого вещества тел четвертого поясничного позвонка от возраста в группе лиц второго периода зрелого возраста

Для остальных изучаемых рядов величин корреляционные связи выявлены не были ($r=0$ и $r^*=0$ на уровне значимости $p>0,05$).

Характер линейной зависимости между величинами уровня серого четвертого поясничного позвонка и возрастом лиц второго периода зрелого возраста описывается следующим уравнением регрессии:

$$y = 1,7756x + 30,666, R^2 = 0,4933 \quad (1),$$

где y – искомая величина уровня серого,

x – возраст обследуемого в годах,

R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации.

Учитывая довольно высокий уровень коэффициента достоверности аппроксимации, данное уравнение регрессии может служить прогностическим инструментом, позволяющим установить нормальный уровень серого в том или ином возрасте в пределах изучаемой возрастной группы.

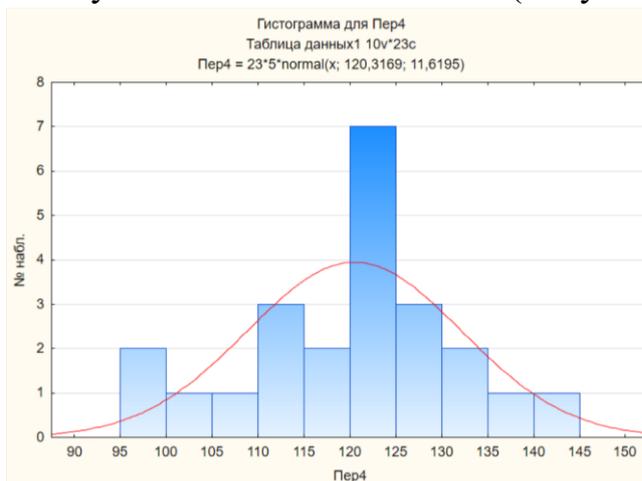
Левонаправленную асимметрию в области интереса в L_{III} имели 38,7%, в L_{IV} – 43,2% изученных МРТ обследуемых I периода зрелого возраста, правонаправленную асимметрию – 61,3% изученных медицинских изображений при сегментации губчатого вещества тела L_{III} , 56,8% – при сегментации губчатого вещества тела L_{IV} .

Во II периоде зрелого возраста левонаправленную асимметрию имели 37,8% (39,6%) изученных изображений, правонаправленную асимметрию – 62,2% (60,4%) изображений при сегментации губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} соответственно. Острове́ршинное распределение было характерно для 66,3% изученных магнитно-резонансных томограмм обследуемых I периода зрелого возраста при сегментации губчатого вещества тела L_{III} и для 67,8% – при изучении губчатого вещества тела L_{IV} . Плосковершинное распределение оказалось присуще 33,7% изученных медицинских изображений при анализе зоны интереса в теле L_{III} , 32,2% – при сегментации губчатого вещества тела L_{IV} .

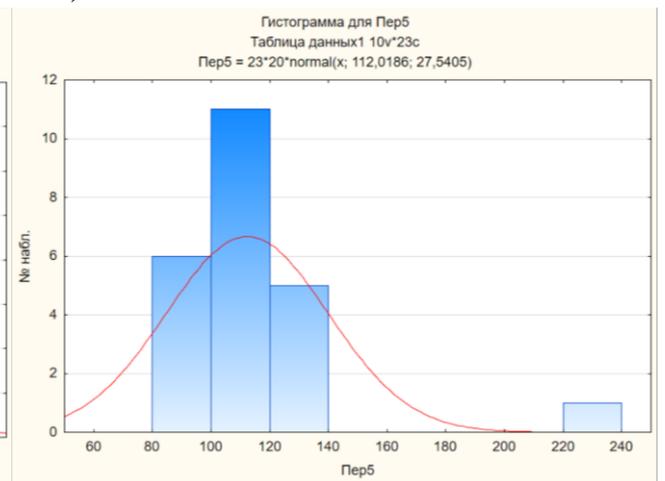
Во II периоде зрелого возраста островершинное распределение оказалось у 71,1% (68,3%) изученных магнитно-резонансных томограмм при выборе области интереса в губчатом веществе тел L_{III} и L_{IV} соответственно, плосковершинное распределение – у 28,9% (31,7%) изученных объектов соответственно.

4.2.3. Определение статистических характеристик величин уровня серого третьего и четвертого поясничных позвонков в зависимости от пола

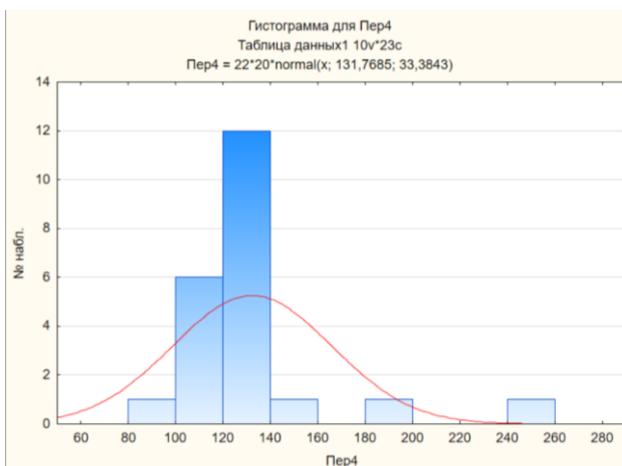
Выбор статистических критериев при изучение зависимостей уровня серого губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} от пола обследуемых обусловливался тем, соответствуют ли распределения частот изучаемых величин нормальному закону или отличаются от него (Рисунок 4.7).



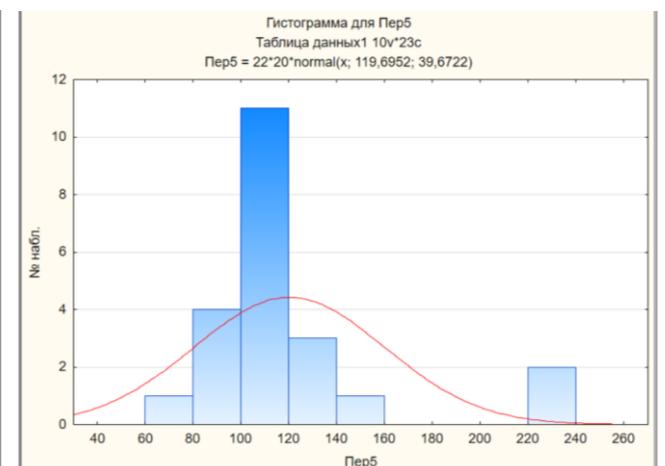
А



Б



В



Г

Рисунок 4.7 - Гистограммы распределений частот уровня серого третьего и четвертого поясничных позвонков у лиц мужского (А,В) и женского пола (Б,Г) по результатам текстурного анализа магнитно-резонансных томограмм

В группе лиц мужского пола медиана показателя уровня серого губчатого вещества тел третьих поясничных позвонков оказалась равна $129,6495 \pm 10,75$, четвертых – $107,694 \pm 10,4$. В группе лиц женского пола средние значения уровня серого L_{III} и L_{IV} составили $114 \pm 5,03$ и $106,9 \pm 5,347$ соответственно (Таблица 4.7).

Таблица 4.7 - Параметры описательной статистики величин уровня серого губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков в зависимости от пола по результатам текстурного анализа (n=89)

Переменная	Мужской пол		Женский пол	
	L_{III}	L_{IV}	L_{III}	L_{IV}
Me	129,6495	107,694	-	-
M	-	-	114	106,9
Ошибка медианы	10,75	10,4	-	-
Ошибка среднего	-	-	5,03	5,347
С.к.о.	-	-	15,09	16,04
I квартиль	119,072	94,755	-	-
III квартиль	137,921	121,404	-	-
min	86,412	73,145	96,25	90,426
max	257,187	233,537	143,932	132,093
Левый ДИ (95%)	119,072	94,755	102,4	94,58
Правый ДИ (95%)	137,921	121,404	125,6	119,2

Примечание: Me – медиана, M – среднее, m – ошибка среднего, m* – ошибка медианы, С.к.о. – среднее квадратичное отклонение, min – минимальное значение, max – максимальное значение, ДИ – доверительный интервал, n – количество проанализированных магнитно-резонансных томограмм

Наименьшее минимальное значение уровня серого зафиксировано при анализе изображений четвертого поясничного позвонка среди лиц мужского пола и составило 73,145, наибольшее максимальное значение – при анализе изображений третьего поясничного позвонка лиц мужского пола и составило 257,187. Размах величин изучаемого показателя у мужчин составил 170,775 (131,7% медианы) и 160,392 (145,9% медианы) в губчатом веществе тел L_{III} и L_{IV} соответственно, в группе лиц женского пола – 47,682 (41,8% среднего значения) для L_{III} 41,667 (39,0% среднего значения) для L_{IV} .

В результате проведения парных статистических сравнений величин уровня серого тел L_{III} и L_{IV} в пределах одной половой группы статистически значимые отличия были выявлены в группе лиц мужского пола на уровне значимости $p^*=0,008$, при этом величины изучаемой переменной оказались выше в теле L_{III} , чем L_{IV} . В группе лиц женского пола значения изучаемого показателя статистически значимо не отличались ($p>0,05$). Сравнение величин уровня серого тел L_{III} позволило выявить статистически значимо более высокие значения среди мужчин по сравнению с женщинами ($p^*=0,04$), величины уровня серого тел L_{IV} достоверно не отличались в разных половых группах ($p^*>0,05$).

Полученные данные подтверждают необходимость использования разных эталонных значений уровня серого отдельно у мужчин и женщин, принадлежащих к разным возрастным группам, поскольку изучаемый показатель при развитии одной и той же патологии у мужчин и женщин может принимать неодинаковые значения в связи с индивидуальными и половыми морфофункциональными особенностями осевого скелета.

Корреляционный анализ изучаемых показателей в связи с возрастом обследуемых показал отсутствие статистически значимых связей для L_{III} и L_{IV} как в группе лиц мужского пола, так и в группе лиц женского пола ($r=0$ и $r^*=0$ на уровне значимости $p>0,05$).

Левонаправленную асимметрию в области интереса L_{III} имели 41,3%, в L_{IV} – 42,7% изученных магнитно-резонансных томограмм обследуемых мужского пола, правонаправленную асимметрию – 58,7% изученных медицинских

изображений при сегментации губчатого вещества тела третьего поясничного позвонка, 57,3% – при сегментации губчатого вещества тела четвертого поясничного позвонка. В группе обследуемых женского пола левонаправленную асимметрию имели 38,4% (40,3%) изученных изображений, правонаправленную асимметрию – 61,6% (59,7%) изображений при сегментации губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} соответственно. Острове́ршинное распределение было характерно для 67,6% МРТ обследуемых I периода зрелого возраста при сегментации губчатого вещества тел L_{III} и для 69,2% – при изучении губчатого вещества тел L_{IV}. Плоско́вершинное распределение оказалось присуще 32,4% изученных медицинских изображений при анализе зоны интереса в теле третьего поясничного позвонка, 30,8% – при сегментации губчатого вещества тела четвертого поясничного позвонка. Во II периоде зрелого возраста острове́ршинное распределение оказалось у 70,4% (68,3%) изученных МРТ при выборе области интереса в губчатом веществе тел L_{III} и L_{IV} соответственно, плоско́вершинное распределение – у 29,6% (31,7%) изученных объектов соответственно.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ТЕКСТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ТЕЛ ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ ПРИ ВЫБОРЕ ОБЛАСТИ ИНТЕРЕСА ДВУМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ СПЕЦИАЛИСТАМИ

Широкое применение текстурного анализа медицинских изображений в клинической практике, в том числе для оценки структуры костной ткани в норме и при ее патологии, сдерживается рядом факторов, одним из которых является субъективный выбор области интереса при оценке изображения. В таком случае численные значения текстурных характеристик могут колебаться, а значит точная оценка структуры ткани крайне затруднена. Поиск воспроизводимых текстурных признаков изображения, которые в наименьшей степени зависят от выбора области интереса, в значительной степени облегчит диагностику патологии костной ткани и позволит внедрить метод текстурного анализа в практическую медицину (Рисунок 5.1).

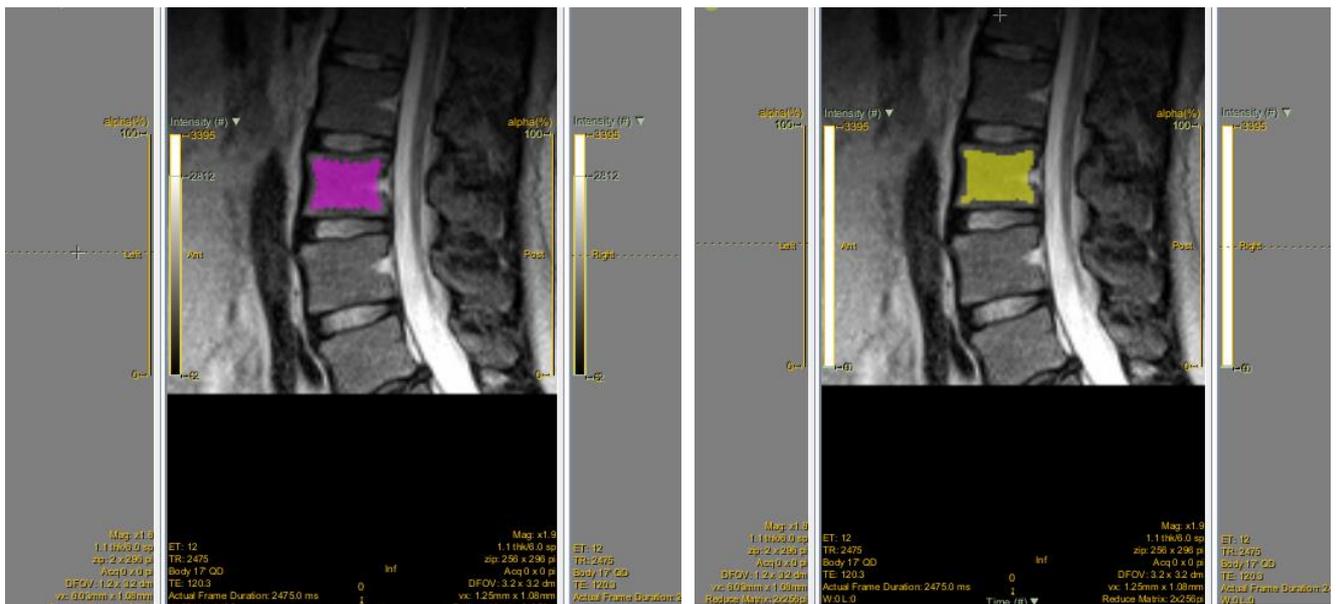


Рисунок 5.1 – выделение зоны интереса двумя независимыми специалистами в интерактивной среде программы theLife X 5.0 на магнитно-резонансной томограмме пациентки М, 29 лет

Для оценки воспроизводимости того или иного текстурного признака, характеризующего структуру губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} , использовался коэффициент конкордации Кендалла (коэффициент множественной ранговой

корреляции, коэффициент согласованности мнений двух экспертов). При этом количественный признак считался воспроизводимым при значении коэффициента конкордации Кендалла более 0,7 (высокая корреляция, высокая воспроизводимость признака), значение же данного коэффициента более 0,9 оценивалось как очень высокая корреляция, а воспроизводимость признака – очень высокая. Значения указанного коэффициента ниже 0,7 оценивались как низкая корреляция (низкая воспроизводимость признака) [39]. Для оценки воспроизводимости того или иного текстурного показателя использовались магнитно-резонансные томограммы, выполненные на одном и том же диагностическом оборудовании, для исключения влияния параметров томографа на полученные изображения [74].

На предыдущих этапах работы было установлено, что статистически значимые отличия между некоторыми изучаемыми величинами, характеризующими изображение губчатого вещества тел поясничных позвонков, существуют в основном в третьем, и четвертом, и пятом поясничных позвонках. На первом этапе оценивалась согласованность площади выбранной зоны интереса в третьем и четвертом поясничных позвонках независимыми диагностами. Среднее значение площади выбранной зоны интереса в третьем поясничном позвонке составило $2,34 \pm 0,54$ см² у первого специалиста, $2,56 \pm 0,36$ у второго специалиста. Среднее значение данного показателя в четвертом поясничном позвонке оказалось равно $3,05 \pm 0,34$ у первого специалиста, $3,078 \pm 0,54$ у второго специалиста. Согласованность выбранной площади оценивается как очень высокая (коэффициент конкордации Кендалла составил в данном случае $W=0,912$). Далее определялись параметры описательной статистики величин текстурного анализа при оценке двумя независимыми экспертами (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Статистические характеристики величин текстурного анализа при выборе области интереса в губчатом веществе тел четвертого поясничного позвонка двумя независимыми диагностами

Текстурный показатель	Среднее (медиана)	Ошибка среднего (ошибка медианы)	Минимум	Максимум
Показатель 1	298*;301,5* 300*;301*	71,08*;39,28* 38,59*;27,27*	154;197 200;173	2662;1241 1520;1130
Показатель 2	14,768*;14,813* 14,772*;14,812*	1,126*;0,805* 0,525*;0,44*	8,527;8,333 9,491;8,665	45,834;35,286 27,941;23,902
Показатель 3	5;248*;5,239* 5,28;5,216*	0,068*;0,061* 0,046;0,049*	4,105;4,308 4,376;4,533	6,106;5,962 5,987;5,946
Показатель 4	19,915*;19,909* 20,08;19,943*	0,354*;0,306* 0,164;0,219*	17,607;16,484 0,024;16,142	27,794;25,591 0,359;22,504
Показатель 5	0,028;0,028 0,028;0,028*	0,0003;0,0003 0,005;0,0004*	0,020;0,022 0,024;0,025	0,032;0,034 0,032;0,0349
Показатель 6	0,28*;0,286 0,281;0,285*	0,008*;0,007 0,005;0,007*	0,146;0,173 0,211;0,223	0,365;0,416 0,359;0,340
Показатель 7	1,528*;0,521 1,524;1,521	0,018*;0,012 0,009;0,009	1,399;1,339 1,407;1,321	1,897;1,796 1,679;1,648
Показатель 8	0,649;0,66* 0,656;0,655*	0,639;0,007* 0,004;0,005*	0,527;0,557 0,596;0,607	0,715;0,747 0,711;0,7571
Показатель 9	1,378;1,322 1,278*;1,301	0,041;0,039 0,049*;0,042	0,923;1,002 0,318;0,289	2,197;2,328 1,750;1,848
Показатель 10	0,528*;0,521 0,524;0,521	0,018*;0,013 0,0009;0,009	0,399;0,339 0,406;0,321	0,897;0,796 0,679;0,648
Показатель 11	11,522*;11,379* 11,17;11,387*	0,606*;0,499* 0,358;0,511*	7,243;7,213 2,693;2,601	22,401;18,832 15,333;18,689
Показатель 12	0,197;0,082* 0,182*;0,074*	0,017;0,011* 0,02236*;0,0102*	0,024;0,014 0,009;0,017	0,398;0,349 0,383;0,281
Показатель 13	0,096;0,048* 0,102*;0,047*	0,007;0,006* 0,010*;0,006*	0,015;0,009 0,005;0,010	0,179;0,211 0,175;0,162
Показатель 14	3,049*;2,971* 3,021*;3,019*	0,029*;0,033* 0,029*;0,0226*	2,723;2,527 2,527;2,906	3,494;3,552 3,43458;3,4942

Показатель 15	0,339*;0,288* 0,333*;0,325*	0,034*;0,026* 0,024*;0,027*	0,220;0,23 0,26;0,263	1,154;0,863 0,792;0,893
Показатель 16	0,192*;0,187* 0,187*;0,198*	0,019*;0,013* 0,013*;0,015*	0,116;0,128 0,142;0,157	0,616;0,457 0,448;0,543
Показатель 17	3,049*;3,033* 3,021*;3,026*	0,117*;0,145* 0,042*;0,031*	2,723;2,527 2,527;2,906	6,009;6,151 3,939;3,691
Показатель 18	0,339*;0,333* 0,335*;0,331*	0,017*;0,019* 0,008*;0,007*	0,220;0,237 0,26;0,263	0,716;0,721 0,437;0,450
Показатель 19	0,193*;0,202* 0,189;0,223	0,009*;0,009* 0,005;0,004	0,116;0,128 0,142;0,157	0,428;0,431 0,262;0,286
Показатель 20	17,853*;17,859* 17,853;17,891*	0,417*;0,333* 0,244;0,213*	14,182;14,369 14,778;14,718	27,879;25,245 23,183;21,818
Показатель 21	23,163*;25,254* 23,259*;24,218*	1,328*;1,023* 1,312*;1,411*	2,879;3,128 3,311;2,644	38,325;36,763 42,009;38,152
Показатель 22	865,4*;796,2* 892,5*;800,7*	48,96*;45,765* 45,51*;64,68*	127,5;126,7 126,5;965,4	1028,9;1276,765 1341,117;1337,94
Показатель 23	0,412*;0,362* 0,311*;0,071*	0,032*;0,052* 0,126*;0,121*	0,287;0,328 0,389;0,303	2,054;2,872 2,150;1,931
Показатель 24	0,192*;0,189* 0,208*;0,142*	0,342*;0,261* 0,406*;0,468*	1,054;1,064 1,026;0,076	11,988;9,732 12,469;13,466
Показатель 25	759,4*;733,1* 812,1*;794,7*	39,83*;37,4* 36,31*;64,95*	132,2;136,2 131,8;175,2	1029,9;1182,5 1328,8;1324,9
Показатель 26	16,84*; 17,345* 17,245*;18,435*	1,235*;0,913* 1,274*;1,192*	12,435;11,265 13,234;12,376	21,322;18,326 19,261;20,281
Показатель 27	254,5;264,5 276,45*;287,4	12,34;21,45 15,23*;12,21	176,3;186,3 183,5;173,5	301,3*312,2 352,3;381,3
Показатель 28	679,34*;762,3* 873,5*;681;2*	9,265*;8,218* 9,316*;8,217*	431,4;317,5 398,4;417,4	1009,4;918,4 1201;1198,3
Показатель 29	1238,7*;1317,6* 1385,6*;1483,6	15,56*;13,56* 15,65*;16,45	569,4;487,6 548,4;487,6	2684,3;2693,5 2543,7;2794,5
Показатель 30	0,145*;0,154* 0,174*;0,173*	0,003*;0,004* 0,003*;0,003*	0,012;0,011 0,012;0,012	0,984;0,892 0,973;0,891
Показатель 31	0,2188*;0,216* 0,218;0,218	0,003*;0,003* 0,007;0,004	0,091;0,083 0,091;0,095	0,983;0,891 0,982;1,002
Показатель 32	546,37*;627,73*	10,85*;11,26*	284,34;294,23	1216,3;1195,5

	692,63*;592,34*	10,72*;9,13*	305,12;289,34	1492,4;1287,5
Показатель 33	487,36*;524,73*	8,263*;7,813*	312,34;314,23	892,34;781,23
	512,64*;527,36*	8,132*;8,173*	325,24;325,16	852,43;861,72
Показатель 34	387,36;369,65	7,473;7,281	85,82;83,76	529,74;602,15
	367,26*;378,32	8,284*;7,174	79,63;81,26	586,47;579,25
Показатель 35	582,34*;592,47*	4,234*;3,871*	174,53;183,25	738,45;729,43
	612,43*;582,34*	4,278*;4,217*	168,32;179,32	789,32;812,43
Показатель 36	285,45*;271,32*	3,254*;3,165*	119,32;132,32	410,25;417,36
	312,43;298,32*	2,674;3,184*	122,43;128,34	481,32;462,43
Показатель 37	647,34*;628,43*	12,154*;11,154*	382,45;298,34	1098,23;986,34
	598,37*;617,43*	12,576*;12,276*	431,45;382,34	982,34;969,43
Показатель 38	119,32*;121,35*	8,314*;8,278*	89,43;87,38	274,54;312,34
	117,32*;119,43	8,178*;7,932	92,12;91,32	356,45;328,43
Показатель 39	68,253*;68,384*	2,342*;2,345*	46,365;47,263	127,345;120,743
	71,352*;69,364*	3,214*;2,345*	51,253;50,263	125,364;125,263
Показатель 40	84,384;84,278*	3,264;3,186*	71,273;69,364	97,374;96,389
	83,274*;83,278*	3,278*;3,278*	70,364;71,385	97,378;98,378
Показатель 41	0,382*;0,380*	0,003*;0,003*	0,101;0,112	0,572;0,583
	0,328*;0,326*	0,002*;0,003*	0,104;0,101	0,582;0,562
Показатель 42	32,387*;31,274*	0,253*;0,278*	19,274;19,278	47,634;49,273
	32,374;32,289	0,268;0,237	19,984;19,289	51,278;49,374
Показатель 43	0,286;0,286*	0,0002*;0,0002*	0,0198;0,0178	0,584;0,584
	0,284*;0,294*	0,0003*;0,0002*	0,0164;0,0176	0,685;0,573
Показатель 44	28;27	0,986;0,893	1,0;1,0	64;64
	28;28	0,945;0,874	1,0;1,0	64;64
Показатель 45	52;52	0,456;0,43	1,0;1,0	64;64
	52;52	0,468;0,467	1,0;1,0	664;64
Показатель 46	0,037*;0,037*	0,002*;0,002*	0,0245;0,0240	0,056;0,0573
	0,036*;0,038*	0,002*;0,003*	0,0236;0,0246	0,053;0,054

Примечание: первое число в паре значений соответствует результатам, полученным I диагностом, второе – полученное II диагностом. Верхняя строчка соответствует результатам для губчатого вещества тела L_{III} , нижняя – результатам для губчатого вещества L_{IV} ;

* - отмечены непараметрические статистические критерии.

На следующем этапе исследования определялся коэффициент согласованности мнений двух независимых экспертов при оценке снимков, не подвергшихся постпроцессорной обработке при помощи фильтров Лапласа-Гаусса. В качестве контрольного показателя был выбран показатель приблизительного объема, значение которого статистически значимо не отличалось при оценке независимыми специалистами как в третьем, так и в четвертом поясничных позвонках ($p=0,056$ и $p=0,362$ соответственно). При оценке согласованности в отношении изучаемых текстурных показателей оказалось, что очень высокий уровень конкордации в третьем поясничном позвонке имеют следующие текстурные характеристики: 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 ($W=0,915$). Высокий уровень согласованности имели следующие текстурные характеристики: площадь поверхности ($W=0,863$), 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 ($W=0,819$). Численные показатели коэффициента согласованности мнений двух независимых экспертов представлены в таблице (Таблица 5.2).

Таблица 5.2 – численные значения коэффициента согласованности мнений двух экспертов (коэффициента конкордации Кендалла) при оценке текстурных признаков губчатого вещества третьего поясничного позвонка двумя независимыми специалистами по данным магнитно-резонансной томографии

Текстуальный показатель	Количественное значение коэффициента	Уровень согласованности
Показатель 1	0,928	очень высокий
Показатель 2	0,673	низкий
Показатель 3	0,863	высокий
Показатель 4	0,862	высокий
Показатель 5	0,826	высокий
Показатель 6	0,593	низкий
Показатель 7	0,528	низкий
Показатель 8	0,761	высокий
Показатель 9	0,432	низкий
Показатель 10	0,536	низкий
Показатель 11	0,924	очень высокий
Показатель 12	0,928	очень высокий
Показатель 13	0,361	низкий
Показатель 14	0,481	низкий
Показатель 15	0,782	высокий
Показатель 16	0,582	низкий
Показатель 17	0,391	низкий
Показатель 18	0,439	низкий
Показатель 19	0,571	низкий
Показатель 20	0,281	низкий
Показатель 21	0,389	низкий
Показатель 22	0,179	низкий
Показатель 23	0,924	очень высокий
Показатель 24	0,629	низкий
Показатель 25	0,425	низкий
Показатель 26	0,736	высокий
Показатель 27	0,973	очень высокий

Показатель 28	0,963	очень высокий
Показатель 29	0,904	очень высокий
Показатель 30	0,489	низкий
Показатель 31	0,872	высокий
Показатель 32	0,915	очень высокий
Показатель 33	0,829	высокий
Показатель 34	0,281	низкий
Показатель 35	0,361	низкий
Показатель 36	0,416	низкий
Показатель 37	0,419	низкий
Показатель 38	0,281	низкий
Показатель 39	0,182	низкий
Показатель 40	0,239	низкий
Показатель 41	0,328	низкий
Показатель 42	0,807	высокий
Показатель 43	0,819	высокий
Показатель 44	0,182	низкий
Показатель 45	0,273	низкий
Показатель 46	0,378	низкий

В четвертом поясничном позвонке очень 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 ($W=0,904$).

Высокий уровень согласованности имели следующие текстурные характеристики структуры и интенсивности: площадь поверхности ($W=0,798$), 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 ($W=0,762$). Численные показатели коэффициента согласованности мнений двух независимых экспертов для четвертого поясничного позвонка представлены в таблице (Таблица 5.3).

Таблица 5.3 – численные значение коэффициента согласованности мнений двух экспертов (коэффициента конкордации Кендалла) при оценке текстурных признаков губчатого вещества третьего поясничного позвонка двумя независимыми специалистами по данным магнитно-резонансной томографии с использованием постпроцессорной обработки при помощи фильтров Лапласа-Гаусса

Текстурный показатель	Тип фильтра			
	reflect	periodic	edge	zero
Показатель 1	0,691; 0,562	0,326; 0,253	0,216; 0,188	0,594; 0,625
Показатель 2	0,482; 0,314	0,281; 0,314	0,102; 0,218	0,364; 0,273
Показатель 3	0,708; 0,772	0,847; 0,827	0,664; 0,592	0,727; 0,927
Показатель 4	0,722; 0,816	0,517; 0,626	0,588; 0,482	0,749; 0,757
Показатель 5	0,281; 0,749	0,419; 0,438	0,198; 0,08	0,818; 0,809
Показатель 6	0,473; 0,412	0,321; 0,312	0,102; 0,212	0,484; 0,486
Показатель 7	0,489; 0,368	0,253; 0,423	0,330; 0,404	0,432; 0,474
Показатель 8	0,352; 0,715	0,241; 0,152	0,198; 0,200	0,284; 0,368
Показатель 9	0,402; 0,318	0,394; 0,315	0,202; 0,314	0,392; 0,402
Показатель 10	0,636; 0,684	0,562; 0,596	0,484; 0,372	0,694; 0,485
Показатель 11	0,906; 0,926	0,915; 0,916	0,946; 0,904	0,894; 0,754
Показатель 12	0,718; 0,904	0,726; 0,584	0,816; 0,764	0,806; 0,693
Показатель 13	0,216; 0,216	0,213; 0,218	0,318; 0,281	0,218; 0,312
Показатель 14	0,302; 0,416	0,372; 0,218	0,298; 0,276	0,248; 0,188
Показатель 15	0,712; 0,692	0,562; 0,481	0,582; 0,492	0,688; 0,578
Показатель 16	0,618; 0,564	0,492; 0,393	0,383; 0,318	0,478; 0,480

Показатель 17	0,282; 0,312	0,088;0,122	0,463;0,402	0,188;0,206
Показатель 18	0,468; 0,366	0,188;0,112	0,098;0,102	0,278;0,166
Показатель 19	0,618; 0,264	0,418; 0,392	0,218;0,202	0,389;0,256
Показатель 20	0,302; 0,298	0,082; 0,120	0,080;0,102	0,180;0,212
Показатель 21	0,418; 0,515	0,316; 0,318	0,218;0,228	0,218;0,334
Показатель 22	0,204; 0,188	0,118; 0,082	0,188;0,106	0,136;0,189
Показатель 23	0,918; 0,718	0,616; 0,582	0,614;0,598	0,618;0,598
Показатель 24	0,627; 0,515	0,442; 0,282	0,329;0,288	0,432;0,468
Показатель 25	0,388; 0,297	0,188; 0,126	0,218;0,112	0,286;0,202
Показатель 26	0,808; 0,794	0,542;0,432	0,424;0,448	0,792;0,865
Показатель 27	0,729; 0,917	0,902; 0,904	0,928; 0,934	0,587;0,482
Показатель 28	0,912; 0,724	0,702; 0,745	0,546; 0,706	0,936;0,909
Показатель 29	0,793; 0,806	0,474; 0,382	0,668;0,848	0,705;0,583
Показатель 30	0,442; 0,444	0,282;0,212	0,212; 0,391	0,382;0,256
Показатель 31	0,704; 0,684	0,582; 0,592	0,281; 0,312	0,465;0,468
Показатель 32	0,902; 0,918	0,911; 0,900	0,906; 0,912	0,918;0,914
Показатель 33	0,428; 0,912	0,682; 0,711	0,518; 0,712	0,473;0,389
Показатель 34	0,312;0,449	0,418;0,388	0,618; 0,514	0,900;0,586
Показатель 35	0,118;0,120	0,282;0,188	0,282;0,312	0,484;0,372
Показатель 36	0,512;0,482	0,382;0,219	0,218;0,1140,44	0,473;0,372
Показатель 37	0,212;0,218	0,018;0,001	0,009;0,012	0,012;0,019
Показатель 38	0,118;0,116	0,117;0,101	0,228;0,211	0,281;0,183
Показатель 39	0,181;0,116	0,101;0,112	0,108;0,098	0,182;0,184
Показатель 40	0,218;0,118	0,082;0,088	0,015; 0,052	0,017;0,172
Показатель 41	0,101;0,113	0,088;0,104	0,099;0,111	0,183;0,186
Показатель 42	0,218;0,222	0,114;0,116	0,112;0,118	0,281;0,189
Показатель 43	0,212;0,187	0,211; 0,114	0,225;0,118	0,293;0,382
Показатель 44	0,282;0,312	0,188;0,114	0,110;0,086	0,183;0,382
Показатель 45	0,212;0,217	0,075;0,077	0,077;0,117	0,187;0,278
Показатель 46	0,441;0,316	0,218;0,110	0,318;0,318	0,372;0,326

Примечание – первое число в паре значений соответствует L_{III} , второе – L_{IV}

На следующем этапе работы определялся коэффициент конкордации Кендалла текстурных характеристик губчатого вещества третьего и четвертого поясничных позвонков двумя независимыми специалистами при наложении на магнитно-резонансную томограмму изучаемой области фильтров Лапласа-Гаусса. Считается, что использование фильтров Лапласа-Гаусса позволяет сгладить шум на изображениях и усиливает любые резкие изменения интенсивности, подчеркивая контуры и колебания текстуры, а значит – позволяют точнее оценить пространственные закономерности структурной организации губчатого вещества тел позвонков. Вейвлет-фильтрация преобразовывает изображения при помощи матрицы сложных линейных или радиарных волн, что позволяет разделить высоко- и низкочастотные компоненты изображения. В случае исследования рентгеновских томограмм можно применять ограничение по плотности или ограничение уровней серого, что позволяет исключить влияние на текстуру изображения таких компонентов, как жировая ткань, костный мозг и т.д. В случае магнитно-резонансной томографии ограничение по количеству единиц Хаунсфилда на изображении не дает никакого эффекта, поэтому в данной работе подобная постпроцессорная обработка изображений не применялась.

Кроме этого, до настоящего времени не установлено, что является более предпочтительным: 2D- или 3D-сегментация. В случае объемных образований и их дифференцировки предпочтительным является полное включение объемной структуры в зону интереса, однако в случае нормы такое правило не является аксиомой. Поэтому на данном этапе изучения структуры губчатого вещества тел поясничных позвонков производилась 2D-сегментация.

Так, при наложении фильтра reflect (наиболее «мягкий» вариант фильтра Лапласа-Гаусса) на магнитно-резонансную томограмму третьего поясничного позвонка оказалось, что очень высокий уровень согласованности имеют следующие показатели текстурного анализа: асферичность ($W=0,906$), наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра сагиттального среза, заданными в координатах

интенсивности ($W=0,918$), средняя интенсивность ($W=0,912$), медиана интенсивности ($W=0,902$).

Высокий уровень согласованности количественных показателей текстурного анализа оказался у следующих характеристик: расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,718$), интегрированная интенсивность ($W=0,729$), соотношение поверхности и объема ($W=0,722$), компактность ($W=0,782$), смещение центра масс ($W=0,712$), сферический диаметр ($W=0,808$), дисперсия интенсивности ($W=0,793$), эксцесс интенсивности ($W=0,704$). Численные значения остальных величин коэффициента конкордации Кендалла представлены в таблице (Таблица 5.3).

В теле четвертого поясничного позвонка очень высокий уровень согласованности при оценке двумя независимыми специалистами имели следующие показатели текстурного анализа: асферичность ($W=0,926$), расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,904$), интегрированная интенсивность ($W=0,917$), медиана интенсивности ($W=0,918$), а также показатель минимума интенсивности ($W=0,912$). Высокий уровень согласованности имели следующие текстурные характеристики: соотношение поверхности и объема ($W=0,816$), компактность ($W=0,749$), сферическая диспропорция ($W=0,715$), сферический диаметр ($W=0,794$), наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра сагиттального среза, заданными в координатах интенсивности ($W=0,718$), средняя интенсивность ($W=0,724$), дисперсия интенсивности ($W=0,806$). Численные показатели коэффициента согласованности мнений двух экспертов для четвертого поясничного позвонка представлены в таблице (Таблица 5.4).

При наложении фильтра *periodic* очень высокий показатель конкордантности имели следующие характеристики текстуры губчатого вещества тела третьего поясничного позвонка: асферичность ($W=0,915$), интегрированная интенсивность ($W=0,902$), медиана интенсивности ($W=0,911$); высокий уровень согласованности – расстояние между максимальной

интенсивностью и центроидом ($W=0,726$) и средняя интенсивность ($W=0,702$). Воспроизводимость других показателей текстуры тел третьих поясничных позвонков оценивалась как низкая.

Таблица 5.4 – численные значения коэффициента согласованности мнений двух независимых экспертов (коэффициента конкордации Кендалла) при оценке текстурных признаков губчатого вещества четвертого поясничного позвонка двумя специалистами по данным магнитно-резонансной томографии

Текстурный показатель	Количественное значение коэффициента	Уровень согласованности
Показатель 1	0,902	очень высокий
Показатель 2	0,418	низкий
Показатель 3	0,798	высокий
Показатель 4	0,706	высокий
Показатель 5	0,828	высокий
Показатель 6	0,402	низкий
Показатель 7	0,472	низкий
Показатель 8	0,812	высокий
Показатель 9	0,496	низкий
Показатель 10	0,409	низкий
Показатель 11	0,918	очень высокий
Показатель 12	0,912	очень высокий
Показатель 13	0,281	низкий
Показатель 14	0,382	низкий
Показатель 15	0,708	высокий
Показатель 16	0,627	низкий
Показатель 17	0,188	низкий
Показатель 18	0,384	низкий
Показатель 19	0,618	низкий
Показатель 20	0,327	низкий
Показатель 21	0,452	низкий
Показатель 22	0,108	низкий

Показатель 23	0,952	очень высокий
Показатель 24	0,518	низкий
Показатель 25	0,325	низкий
Показатель 26	0,828	высокий
Показатель 27	0,985	очень высокий
Показатель 28	0,919	очень высокий
Показатель 29	0,862	высокий
Показатель 30	0,112	низкий
Показатель 31	0,706	высокий
Показатель 32	0,924	очень высокий
Показатель 33	0,904	очень высокий
Показатель 34	0,514	низкий
Показатель 35	0,831	высокий
Показатель 36	0,281	низкий
Показатель 37	0,385	низкий
Показатель 38	0,219	низкий
Показатель 39	0,373	низкий
Показатель 40	0,491	низкий
Показатель 41	0,371	низкий
Показатель 42	0,904	очень высокий
Показатель 43	0,762	высокий
Показатель 44	0,328	низкий
Показатель 45	0,183	низкий
Показатель 46	0,271	низкий

В четвертом поясничном позвонке следующие характеристики текстуры его губчатого вещества имели очень высокую воспроизводимость: асферичность ($W=0,915$), интегрированная интенсивность ($W=0,904$), медиана интенсивности ($W=0,900$), дисперсия интенсивности ($W=0,921$); высокий уровень согласованности – следующие показатели: средняя интенсивность ($W=0,745$), минимум интенсивности ($W=0,711$).

При наложении фильтра edge в теле третьего поясничного позвонка наблюдались такие же закономерности, как и в предыдущем случае (величины

коэффициента конкордации Кендалла представлены в таблице (Таблица 5.4). Исключение составила такая характеристика текстуры губчатого вещества тел поясничных позвонков, как средняя интенсивность: при постпроцессорной обработке фильтром edge данная текстурная характеристика имеет низкую воспроизводимость ($W=0,546$).

В теле четвертого поясничного позвонка очень высокий уровень воспроизводимости имели асферичность ($W=0,916$), медиана интенсивности ($W=0,912$); высокий уровень согласованности – средняя интенсивность ($W=0,706$), минимум интенсивности ($W=0,712$), дисперсия интенсивности ($W=0,848$)

При наложении фильтра Лапласа-Гаусса zero (самый «грубый» вариант фильтра Лапласа-Гаусса) очень высокий уровень воспроизводимости имели следующие величины текстурного анализа, характеризующие губчатое вещество тела третьего поясничного позвонка: средняя интенсивность ($W=0,936$), медиана интенсивности ($W=0,918$), стандартное отклонение интенсивности ($W=0,900$).

Высокий уровень согласованности количественных показателей текстурного анализа оказался у следующих параметров: асферичность ($W=0,894$), расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,806$), площадь поверхности ($W=0,727$), соотношение поверхности и объема ($W=0,749$), компактность ($W=0,818$), сферический диаметр ($W=0,792$), дисперсия интенсивности ($W=0,705$).

В теле L_{IV} очень высокий уровень согласованности при оценке двумя независимыми специалистами имели следующие показатели текстурного анализа: площадь поверхности ($W=0,927$), средняя интенсивность ($W=0,909$), медиана интенсивности ($W=0,914$).

Высокий уровень согласованности количественных показателей текстурного анализа оказался у следующих показателей: асферичность ($W=0,754$), площадь поверхности ($W=0,890$), соотношение поверхности и объема ($W=0,757$), компактность ($W=0,809$), сферический диаметр ($W=0,865$).

Наложение фильтра reflect привело к уменьшению количества конкордантных показателей текстуры губчатого вещества тел изучаемых позвонков. В L_{III} очень высокий уровень согласованности после наложения фильтра имели 4 показателя, при этом без фильтрации их количество составляло 7, высокий уровень согласованности до наложения фильтра имели 10 показателей текстурного анализа, после фильтрации – всего 7. В L_{IV} до наложения фильтра reflect очень высокий уровень согласованности имели 8 показателей текстурного анализа, после фильтрации – 5, высокий уровень согласованности до наложения фильтра имели 10 показателей, после фильтрации – всего 6.

Подобная ситуация наблюдалась и при наложении фильтров edge и periodic: в L_{III} количество конкордантных текстурных признаков уменьшилось до 5, а в L_{IV} – до 6. При наложении фильтра Лапласа-Гаусса zero количество конкордантных признаков в третьем и четвертом поясничных позвонках составило 10 и 8 соответственно.

Количество признаков, имеющих очень высокий и высокий уровень воспроизводимости при наложении фильтров Лапласа-Гаусса и без фильтрации, представлены в таблице (Таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Воспроизводимость текстурных показателей. Количество показателей, у которых коэффициент конкордации Кендалла превысил установленный порог (без учета величины площади поверхности)

Используемый фильтр	Порог	Поясничный позвонок	
		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

Таким образом, 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.

Наиболее высокое значение коэффициента конкордации отмечается у показателей интегрированной интенсивности ($W=0,973$) и средней интенсивности ($W=0,963$) в губчатом веществе тела L_{III} без применения фильтров Лапласа-Гаусса.

Все сказанное позволяет утверждать, что в качестве предикторов рарефикации губчатого костного вещества при оценке двумя независимыми специалистами в L_{III} и L_{IV} целесообразно использовать следующие текстурные характеристики (без учета характеристик площади поверхности), численные значения которых установлены без применения фильтров Лапласа-Гаусса при выделении двумерной зоны интереса: компактность, сферическая диспропорция, асферичность, расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом, смещение центра масс, наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра сагиттального среза, заданными в координатах максимальной интенсивности, сферический диаметр, интегрированную интенсивность, среднюю интенсивность, дисперсию интенсивности, эксцесс интенсивности, медиану интенсивности, минимум интенсивности, среднее значение гистограммы интенсивности, асимметрию гистограммы интенсивности. Конкордантность данных показателей текстуры губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков имеет очень высокие и высокие значения в обоих позвонках. При наложении фильтров на изображения губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков для оценки структуры обоих позвонков одновременно может быть использован показатель асферичности и показатель медианы интенсивности, которые при наложении всех использованных фильтров имели очень высокий и высокий показатель согласованности.

ГЛАВА 6. ОЦЕНКА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ТЕКСТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ТЕЛ ПОЯСНИЧНЫХ ПОЗВОНКОВ ПРИ ВЫБОРЕ ОБЛАСТИ ИНТЕРЕСА НА МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫХ ТОМОГРАММАХ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ДИАГНОСТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ РАЗНОГО КЛАССА

Внедрение метода текстурного анализа для оценки структуры губчатого вещества поясничных позвонков сдерживается и тем, что разное диагностическое оборудование, применяемое для получения медицинских изображений, может обуславливать различные численные характеристики текстуры. Таким образом, поиск воспроизводимых текстурных признаков изображений тел поясничных позвонков, выполненных на диагностических аппаратах разного класса, является актуальной задачей, решение которой нивелирует влияние технических характеристик диагностического аппарата и позволит унифицировать и объективизировать оценку структуры изучаемого объекта. Для оценки воспроизводимости текстурных признаков и поиска характеристик, обладающих наибольшей воспроизводимостью, использовались изображения губчатого вещества тел поясничных позвонков, выполненные на диагностическом оборудовании разного класса, но сегментированные одним диагностом (Рисунок 6.1).

Для оценки воспроизводимости того или иного текстурного признака, характеризующего структуру губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков, использовался коэффициент конкордации Кендалла. В качестве «контрольного» показателя использовалась площадь выделенной зоны интереса двух баз данных магнитно-резонансных томограмм. Среднее значение площади выбранной зоны интереса в третьем поясничном позвонке составило $2,36 \pm 0,52 \text{ см}^2$ в первом наборе магнитно-резонансных томограмм, $2,57 \pm 0,38$ – во втором наборе магнитно-резонансных томограмм.

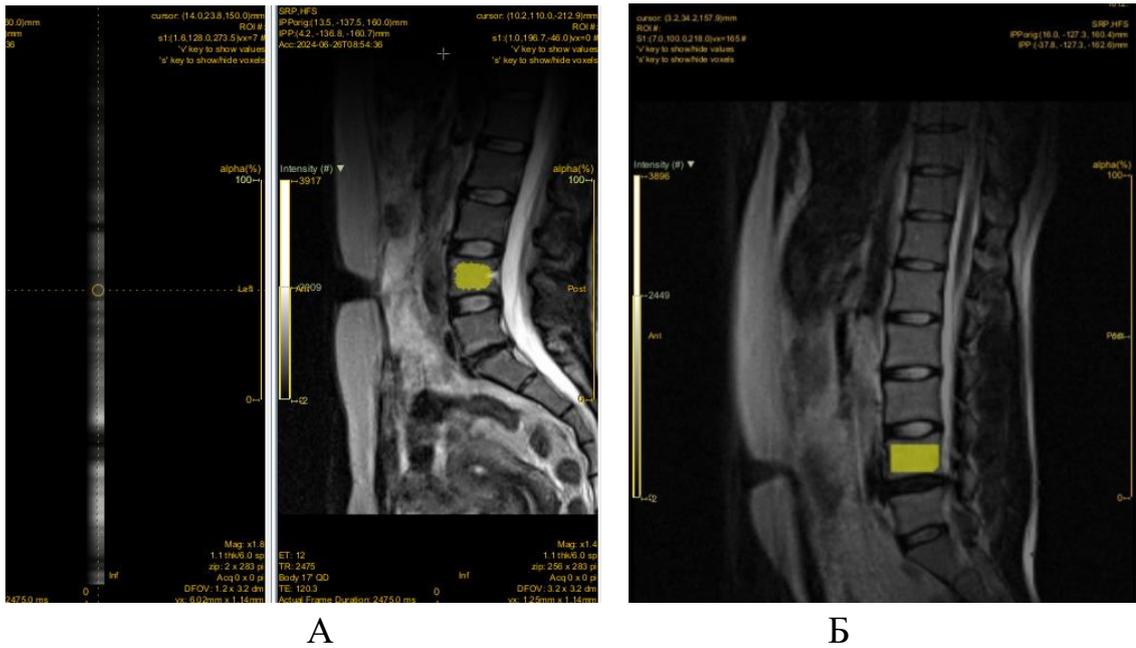


Рисунок 6.1 – Выделение зоны интереса на магнитно-резонансных томограммах пациентки 51 года (А) и пациента 34 лет (Б), выполненных на диагностическом оборудовании разного класса, в интерактивной среде программы LIFEx

Среднее значение данного показателя в четвертом поясничном позвонке оказалось равно $3,08 \pm 0,31$ в наборе изображений, выполненных на аппарате 1; $3,094 \pm 0,48$ – в наборе изображений, выполненных на аппарате 2. Согласованность выбранной площади в теле третьего поясничного позвонка оценивается как высокая ($W=0,802$).

Для оценки согласованности величин текстурного анализа губчатого вещества тел поясничных позвонков использовался выбранный нами ранее набор текстурных признаков. Статистические характеристики указанных переменных представлены в таблице (Таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Статистические характеристики величин текстурного анализа при оценке магнитно-резонансных томограмм, выполненных на диагностическом оборудовании разного класса

Текстурный показатель	Среднее (медиана)	Ошибка среднего (ошибка медианы)	Минимум	Максимум
Показатель 1	297*; 301*	59,13*; 41,64*	156;194	2621;1263
	301,5*; 300*	36,74*; 29,22*	196;177	1536;1121
Показатель 2	14,773*;14,808*	1,116*; 0,812*	8,516;8,328	45,806;35,269
	14,767*;14,816*	0,534*; 0,435*	9,482;8,657	27,726;23,684
Показатель 3	5;236*;5,228*	0,056*;0,067*	4,119;4,284	6,116;5,952
	5,26;5,209*	0,042;0,053*	4,393;4,527	5,973;5,924
Показатель 4	19,927*;19,916*	0,342*; 0,296*	17,626;16,468	28,136;25,652
	20,11;19,931*	0,159; 0,204*	16,018;16,134	27,395;23,096
Показатель 5	0,026;0,026	0,0004;0,0004	0,021;0,020	0,031; 0,032
	0,027;0,027*	0,0003;0,0005*	0,022;0,023	0,033; 0,031
Показатель 6	0,282*; 0,284	0,007*; 0,006	0,142;0,168	0,372;0,407
	0,283; 0,286*	0,006; 0,005*	0,216;0,219	0,368;0,334
Показатель 7	1,525*; 1,522	0,016*; 0,011	1,385; 1,331	1,902; 1,782
	1,522;1,523	0,012; 0,013	1,413; 1,317	1,673; 1,638
Показатель 8	0,653; 0,65*	0,008; 0,009*	0,521; 0,549	0,722; 0,743
	0,656; 0,66*	0,005; 0,011*	0,588; 0,593	0,723; 0,764
Показатель 9	1,372;1,326	0,044;0,036	0,926;1,012	2,216;2,319
	1,271*;1,307	0,042*;0,039	0,311;0,294	1,863;1,821
Показатель 10	0,519*;0,516	0,014*; 0,015	0,382; 0,329	0,891; 0,809
	0,522;0,517	0,008;0,011	0,416; 0,317	0,692; 0,656
Показатель 11	11,546*;11,391*	0,582*;0,531*	7,232;7,201	22,462;18,812
	11,163;11,398*	0,375;0,528*	2,713;2,652	15,293;18,735
Показатель 12	0,195;0,084*	0,019;0,008*	0,022;0,016	0,391;0,353
	0,186*;0,067*	0,026*; 0,013*	0,014;0,013	0,385;0,274
Показатель 13	0,092;0,054*	0,006;0,008*	0,012;0,011	0,174;0,216
	0,096*;0,052*	0,009*;0,008*	0,006;0,012	0,172;0,166
Показатель 14	3,053*;2,982*	0,022*;0,029*	2,719;2,534	3,507; 3,543

	3,018*;3,012*	0,032*;0,028*	2,515;2,914	3,442; 3,513
Показатель 15	0,343*;0,282* 0,328;0,321	0,029*;0,021* 0,027;0,025	0,213;0,224 0,253;0,27	1,146;0,856 0,781;0,903
Показатель 16	0,189*;0,184* 0,191*;0,195*	0,023*;0,014* 0,017*;0,016*	0,118;0,132 0,145;0,151	0,608;0,467 0,462;0,552
Показатель 17	3,044*;3,037* 3,017*;3,022*	0,112*;0,149* 0,039*;0,037*	2,719;2,524 2,521;2,889	6,014;6,158 3,943;3,682
Показатель 18	0,334*;0,338* 0,331*;0,335*	0,019*;0,021* 0,004*;0,007*	0,216;0,242 0,253;0,268	0,724;0,726 0,441;0,442
Показатель 19	0,198*; 0,201* 0,194; 0,22	0,007*;0,007* 0,006;0,005	0,112;0,124 0,139;0,162	0,436;0,434 0,269;0,279
Показатель 20	17,85*; 17,863* 17,859; 17,89*	0,412*;0,365* 0,242;0,263*	14,173;14,353 14,757;14,693	26,192;25,382 24,725;22,915
Показатель 21	23,144*;25,244* 23,244*;24,228*	1,321*;1,019* 1,306*;1,418*	2,862; 3,116 3,318; 2,682	37,292;38,912 41,462;40,612
Показатель 22	862,403*; 791,21* 896,49*; 802,69*	48,86*;45,772* 46,42*;61,93*	124,4; 127,6 125,5; 924,6	1163,9;1242,239 1319,11;1342,76
Показатель 23	0,412*; 0,359* 0,307*; 0,075*	0,031*;0,053* 0,124*;0,128*	0,267;0,332 0,391;0,307	2,062;2,795 2,162;1,921
Показатель 24	7,192*; 7,19* 7,209*; 7,142*	0,337*;0,253* 0,416*;0,452*	1,061;1,058 1,021;0,067	10,235; 10,619 11,518; 12,269
Показатель 25	764,402*; 738,09* 808,106*; 799,69*	40,92;38,64 37,62;61,28	131,2; 135,4 132,6; 174,4	1016,4; 1129,6 1281,8; 1293,4
Показатель 26	16,847*; 17,334* 17,273*; 18,435*	1,226;0,929 0,262; 1,181	12,416;11,259 13,218;12,383	21,291;19,821 19,462; 20,623
Показатель 27	264,499; 258,503 266,45*; 277,398	11,97; 22,12 16,46*; 12,46	171,3; 182,5 184,4; 171,3	316,2; 304,3 343,3;391,2
Показатель 28	681,341*;72,299* 863,5*; 681,2*	9,396;8,204 9,309;8,226	424,3; 336,4 385,4; 413,4	976,4; 942,4 1192,5; 1179,3
Показатель 29	1248,69*;1327,59* 1375,58*;1473,597	14,29*; 14,17* 14,55*;15,73	576,4; 481,6 553,4; 484,6	2594,7; 2597,3 2519,4; 2671,8
Показатель 30	0,146*; 0,151* 0,178*; 0,173*	0,004*; 0,004* 0,004*; 0,003*	0,011;0,012 0,011;0,012	0,991; 0,883 0,969; 0,882
Показатель 31	0,224*; 0,22*	0,004*;0,003*	0,092;0,084	0,989; 0,894

	0,218; 0,222	0,006;0,008	0,094;0,093	0,996; 1,016
Показатель 32	547,367*; 621,724* 699,63*; 597,339*	10,81*;11,14* 10,63*;9,14*	287,72;289,63 299,43;296,92	1243,3; 1236,5 1506,4; 1317,7
Показатель 33	493,362*; 531,73* 515,644*; 527,362*	8,279*;7,794* 8,126*;8,108*	302,63;319,29 316,92;321,14	883,23; 806,34 862,23; 846,79
Показатель 34	391,366; 373,649 372,255*; 378,32*	7,529;7,381 8,361*;7,291*	84,79;82,26 81,49;79,61	548,91; 597,21 669,41; 588,25
Показатель 35	579,335*; 586,472* 609,43*; 587,34*	4,396*;3,917* 4,338*;4,251*	167,29;176,36 162,61;175,37	731,43;739,46 758,32;801,43
Показатель 36	281,455*; 275,324* 315,43; 294,321*	3,336*;3,182* 2,692;3,264*	114,26;129,82 126,79;122,16	414,38;421,36 473,29;483,41
Показатель 37	646,342; 622,433 597,365; 613,435	12,208;11,136 12,624;12,319	376,34;309,45 424,12;389,23	1062,34;973,34 992,43; 976,23
Показатель 38	112,319*; 126,353* 114,316*; 115,432*	8,206*; 8,319* 8,239*; 7,825*	91,43;88,31 91,26;89,94	286,54; 321,34 349,47; 327,42
Показатель 39	68,252*; 68,383* 71,352*; 69,361*	2,329*; 2,291* 3, 196*; 2,234*	41,36;44,263 49,23;47,26	125,345;122,693 127,364;120,126
Показатель 40	84,387; 84,28* 83,268*; 83,281*	3,252; 3,171* 3,331*; 3,305*	67,192;68,384 68,712;69,992	96,269;97,475 98,742;99,378
Показатель 41	0,387*; 0,38* 0,322*; 0,326*	0,002*;0,002* 0,002*;0,002*	0,102;0,113 0,106;0,102	0,567;0,579 0,574;0,566
Показатель 42	32,391*; 31,268* 32,371; 32,292	0,249*; 0,264* 0,273; 0,246	19,291;19,237 19,961;19,261	48,354;48,651 49,159;47,743
Показатель 43	0,286*; 0,28* 0,286*; 0,296*	0,0002*;0,0003* 0,0002*;0,0002*	0,0129;0,0138 0,0151;0,0169	0,581;0,581 0,682;0,577
Показатель 44	27; 28 27; 27	0,934; 0,876 0,919; 0,862	1,0;1,0 1,0;1,0	64;64 64;64
Показатель 45	51; 51 51; 51	0,461; 0,429 0,429;0,457	1,0;1,0 1,0;1,0	64;64 64;64
Показатель 46	0,038*; 0,043* 0,035*; 0,035*	0,003*; 0,002* 0,003*; 0,002*	0,0243;0,0241 0,0238;0,0242	0,054;0,058 0,055;0,056

Примечание: первое число в паре значений соответствует результатам, полученным на аппарате 1, второе – полученным на аппарате 2. Верхняя строчка

соответствует результатам для губчатого вещества тела L_{III} , нижняя – результатам для губчатого вещества тела L_{IV} .

* - непараметрические статистические критерии.

На следующем этапе исследования определялся коэффициент согласованности мнений двух независимых экспертов при оценке снимков, выполненных на диагностическом оборудовании разного класса, но не подвергшихся постпроцессорной обработке при помощи фильтров Лапласа-Гаусса. Так, в губчатом веществе тела третьего поясничного позвонка очень высокий уровень согласованности имели 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 ($W=0,936$). Высокий уровень согласованности имели следующие текстурные характеристики: 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 ($W=0,724$), (Таблица 6.2).

Таблица 6.2 – численные значение коэффициента согласованности мнений двух независимых экспертов (коэффициента конкордации Кендалла) при оценке текстурных признаков губчатого вещества третьего поясничного позвонка по результатам исследования магнитно-резонансных томограмм, выполненных на диагностическом оборудовании разного класса

Текстурный показатель	Количественное значение коэффициента	Уровень согласованности
Показатель 1	0,802	высокий
Показатель 2	0,412	низкий

Показатель 3	0,863	высокий
Показатель 4	0,712	высокий
Показатель 5	0,714	высокий
Показатель 6	0,218	низкий
Показатель 7	0,483	низкий
Показатель 8	0,918	высокий
Показатель 9	0,182	низкий
Показатель 10	0,536	низкий
Показатель 11	0,902	очень высокий
Показатель 12	0,904	очень высокий
Показатель 13	0,469	низкий
Показатель 14	0,112	низкий
Показатель 15	0,706	высокий
Показатель 16	0,243	низкий
Показатель 17	0,216	низкий
Показатель 18	0,291	низкий
Показатель 19	0,382	низкий
Показатель 20	0,281	низкий
Показатель 21	0,016	низкий
Показатель 22	0,171	низкий
Показатель 23	0,116	низкий
Показатель 24	0,448	низкий
Показатель 25	0,225	низкий
Показатель 26	0,882	высокий
Показатель 27	0,018	низкий
Показатель 28	0,912	очень высокий
Показатель 29	0,746	высокий
Показатель 30	0,338	низкий
Показатель 31	0,775	высокий
Показатель 32	0,922	очень высокий
Показатель 33	0,291	низкий
Показатель 34	0,411	низкий
Показатель 35	0,218	низкий

Показатель 36	0,936	очень высокий
Показатель 37	0,738	высокий
Показатель 38	0,119	низкий
Показатель 39	0,091	низкий
Показатель 40	0,110	низкий
Показатель 41	0,291	низкий
Показатель 42	0,724	высокий
Показатель 43	0,412	низкий
Показатель 44	0,202	низкий
Показатель 45	0,318	низкий
Показатель 46	0,218	низкий

В L_{IV} очень высокий уровень согласованности имели такие текстурные характеристики, как: 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 ($W=0,904$).

Высокий уровень согласованности имели следующие текстурные характеристики структуры и интенсивности: площадь поверхности ($W=0,798$), 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 ($W=0,762$).

Численные показатели коэффициента согласованности мнений двух независимых экспертов для четвертого поясничного позвонка представлены в Таблице 6.3.

Таблица 6.3 – численные значения коэффициента согласованности мнений двух экспертов (коэффициента конкордации Кендалла) при оценке текстурных признаков губчатого вещества четвертого поясничного позвонка двумя независимыми специалистами по данным магнитно-резонансной томографии

Текстурный показатель	Количественное значение коэффициента	Уровень согласованности
Показатель 1	0,902	очень высокий
Показатель 2	0,418	низкий
Показатель 3	0,798	высокий
Показатель 4	0,706	высокий
Показатель 5	0,828	высокий
Показатель 6	0,402	низкий
Показатель 7	0,472	низкий
Показатель 8	0,812	высокий
Показатель 9	0,496	низкий
Показатель 10	0,409	низкий
Показатель 11	0,918	очень высокий
Показатель 12	0,912	очень высокий
Показатель 13	0,281	низкий
Показатель 14	0,382	низкий
Показатель 15	0,708	высокий
Показатель 16	0,627	низкий
Показатель 17	0,188	низкий
Показатель 18	0,384	низкий
Показатель 19	0,618	низкий
Показатель 20	0,327	низкий
Показатель 21	0,452	низкий
Показатель 22	0,108	низкий
Показатель 23	0,952	очень высокий
Показатель 24	0,518	низкий
Показатель 25	0,325	низкий
Показатель 26	0,828	высокий
Показатель 27	0,985	очень высокий

Показатель 28	0,919	очень высокий
Показатель 29	0,862	высокий
Показатель 30	0,112	низкий
Показатель 31	0,706	высокий
Показатель 32	0,924	очень высокий
Показатель 33	0,904	очень высокий
Показатель 34	0,514	низкий
Показатель 35	0,831	высокий
Показатель 36	0,281	низкий
Показатель 37	0,385	низкий
Показатель 38	0,219	низкий
Показатель 39	0,373	низкий
Показатель 40	0,491	низкий
Показатель 41	0,371	низкий
Показатель 42	0,904	очень высокий
Показатель 43	0,762	высокий
Показатель 44	0,328	низкий
Показатель 45	0,183	низкий
Показатель 46	0,271	низкий

Далее определялись величины коэффициента конкордации текстурных характеристик губчатого вещества третьего и четвертого поясничных позвонков при наложении на магнитно-резонансные томограммы, выполненные на диагностическом оборудовании разного класса, фильтров Лапласа-Гаусса.

Постпроцессорная обработка наборов магнитно-резонансных томограмм фильтром `reflect` позволила установить, что очень высокий уровень согласованности имеют следующие текстурные показатели, характеризующие губчатое вещество третьего поясничного позвонка: асферичность ($W=0,915$) и медиана интенсивности ($W=0,900$).

Высокий уровень согласованности количественных показателей текстурного анализа оказался у следующих характеристик: расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,710$), асимметрия

интенсивности ($W=0,722$), соотношение поверхности и объема ($W=0,814$), компактность ($W=0,716$), смещение центра масс ($W=0,711$), сферический диаметр ($W=0,763$), средняя интенсивность ($W=0,804$), эксцесс интенсивности ($W=0,774$). Численные значения остальных величин коэффициента конкордации Кендалла представлены в таблице (Таблица 6.3).

В теле четвертого поясничного позвонка очень высокий уровень согласованности при оценке двумя специалистами имели следующие показатели текстурного анализа: асферичность ($W=0,914$), расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,922$), медиана интенсивности ($W=0,932$). Высокий уровень согласованности имели следующие текстурные характеристики: соотношение поверхности и объема ($W=0,712$), компактность ($W=0,802$), смещение центра масс ($W=0,782$), сферическая диспропорция ($W=0,800$), средняя интенсивность ($W=0,788$), дисперсия интенсивности ($W=0,827$). Численные показатели коэффициента согласованности мнений двух экспертов для четвертого поясничного позвонка представлены в Таблице 6.4.

Таблица 6.4 – численные значение коэффициента согласованности мнений двух экспертов (коэффициента конкордации Кендалла) при оценке текстурных признаков губчатого вещества третьего поясничного позвонка двумя независимыми специалистами по данным магнитно-резонансной томографии с использованием постпроцессорной обработки при помощи фильтров Лапласа-Гаусса

Текстурный показатель	Тип фильтра			
	reflect	periodic	edge	zero
Показатель 1	0,436; 0,328	0,583; 0,473	0,082; 0,184	0,382; 0,388
Показатель 2	0,281; 0,326	0,298; 0,182	0,228; 0,219	0,281; 0,524
Показатель 3	0,381; 0,417	0,484; 0,329	0,283; 0,473	0,543; 0,452
Показатель 4	0,814; 0,712	0,392; 0,489	0,284; 0,387	0,563; 0,716
Показатель 5	0,716; 0,802	0,378; 0,382	0,009; 0,019	0,812; 0,812
Показатель 6	0,291; 0,398	0,093; 0,291	0,027; 0,193	0,281; 0,271

Показатель 7	0,219; 0,391	0,178; 0,136	0,228; 0,183	0,172;0,284
Показатель 8	0,592; 0,800	0,138; 0,172	0,119; 0,392	0,913;0,913
Показатель 9	0,319; 0,291	0,394; 0,371	0,193; 0,073	0,128;0,271
Показатель 10	0,291; 0,219	0,378; 0,158	0,483; 0,284	0,562;0,372
Показатель 11	0,915; 0,914	0,964; 0,911	0,915; 0,924	0,962;0,783
Показатель 12	0,710; 0,922	0,719; 0,231	0,803; 0,372	0,376;0,534
Показатель 13	0,092; 0,195	0,076;0,079	0,384;0,083	0,093;0,118
Показатель 14	0,194; 0,298	0,254;0,643	0,193;0,128	0,372;0,163
Показатель 15	0,711; 0,782	0,729;0,463	0,711;0,281	0,905;0,903
Показатель 16	0,418; 0,382	0,218;0,063	0,173;0,274	0,271;0,314
Показатель 17	0,064; 0,186	0,128;0,110	0,271;0,382	0,093;0,083
Показатель 18	0,428; 0,284	0,017;0,106	0,083;0,128	0,451;0,341
Показатель 19	0,371; 0,173	0,281; 0,381	0,218;0,202	0,389;0,256
Показатель 20	0,284; 0,193	0,078; 0,143	0,080;0,102	0,180;0,212
Показатель 21	0,193; 0,284	0,317; 0,354	0,218;0,228	0,218;0,334
Показатель 22	0,092; 0,016	0,452; 0,516	0,188;0,106	0,136;0,189
Показатель 23	0,381; 0,418	0,317; 0,182	0,614;0,598	0,618;0,598
Показатель 24	0,271; 0,381	0,318; 0,415	0,329;0,288	0,432;0,468
Показатель 25	0,381; 0,178	0,318; 0,129	0,218;0,112	0,286;0,202
Показатель 26	0,763; 0,573	0,531;0,371	0,424;0,448	0,792;0,865
Показатель 27	0,483; 0,562	0,581; 0,922	0,928; 0,908	0,587;0,482
Показатель 28	0,804; 0,788	0,776; 0,748	0,815; 0,807	0,718;0,813
Показатель 29	0,672; 0,827	0,318; 0,910	0,668;0,920	0,801;0,583
Показатель 30	0,722; 0,376	0,067;0,192	0,212; 0,391	0,382;0,256
Показатель 31	0,774; 0,483	0,481; 0,381	0,281; 0,312	0,762;0,762
Показатель 32	0,900; 0,932	0,901; 0,772	0,918; 0,721	0,786;0,882
Показатель 33	0,218; 0,462	0,471; 0,471	0,518; 0,712	0,473;0,389
Показатель 34	0,018;0,281	0,067;0,146	0,618; 0,514	0,900;0,586
Показатель 35	0,118;0,036	0,241;0,281	0,282;0,312	0,484;0,372
Показатель 36	0,217;0,183	0,078;0,172	0,218;0,1140,44	0,473;0,372
Показатель 37	0,173;0,218	0,015;0,038	0,009;0,012	0,412;0,798
Показатель 38	0,078;0,027	0,113;0,218	0,228;0,211	0,281;0,183
Показатель 39	0,131;0,027	0,104;0,128	0,108;0,098	0,182;0,184
Показатель 40	0,173;0,037	0,192;0,382	0,015; 0,052	0,017;0,172

Показатель 41	0,024;0,182	0,048;0,032	0,099;0,121	0,183;0,186
Показатель 42	0,017;0,072	0,105;0,281	0,112;0,117	0,281;0,716
Показатель 43	0,067;0,164	0,352; 0,314	0,225;0,118	0,228;0,382
Показатель 44	0,178;0,382	0,027;0,132	0,110;0,085	0,183;0,382
Показатель 45	0,026;0,075	0,048;0,082	0,077;0,117	0,146;0,278
Показатель 46	0,183;0,271	0,271;0,113	0,318;0,318	0,372;0,326

Примечание – первое число в паре значений соответствует L_{III} , второе – L_{IV} .

При наложении фильтров *periodic* и *edge*, как и в случае сегментации губчатого вещества тел поясничных позвонков независимыми специалистами, наблюдаются одинаковые закономерности: очень высокий показатель конкордантности имели следующие характеристики текстуры губчатого вещества третьего поясничного позвонка: асферичность ($W=0,964$ и $W=0,915$ для фильтров *periodic* и *edge* соответственно, здесь и далее по тексту), медиана интенсивности ($W=0,901$ и $W=0,918$); высокий уровень согласованности – средняя интенсивность ($W=0,776$ и $W=0,815$), смещение центра масс ($W=0,729$ и $W=0,711$), расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом ($W=0,719$ и $W=0,803$). Воспроизводимость других показателей текстуры тел третьих поясничных позвонков оценивалась как низкая.

В четвертом поясничном позвонке следующие характеристики текстуры его губчатого вещества имели очень высокую воспроизводимость: асферичность ($W=0,911$ и $W=0,924$), интегрированная интенсивность ($W=0,922$ и $W=0,908$), дисперсия интенсивности ($W=0,910$ и $W=0,920$); высокий уровень согласованности – медиана интенсивности ($W=0,772$ и $W=0,721$), средняя интенсивность ($W=0,748$ и $W=0,807$).

При наложении фильтра Лапласа-Гауса *zero* очень высокий уровень воспроизводимости имели следующие величины текстурного анализа, характеризующие губчатое вещество тела третьего поясничного позвонка: асферичность ($W=0,962$), смещение центра масс ($W=0,905$), сферическая диспропорция ($W=0,913$).

Высокий уровень согласованности количественных показателей текстурного анализа оказался у следующих характеристик: медиана интенсивности ($W=0,786$), средняя интенсивность ($W=0,718$), эксцесс интенсивности ($W=0,762$), соотношение поверхности и объема ($W=0,716$), компактность ($W=0,812$), дисперсия интенсивности ($W=0,801$).

В теле четвертого поясничного позвонка очень высокий уровень согласованности при оценке двумя специалистами имели следующие показатели текстурного анализа: смещение центра масс ($W=0,903$), сферическая диспропорция ($W=0,913$).

Высокий уровень согласованности количественных показателей текстурного анализа оказался у следующих показателей: асферичность ($W=0,783$), медиана интенсивности ($W=0,882$), средняя интенсивность ($W=0,813$), эксцесс интенсивности ($W=0,762$), соотношение поверхности и объема ($W=0,716$), компактность ($W=0,812$), диапазон интенсивности ($W=0,798$), среднее значение гистограммы интенсивности ($W=0,716$). Численные показатели коэффициента конкордации Кендалла текстурных признаков губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков, установленные при оценке магнитно-резонансных томограмм, выполненных на диагностических аппаратах разного класса, были представлены в таблице 6.4.

Как и в случае с оценкой текстурных характеристик двумя диагностами, при проведении постпроцессорной обработки магнитно-резонансных томограмм, выполненных на диагностическом оборудовании разного класса, количество воспроизводимых текстурных признаков значительно уменьшается, что делает применение фильтров Лапласа-Гауса нецелесообразным при оценке структуры губчатого вещества поясничных позвонков. Кроме того, количество признаков, описывающих текстуру губчатого вещества на магнитно-резонансных томограммах, выполненных на аппаратах разного класса, оказалось несколько меньше, чем при оценке таковой двумя независимыми диагностами, что подчеркивает необходимость тщательного выбора текстурных

характеристик, которые являются «универсальными» и в наименьшей степени зависят от оборудования или процесса сегментации.

Применение для постпроцессорной обработки МР-изображений фильтра reflect привело к уменьшению количества конкордантных показателей текстуры губчатого вещества тел изучаемых позвонков: очень высокий уровень согласованности оказался у 2 показателей в третьем поясничном позвонке, у 3 показателей – в четвертом поясничном позвонке, при применении фильтров periodic и edge – у 2 и 3 показателей соответственно, при применении фильтра zero – у 3 и 2 показателей в теле третьего и четвертого поясничных позвонков соответственно. При этом количество признаков, имеющих очень высокую воспроизводимость без применения фильтрации, составляло 5 и 4 в третьем и четвертом поясничных позвонках соответственно.

Количество характеристик текстуры губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков при применении на изображении фильтра reflect Лапласа-Гауса уменьшилось с 10 в третьем поясничном позвонке и такого же количества в четвертом поясничном позвонке до 8 и 6 соответственно, до 3 и 2 соответственно – при наложении фильтров periodic и edge, до 6 и 8 соответственно – при наложении фильтра zero.

Количество признаков, имеющих очень высокий и высокий уровень воспроизводимости при наложении фильтров Лапласа-Гауса и без фильтрации, представлены в Таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Воспроизводимость текстурных показателей.

Используемый фильтр	Порог	Поясничный позвонок	
		LIII	LIV
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

Наиболее высокое значение коэффициента конкордации отмечается у показателя межквартильного размаха интенсивности ($W=0,936$ в L_{III} и $W=0,962$ – в L_{IV}) без применения фильтров Лапласа-Гауса, а также у показателя асферичности в теле L_{III} при применении фильтра *periodic* ($W=0,964$) и при применении фильтра *zero* ($W=0,962$).

При оценке МРТ, выполненных на диагностическом оборудовании разного класса, для количественной оценки структуры губчатого вещества тел L_{III} и L_{IV} в качестве предикторов редификации костной ткани следует использовать следующие величины, имеющие очень высокий и высокий уровни воспроизводимости в L_{III} и L_{IV} : асферичность, расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом, средняя интенсивность, медиана интенсивности, дисперсия интенсивности, соотношение поверхности и объема, компактность, сферическая диспропорция, смещение центра масс, диапазон интенсивности, сферический диаметр, эксцесс интенсивности.

Установлена нецелесообразность применения постпроцессорной обработки магнитно-резонансной томограммы в виде наложения фильтров Лапласа-Гауса, поскольку количество воспроизводимых текстурных признаков при фильтрации значительно уменьшается.

Полученные результаты легли в основу прогностической модели для оценки губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным магнитно-резонансной томограммы (Рисунок 6.2).

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

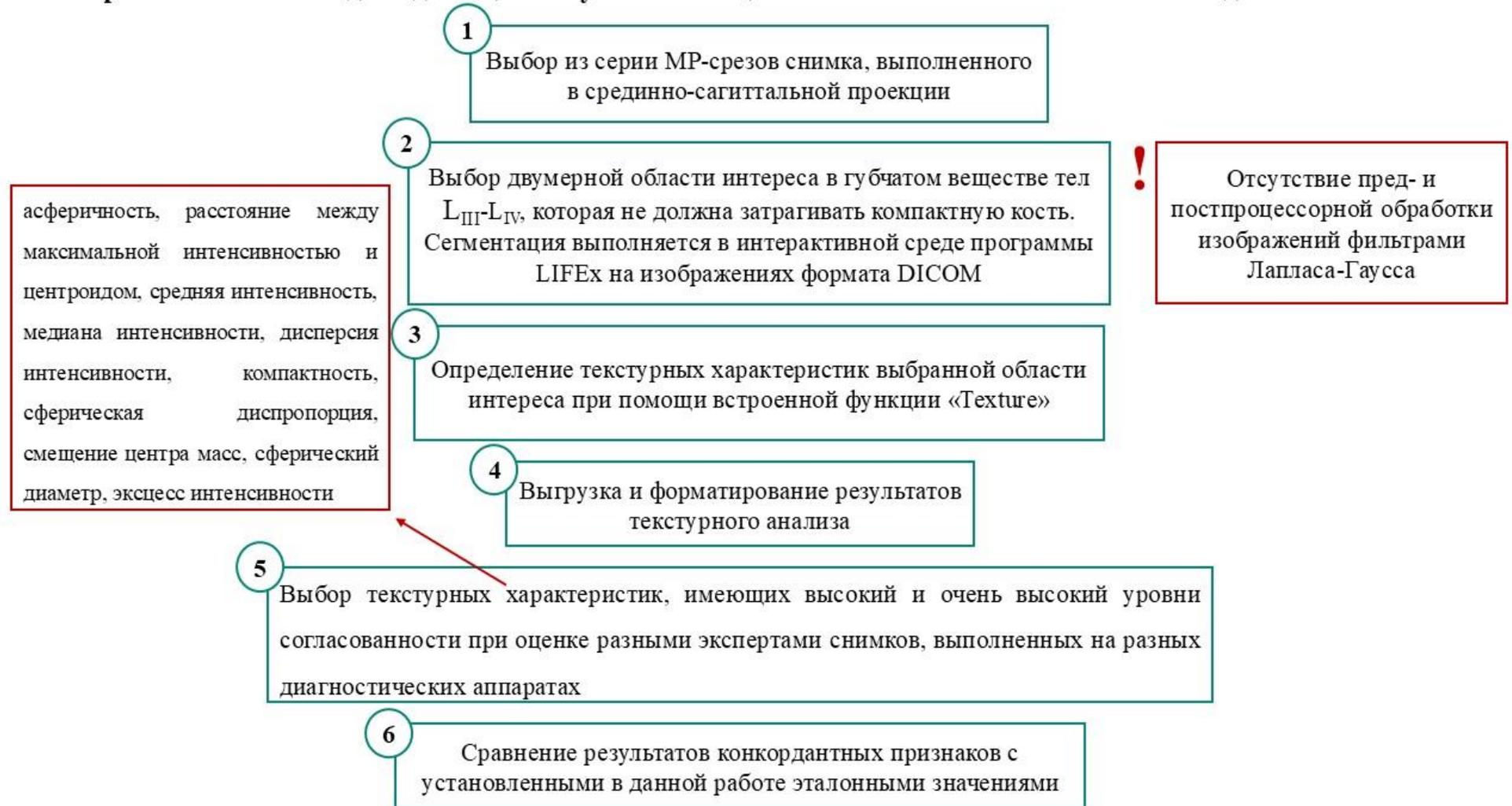


Рисунок 6.2. Прогностическая модель для оценки губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным МРТ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка морфологии губчатого вещества тел поясничных позвонков с помощью современных методов медицинской визуализации – процесс субъективный и зачастую зависит не только от опыта диагноста, но и от качества самого изображения. В настоящее время медицинская наука нацелена на поиск «универсальных» численных критериев, которые могут описать существующие закономерности в строении той или иной области тела человека или конкретной структуры, в том числе – пространственной организации костной ткани. Такой подход позволяет снизить влияние субъективных факторов и значительно улучшить диагностические подходы к мониторингу остеопоротических поражений различной локализации и доклинической диагностике возможных осложнений остеопороза [2, 36].

Форма тел поясничных позвонков во многом обусловлена структурой и состоянием губчатого вещества. Методы оценки их конфигурации делятся на качественные, полуколичественные и количественные – такое многообразие указывает на отсутствие «золотого» стандарта, позволяющего численно и объективно оценить форму тела позвонка с целью диагностики компрессионных переломов и ряда других патологических состояний. В настоящий момент наиболее часто используется полуколичественный метод Генанта, основанный на сравнении высоты тела позвонка в переднем, среднем и заднем его отделах. Однако исследователи продолжают поиск и разработку количественных критериев, позволяющих описать форму тела позвонка, в том числе в автоматическом режиме, поскольку метод Генанта и другие полуколичественные методы не учитывают ряд факторов, влияющих на оценку формы позвонка врачом-диагностом.

В норме по данным магнитно-резонансной томографии конфигурация тела поясничного позвонка должна быть приближена к прямоугольнику, при этом разница между передней, средней и задней высотой тела позвонка не должна

превышать 20%. Кроме этого, существуют нормативные таблицы абсолютных размеров тел позвонков, которые позволяют сравнивать полученные при исследовании размеры с должнствующими и формировать представление о состоянии того или иного отдела позвоночника. Однако возникает ряд нерешенных проблем: зачастую на медицинских изображениях невозможно или крайне затруднительно определить абсолютные размеры той или иной структуры позвонка без специальной морфометрической метки, а значит оценить их не представляется возможным; методы индексной морфометрии довольно трудоемки и предполагают разметку и определение довольно большого количества абсолютных размеров с последующим вычислением индексов; нормативные значения не учитывают индивидуальную, этнотерриториальную, возрастную изменчивость и половой диморфизм в строении позвонка, а также возможное отсутствие на магнитно-резонансной томограмме всех поясничных позвонков ввиду зонального выполнения исследования.

Нами были получены нормативные значения углов, характеризующие 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. Величины угловых показателей могут служить дополнением к существующим количественным методикам оценки конфигурации тел поясничных позвонков или самостоятельным инструментом при анализе магнитно-резонансных томограмм. В дальнейшем возможно создание программного комплекса на основе обученной нейронной сети, которая в полуавтоматическом режиме способна оценивать конфигурацию тел поясничных позвонков и предполагать наличие начальных изменений еще на доклинической стадии.

Выявлен половой диморфизм, проявляющийся в тенденции к большим значениям углов α , β и μ в группе обследуемых женского пола в телах четвертого и пятого поясничных позвонков и к большим значениям угла λ в группе лиц мужского пола в теле пятого поясничного позвонка.

Установлены возрастные отличия исследуемых угловых показателей: углы α , β принимали большие значения в телах первого и четвертого поясничных позвонков во втором периоде зрелого возраста, чем в первом, а угол β оказался также статистически значимо больше во втором периоде зрелого возраста в теле третьего поясничного позвонка. Угол μ оказался больше во втором периоде зрелого возраста в телах первого, третьего и пятого поясничных позвонков, а угол λ – статистически значимо больше в первом периоде зрелого возраста в теле первого поясничного позвонка, что отражает естественные инволюционные изменения архитектоники позвонков, предшествующие клиническому остеопорозу.

На современном этапе развития методов медицинской визуализации особый интерес представляет углубленный пиксельный и воксельный анализ структуры губчатого вещества тел поясничных позвонков по данным медицинских изображений [76, 177]. Одной из объективных характеристик, позволяющих численно, а значит объективно оценить структуру губчатого вещества тел поясничных позвонков является величина интенсивности сигнала.

В данной работе нами были установлены значения интенсивности сигнала губчатого вещества тел поясничных позвонков в норме, которые могут быть использованы в практической медицине в качестве объективного критерия нормы, а также для дальнейших исследований в данной области, определены статистические закономерности величин данной переменной. Так, значения интенсивности сигнала от губчатого вещества тел поясничных позвонков статистически значимо не отличались в разных позвонках у обследуемых как первого, так и второго периода зрелого возраста. Однако интенсивность сигнала у лиц мужского пола первого периода зрелого возраста оказалась достоверно больше, чем у лиц женского пола второго периода зрелого возраста в губчатом веществе тела четвертого поясничного позвонка. Описанные закономерности делают данный показатель достаточно «универсальным», поскольку одно и то же эталонное значение может быть использовано для обследуемых разного пола и разных возрастных групп.

Коэффициент структурной гетерогенности – интегрированный показатель, который позволяет уточнить текстуру изображения, обусловленную не только собственно костными трабекулами, но и химическим окружением, а именно – количеством протонов в единице объема. Коэффициент структурной гетерогенности рассчитывался по формуле, предложенной Иозефи Д.Я. и соавторами (2022). Авторы работы убедительно доказали эффективность данного показателя для дифференцировки очаговых изменений костной ткани, а значит такой показатель может являться предиктором изменений, происходящих в трабекулах губчатого вещества тел поясничных позвонков [13].

Ряд авторов убедительно доказал эффективность применения указанной переменной для дифференциальной диагностики остеолитических и остеобластических поражений костей [43, 67]. Однако отсутствие численного эталона нормы данного параметра не позволяет внедрить ее использование в рутинную практику для оценки отклонений от нормы в пространственной организации костного вещества. Статистические показатели сигнальных характеристик зоны интереса изображения могут и должны стать не только инструментом дифференциальной диагностики уже имеющихся изменений, но и предикторами изменения минеральной плотности костей без применения дополнительных диагностических средств [29, 34, 69].

Структура губчатого вещества костной ткани, визуализируемая на цифровом медицинском изображении, может быть охарактеризована в виде таблицы чисел, количественно описывающих каждый пиксель выбранной области [69]. В качестве численных, а значит – объективных характеристик структуры костного вещества в зоне интереса могут служить некоторые статистические показатели уровня интенсивности серого цвета, такие, как среднее или медиана значений уровня серого, его стандартное квадратичное отклонение, показатели асимметрии и эксцесса [66].

Использование данных показателей текстуры для оценки математической морфологии той или иной зоны интереса может осуществляться при минимальном участии диагноста с использованием стандартных программных

продуктов с открытым кодом доступа. Одной из таких программ является утилита ImageJ, которая дает возможность рассчитать некоторые параметры текстурного анализа, позволяющие оценить морфологию выбранной области не только визуально, но и численно. Рядом авторов была доказана эффективность такого подхода в диагностике дегенеративно-дистрофических заболеваний костей, а также определении стадии развития заболевания. Кабалык М.А и соавторы (2022) в своих работах использовали оцифрованные рентгеновские изображения субхондральной кости, однако такой подход может привести к искажению оттенка, цвета, яркости, контраста и других параметров рентгеновского снимка, поэтому предпочтительным для анализа уровней серого в ImageJ является использование цифровых изображений, а не отпечатанных на рентгенографической пленке [14].

Такой подход позволяет оценить не просто численные характеристики сегментированной зоны, но и гистограмму распределений частот величин уровней серого: не только описать изображение в целом, но и как совокупность пикселей со своими количественными значениями, что не противоречит имеющимся в литературе сведениям по рекомендациям применения текстурного анализа при изучении медицинских изображений [69].

Как и в случае с показателями текстурного анализа, отсутствовали численные критерии нормы вышеуказанных величин, что затрудняло использование метода определения уровня серого в практической медицине для изучения и оценки структуры костной ткани. Существующие на данный момент исследования в этой области, посвящены исключительно диагностике изменений структуры кости в связи с существующей патологией [43, 105, 142].

Выбор L_{III} и L_{IV} в качестве объекта исследования был неслучаен: именно средние позвонки каждого из отдела обладают наиболее типичным строением, в то время как первые и последние позвонки имеют сходные признаки с позвонками смежных отделов [4].

В ходе работы были установлены количественные значения уровня серого, а также статистические закономерности ее величин. Значения данной

переменной в теле третьего поясничного позвонка оказались статистически значимо больше, чем соответствующие значения в теле четвертого поясничного позвонка. При этом при статистической оценке величин уровня серого оказалось, что значения изучаемой переменной во втором периоде зрелого возраста оказались статистически значимо выше в третьем поясничном позвонке, чем в четвертом.

Нормализация проводилась по формуле: $\mu \pm 3\sigma$, где μ - среднее значение уровня серого, σ – стандартное квадратичное отклонение уровня серого. Однако эта процедура в большей степени влияла на текстурные признаки первого порядка [173, 174].

В ходе исследования нами установлена средняя по силе линейная положительная корреляционная связь между изучаемой переменной и возрастом обследуемых во втором периоде зрелого возраста для четвертого поясничного позвонка. В группе лиц мужского пола значения уровня серого оказались выше в теле третьего поясничного позвонка, чем в теле четвертого поясничного позвонка, а статистически значимо большие значения величины уровня серого оказались в группе лиц мужского пола, чем в группе лиц женского пола ($p=0,045$).

Оценка графика распределения частот величин уровня серого при помощи значений асимметрии и эксцесса позволила сделать вывод, что большинство изображений структуры губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков описываются правонаправленным, островершинным графиком распределения частот величин серого. Левонаправленную асимметрию в третьем поясничном позвонке имели 38% (в первом периоде зрелого возраста – 38,7%, во втором периоде зрелого возраста – 37,8%, у мужчин – 41,3%, у женщин – 38,4%), в четвертом поясничном позвонке – 42% изученных магнитно-резонансных томограмм (в первом периоде зрелого возраста – 43,2%, во втором периоде зрелого возраста – 62,2%, у мужчин – 42,7%, у женщин – 40,3%), правонаправленную асимметрию – 62% и 58% изображений соответственно (в первом периоде зрелого возраста – 61,3% и 56,8% в третьем и четвертом

поясничных позвонках соответственно, во втором периоде зрелого возраста – 62,2% и 60,4% соответственно, у мужчин – 58,7% и 61,6% соответственно, у женщин – 61,6% и 59,7% соответственно).

Острове́ршинное распределение было характерно для 71,3% изученных магнитно-резонансных томограмм при сегментации губчатого вещества тела третьего поясничного позвонка (в первом периоде зрелого возраста – 66,3%, во втором периоде зрелого возраста – 71,1%, у мужчин – 69,2%, у женщин – 71,25%) и для 67,8% – при изучении губчатого вещества тела четвертого поясничного позвонка (в первом периоде зрелого возраста – 67,8%, во втором периоде зрелого возраста – 68,3%, у мужчин – 68,4%, у женщин – 68,3%). Плоско́вершинное распределение – 28,7% медицинских изображений при анализе зоны интереса в теле третьего поясничного позвонка (в первом периоде зрелого возраста – 33,7%, во втором периоде зрелого возраста – 28,9%, у мужчин – 30,8%, у женщин – 28,8%), 32,3% – при сегментации губчатого вещества тела четвертого поясничного позвонка (в первом периоде зрелого возраста – 32,2%, во втором периоде зрелого возраста – 31,7%, у мужчин – 31,6%, у женщин – 33,1%).

Тексту́рный анализ – один из современных методов математической морфологии, который позволяет оценить структуру той или иной области как совокупность пикселей или вокселей с присущими им различными числовыми характеристиками. Причем указанные текстурные характеристики возможно определить при помощи ряда программных продуктов как бесплатных, так и открытым кодом доступа. Многочисленные исследования по вопросам применения текстурного анализа в оценке медицинских изображений и определении отклонений от нормы в структуре того или иного органа убедительно показывают эффективность этого метода в качестве диагностического или исследовательского инструмента [53, 80, 82, 117, 121, 128, 145, 149, 156, 180].

Однако широкое внедрение этого метода математической морфологии сдерживается рядом факторов, одним из которых является отсутствие набора текстурных признаков, которые бы в наименьшей степени зависели от процесса

сегментации – выбора зоны интереса, а также от диагностического оборудования, на котором выполнено медицинское изображение, что согласуется с данными зарубежных исследователей [102].

В настоящее время не существует убедительных доказательств того, что использование постпроцессорной обработки увеличивает воспроизводимость текстурных признаков, однако, согласно данным ряда авторов, количество воспроизводимых текстурных признаков увеличивается при использовании фиксированного размера вокселя, срезов определенной толщины или ограничении уровней серого при выполнении исследования [178]. Ряд авторов при изучении конкордантных текстурных признаков магнитно-резонансных томограмм говорят о том, что количество воспроизводимых текстурных признаков увеличивается при проведении процедуры нормализации уровня серого. Абсолютное количество текстурных характеристик значительно уменьшалось при наложении на изображение фильтров Лапласа-Гаусса, что позволяет говорить о нецелесообразности применения таковых. Эти данные полностью соответствуют результатам, полученным исследователями при оценке конкордантности признаков, характеризующих очаговые изменения поджелудочной железы по данным компьютерной томографии [18].

Кроме этого, до настоящего времени не установлено, что является более предпочтительным: 2D- или 3D-сегментация [74]. В случае объемных образований и их дифференцировки предпочтительным является полное включение объемной структуры в зону интереса, однако в случае нормы такое правило не является аксиомой. Поэтому в нашем исследовании для изучения структуры губчатого вещества тел поясничных позвонков производилась 2D-сегментация.

В ходе работы установлены конкордантные текстурные признаки губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков при выборе области интереса двумя независимыми специалистами, к таковым можно отнести компактность, сферическую диспропорцию, асферичность, расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом, смещение центра масс,

наименьшее расстояние между координатами максимальной интенсивности и координатами периметра сагиттального среза, заданными в координатах максимальной интенсивности, сферический диаметр, интегрированную интенсивность, среднюю интенсивность, дисперсию интенсивности, эксцесс интенсивности, медиану интенсивности, минимум интенсивности, среднее значение гистограммы интенсивности, асимметрию гистограммы интенсивности. Конкордантность данных показателей текстуры губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков имеет очень высокие и высокие значения в обоих позвонках. При наложении фильтров на изображения губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков для оценки структуры обоих позвонков одновременно может быть использован показатель асферичности и показатель медианы интенсивности, которые при наложении всех использованных фильтров имели очень высокий и высокий показатель согласованности ($W_1=0,7$; $W_2=0,93$ соответственно).

При использовании магнитно-резонансных томограмм губчатого вещества тел третьего и четвертого поясничных позвонков, выполненных на диагностическом оборудовании разного класса, следующие текстурные показатели имели высокий и очень высокий уровни согласованности: асферичность, расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом, средняя интенсивность, медиана интенсивности, дисперсия интенсивности, соотношение поверхности и объема, компактность, сферическая диспропорция, смещение центра масс, диапазон интенсивности, сферический диаметр, эксцесс интенсивности. Вышеуказанные текстурные показатели имеют очень высокий и высокий уровни воспроизводимости одновременно в третьем и четвертом поясничных позвонках ($W_1=0,81$; $W_2=0,97$ соответственно).

Таким образом, в наименьшей степени от номера позвонка, процесса сегментации и диагностического аппарата зависят следующие текстурные показатели: асферичность, расстояние между максимальной интенсивностью и центроидом, средняя интенсивность, медиана интенсивности, дисперсия интенсивности, компактность, сферическая диспропорция, смещение центра

масс, сферический диаметр, эксцесс интенсивности. Указанные величины могут быть использованы для оценки пространственной организации губчатого вещества тел поясничных позвонков в качестве предикторов редификации костной ткани независимо от процесса сегментации и того, на каком аппарате выполнена магнитно-резонансная томограмма позвоночного столба.

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 rareфикации 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 rareфикации костной ткани.

5. Разработанная прогностическая модель оценки магнитно-резонансного изображения губчатого вещества тел поясничных позвонков методами 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 rareфикации 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 независимых экспертов 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

а.б.е.	абсолютные безразмерные единицы
ГК	Глюкокортикоиды
ДИ	Доверительный интервал
КСГ	Коэффициент структурной гетерогенности
КТ	Компьютерная томография
МПК	Минеральная плотность кости
МРТ	Магнитно-резонансная томография
ОП	Остеопороз
СКО	Стандартное квадратичное отклонение
СТГ	Соматотропный гормон
ТГ	Тиреоидные гормоны
ФИ	Фрактальный индекс
DXA	Dual-energy X-ray absorptiometry (двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия)
GLCM	Gray Level Co-occurrence Matrix
max	Максимум
min	Минимум
OPG	Остеопротегерин
RANK	Рецептор-активатор ядерного фактора – NF-κB
ROI	Region of Interest
RANKL	лиганд рецептора-активатора ядерного фактора каппа-B (NF-κB)
P	Уровень значимости при коэффициенте Стьюдента
p*	Уровень значимости при коэффициенте Вилкоксона
R	Коэффициент корреляции Пирсона
r*	Коэффициент корреляции Спирмена
STIR	Short Tau Inversion Recovery (инверсия-восстановление спинового эха)
W	Коэффициент конкордации Кендалла

Литература

1. Баландин, А. А. Сравнительная морфотопометрическая характеристика ТI- и TVI-позвонок человека в первом периоде зрелого возраста и в пожилом возрасте / А. А. Баландин, О. А. Чудинов, И. А. Баландина // Сибирский научный медицинский журнал. – 2025. – Т. 45, № 2. – С. 57–63. – DOI: 10.18699/SSMJ20250205.
2. Белая, Ж. Е. Федеральные клинические рекомендации по диагностике, лечению и профилактике остеопороза / Ж. Е. Белая, К. Ю. Белова, Е. В. Бирюкова, И. И. Дедов, Л. К. Дзеранова, О. М. Драпкина [и др.] // Остеопороз и остеопатии. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 4–47. – DOI: 10.14341/osteo12930.
3. Бузина, А. М. Топографо-анатомические взаимоотношения, выявляемые при анализе магнитно-резонансных томограмм печени в норме / А. М. Бузина, И. Н. Фатеев // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 3. – С. 87–90.
4. Гайворонский, И.В. Нормальная анатомия человека / И.В. Гайворонский. – СПб.: СпецЛит, 2024. – Т. 1. – С. 79-85.
5. Гележе, П.Б. Радиомика магнитно-резонансной томографии при раке предстательной железы: что известно в настоящее время? / П.Б. Гележе, И.А. Блохин, С.С. Семенов, Д. Caruso // Digital Diagnostics. – 2021. – Т. 2, № 4. – С. 441–452. – DOI: 10.17816/DD70170.
6. Герк, С. А. Элементный состав костной ткани человека в норме и при патологии / С. А. Герк, О. А. Голованова // Вестн. Омск. ун-та. – 2015. – № 4. – С. 78.
7. Гордуладзе, Д. Н. Возможности текстурного анализа лучевых методов визуализации в диагностике образований паренхимы почки / Д. Н. Гордуладзе, Е. С. Сирота, Л. М. Рапопорт, В. Н. Гридин, Д. Г. Цариченко, И. А. Кузнецов, П. В. Бочкарев, Ю. Г. Аляев // Урология. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 129–135. – DOI: 10.17650/1726-9776-2021-17-4-129-135.

8. Гуллияева, А. М. Анатомия человека: современные подходы и новые открытия / А. М. Гуллияева // Наука и мировоззрение. – 2025. – № 36.
9. Добрых, В. А. Фрактальный анализ в биологии и медицине / В. А. Добрых, В. О. Седаков, Т. К. Тен [и др.] // Дальневост. мед. журн. – 2020. – № 4.
10. Дробышевский, С. В. Анатомия антрополога / С. В. Дробышевский. – Москва ; Санкт-Петербург : АРХЭ, Центр гуманитарных инициатив, 2019. – 382 с.
11. Ершова, О.Б. Эпидемиология переломов проксимального отдела бедренной кости у городского населения Российской Федерации: результаты многоцентрового исследования / О.Б. Ершова, К.Ю. Белова, М.В. Белов [и др.] // Форум остеопороза : материалы научно-практической конференции «Остеопороз – важнейшая мультидисциплинарная проблема здравоохранения XXI века» (Санкт-Петербург, 23–25 сентября 2012 г.). – С. 23–27.
12. Иванов, М. А. Системные взаимоотношения строения грудных позвонков и околопозвоночных мышц у женщин зрелого возраста по данным компьютерной томографии / М. А. Иванов, И. Н. Яшина, С. В. Ключкова, Ф. Д. Яшин, Д. Ю. Рыбалко // Медицинский вестник Башкортостана. – 2023. – Т. 18, № 6. – С. 39–44.
13. Иозефи, Д. Я. Возможности текстурного анализа изображений (коэффициента структурной гетерогенности и карт исчисляемого коэффициента диффузии) в дифференциальной диагностике метастатического поражения костей по данным магнитно-резонансной томографии / Д. Я. Иозефи, Н. И. Сергеев, В. А. Солодкий, М. А. Винидченко // Вестник Российского научного центра рентгенодиагностики. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 1–17.
14. Кабалык, М. А. Морфологические обоснования применения методов текстурного анализа изображений субхондральной кости при остеоартрите / М. А. Кабалык, Т. С. Коваленко, А. Л. Осипов, М. Ф. Фадеев // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 5. – DOI: 10.17513/spno.26895.
15. Каприн, А. Д. Синтез фундаментальных и прикладных исследований – основа обеспечения высокого уровня научных результатов и внедрения их в

медицинскую практику / А. Д. Каприн, В. Н. Галкин, Л. П. Жаворонков, В. К. Иванов, С. А. Иванов, Ю. С. Романко // Радиация и риск. – 2017. – Т. 26, № 2. – С. 26–40.

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

17. Козлов, А. И. Долгий путь от анатомической антропологии к вариантной анатомии / А. И. Козлов // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология. – 2025. – № 1. – С. 133–143.

18. Кондратьев, Е. В. Теоретические основы текстурного анализа КТ-изображений образований органов брюшной полости: обзор / Е. В. Кондратьев, С. А. Шмелева, А. А. Усталов, В. И. Гурина, Г. Г. Кармазановский // Лучевая диагностика и терапия. – 2025. – Т. 16, № 1. – С. 33–46. – DOI: 10.22328/2079-5343-2025-16-1-33-46.

19. Латыпова, Н. В. Фрактальный анализ: учебное пособие / Н. В. Латыпова. – Ижевск: Удмуртский государственный университет, 2020. – 100 с.

20. Литвин, А. А. Радиомика и цифровой анализ текстуры изображения в онкологии (обзор) / А. А. Литвин, Д. А. Буркин, А. А. Кропинов [и др.] // Современные технологии в медицине. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 97–106. – DOI: 10.17691/stm2021.13.2.11.

21. Максимова, А. С. Радиомический анализ магнитно-резонансных изображений сердца: обзор литературы / А. С. Максимова, В. Ю. Усов, Т. А. Шелковникова, О. В. Мочула, Н. И. Рюмшина, А. Е. Сухарева, К. В. Завадовский // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. – 2023. – Т. 38, № 3. – С. 13–22. – DOI: 10.29001/2073-8552-2023-39-3-13-22.

22. Мартиросян, Э. А. Возможности текстурного анализа компьютерных томограмм в дифференциальной диагностике гастроинтестинальных стромальных опухолей и лейомиом желудка. Обзор литературы / Э. А.

Мартиросян, Г. Г. Кармазановский, Е. В. Кондратьев, Е. А. Соколова // *Digital Diagnostics*. – 2024. – Т. 5, № S1. – С. 112–114. – DOI: 10.17816/DD627088.

23. Марченкова, Л. А. Компрессионные переломы позвонков на фоне остеопороза: медико-социальное значение, клиника, лечение и медицинская реабилитация. Обзор литературы / Л. А. Марченкова // *Вестник восстановительной медицины*. – 2023. – Т. 22, № 6. – С. 91–99. – DOI: 10.38025/2078-1962-2023-22-6-91-99.

24. Молостова, Ю. В. Возможности текстурного анализа и машинного обучения в МРТ-диагностике раннего ГЦР / Ю. В. Молостова, Б. М. Медведева, Е. В. Кондратьев, А. А. Усталов, М. С. Новрузбеков, О. Д. Олисов, В. М. Тарнопольский // *Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия*. – 2024. – Т. 7, № 4. – С. 68–73. – DOI: 10.37174/2587-7593-2024-7-4-68-73.

25. Национальный проект «Продолжительная и активная жизнь» [Электронный ресурс] // *КонсультантПлюс* : [сайт]. – URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 10.09.2025).

26. Нечаев, В. И. Основы теории локомоторной морфологии позвоночного столба человека / В. И. Нечаев, Е. В. Малащенко // *Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал*. – 2006. – Т. 5, вып. 4. – URL: <http://www.smolensk.ru/user/sqma/MMORPH/N-12html/nechaev-2/nechaev-2.htm> (дата обращения: 11.01.2026).

27. Огнерубов, Н. А. Радиогеномика и радиомика в диагностике злокачественных опухолей: обзор литературы / Н. А. Огнерубов, И. А. Шатов, А. В. Шатов // *Вестник Тамбовского университета*. – 2017. – Т. 22, № 6–2. – С. 1453–1460. – DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1453-1460. – [Radiogenomics and radiomics in the diagnostics of malignant tumours: a literary review].

28. Парамзин, Ф. Н. Радиомика и искусственный интеллект в дифференциальной диагностике опухолевых и неопухолевых заболеваний поджелудочной железы (обзор) / Ф. Н. Парамзин, В. В. Какоткин, Д. А. Буркин,

М. А. Агапов // Хирургическая практика. – 2023. – № 1. – С. 53–65. – DOI: 10.38181/2223-2427-2023-1-5.

29. Рамих, Э. А. Краткий очерк анатомо-функциональных особенностей позвоночника / Э. А. Рамих // Хирургия позвоночника. – 2007. – № 2. – С. 77–95.

30. Сапарбаев, Р.Б. Инволютивные изменения морфологии поясничного отдела позвоночника человека / Р.Б. Сапарбаев, И.Ю. Федина, Е.И. Сеченев, С.А. Фоминых // Scientist. – 2018. – № 1. – С. 19-23.

31. Семенов, Д. В. Лучевая диагностика изменений костной ткани при метастатическом раке почки / Д. В. Семенов, В. И. Широкоград, Н. А. Митрофанов, С. В. Кострицкий, В. Ю. Старцев // Лучевая диагностика и терапия. – 2019. – № 1. – С. 86–91. – DOI: 10.22328/2079-5343-2019-10-1-86-91.

32. Сергеев, Н. И. Дифференциальная диагностика очаговых изменений позвоночника с использованием стандартного и радиомического анализа: ретроспективное исследование / Н. И. Сергеев, П. М. Котляров, В. А. Солодкий // Вестник травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 77–86. – DOI: 10.17816/vto322858.

33. Сергеев, Н. И. Особенности применения методов диагностической визуализации в оценке результатов лечения метастазов в кости / Н. И. Сергеев, П. М. Котляров, В. В. Тепляков, В. А. Солодкий // Российский электронный журнал лучевой диагностики. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 84–93. – DOI: 10.21569/2222-7415-2021-11-4-84-93.

34. Сергеев, Н. И. Стандарты анализа метастатического поражения костных структур по данным современных методов лучевой диагностики / Н. И. Сергеев, П. М. Котляров, В. А. Солодкий // Сибирский онкологический журнал. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 5–10. – DOI: 10.21294/1814-4861-2018-17-1-5-10.

35. Скрипникова, И. А. Возможности костной рентгеновской денситометрии в клинической практике (Методические рекомендации) / И. А. Скрипникова, Л. А. Щеплягина, В. Е. Новиков, О. В. Косматова, А. С. Абирова // Остеопороз и остеопатия. – 2010. – № 2. – С. 23–34.

36. Смирнов, А. В. Строение и функции костной ткани в норме и при патологии. Сообщение II / А. В. Смирнов, А. Ш. Румянцев // Нефрология. – 2015. – Т. 19, № 1. – С. 8–17.
37. Трухин, А. А. Статистический текстурный анализ ультразвуковых изображений узлов щитовидной железы при помощи матрицы смежности перед радиойодтерапией ^{131}I / А. А. Трухин, С. М. Захарова, А. В. Манаев, Д. В. Юдаков, Е. А. Трошина, М. С. Шеремета // Проблемы эндокринологии. – 2022. – Т. 68, № 4. – С. 35–42. – DOI: 10.14341/probl13052.
38. Чаплыгина, Е. В. Анатомическая изменчивость шейного отдела позвоночного столба в возрастном, половом и типовом аспектах. Возможности и перспективы изучения / Е. В. Чаплыгина, М. Б. Кучиева, Б. М. Калашаев // Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 3. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30791> (дата обращения: 05.01.2026). – DOI: 10.17513/spno.30791.
39. Шантаревич, М. Ю. Применение текстурного анализа КТ и МР-изображений для определения степени дифференцировки гепатоцеллюлярного рака и его дифференциальной диагностики: обзор литературы / М. Ю. Шантаревич, Г. Г. Кармазановский // Исследования и практика в медицине. – 2022. – Т. 9, № 3. – С. 129–144. – DOI: 10.17709/2410-1893-2022-9-3-10.
40. Шармазанова, Е. П. МРТ-морфометрия тел позвонков и межпозвоночных дисков поясничного отдела позвоночника у больных с нарушением минеральной плотности костной ткани / Е. П. Шармазанова, С. А. Мягков, И. Р. Рыбак // Practical Medicine. – 2015. – № 2 (18). – С. 71–77.
41. Acquah, F. Early Trabecular Development in Human Vertebrae: Overproduction, Constructive Regression, and Refinement / F. Acquah, K.A. Robson Brown, F. Ahmed, N. Jeffery, R.L. Abel // Front Endocrinol. (Lausanne). – 2015. – Vol. 6. – Art. 67. – DOI: 10.3389/fendo.2015.00067.
42. Afroze, A. S. A. Machine learning based osteoarthritis detection methods in different imaging modalities: a review / A. S. A. Afroze, R. Tamilselvi, M. Gani, P.

Beham // *Current Medical Imaging*. – 2023. – Vol. 19, № 14. – P. 1628–1642. – DOI: 10.2174/1573405619666230130143020.

43. Almhdie-Imjabbar A. Trabecular bone texture analysis of conventional radiographs in the assessment of knee osteoarthritis: review and viewpoint / A. Almhdie-Imjabbar, P. Podsiadlo, R. Ljuhar, R. Jennane, K. L. Nguyen, H. Toumi, S. Saarakkala, E. Lespessailles // *Arthritis Research & Therapy*. – 2021. – T. 23, № 1. – Ст. 208. – DOI: 10.1186/s13075-021-02594-9.

44. Amano, Y. Detection of myocardial tissue alterations in hypertrophic cardiomyopathy using texture analysis of T2-weighted short inversion time inversion recovery magnetic resonance imaging / Y. Amano, F. Yanagisawa, Y. Omori, Y. Suzuki, C. Ando, H. Yamamoto [et al.] // *Journal of Computer Assisted Tomography*. – 2020. – Vol. 44, № 3. – P. 341–345. – DOI: 10.1097/RCT.0000000000001007.

45. Amano, Y. Relationship between extension or texture features of late gadolinium enhancement and ventricular tachyarrhythmias in hypertrophic cardiomyopathy / Y. Amano, Y. Suzuki, F. Yanagisawa, Y. Omori, N. Matsumoto // *BioMed Research International*. – 2018. – Vol. 2018. – Art. 4092469. – DOI: 10.1155/2018/4092469.

46. Amling, M. Architecture and distribution of cancellous bone yield vertebral fracture clues: A histomorphometric analysis of the complete spinal column from 40 autopsy specimens / M. Amling, M. Posl, H. Ritzel [et al.] // *Arch. Orthop. Trauma Surg*. – 1996. – Vol. 115. – P. 262–269. – DOI: 10.1007/BF00439050.

47. An H. CT texture analysis in histological classification of epithelial ovarian carcinoma / H. An, Y. Wang, E. M. F. Wong, S. Lyu, L. Han, J. A. U. Perucho, P. Cao, E. Y. P. Lee // *European Radiology*. – 2021. – Vol. 31, № 7. – P. 5050–5058. – DOI: 10.1007/s00330-020-07565-3.

48. Andrėkutė, K. Automatic differential diagnosis of melanocytic skin tumors using ultrasound data / K. Andrėkutė, G. Linkevičiūtė, R. Raišutis [et al.] // *Ultrasound Med. Biol*. – 2016. – Vol. 42, № 12. – P. 2834–2843. – DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2016.07.026.

49. Arimura, H. Potentials of radiomics for cancer diagnosis and treatment in comparison with computer-aided diagnosis / H. Arimura, M. Soufi, K. Ninomiya [et al.] // *Radiol. Phys. Technol.* – 2018. – Vol. 11, № 4. – P. 365–374. – DOI: 10.1007/s12194-018-0486-x.
50. Auger, J.D. Trabecular Architecture and Mechanical Heterogeneity Effects on Vertebral Body Strength / J.D. Auger, N. Frings, Y. Wu, A.G. Marty, E.F. Morgan // *Curr. Osteoporos Rep.* – 2020. – T. 18, № 6. – C. 716–726. – DOI: 10.1007/s11914-020-00640-0.
51. Avanzo M. Radiomics and deep learning in lung cancer / M. Avanzo, J. Stancanello, G. Pirrone, G. Sartor // *Strahlentherapie und Onkologie.* – 2020. – Vol. 196, № 10. – P. 879–887. – DOI: 10.1007/s00066-020-01625-9.
52. Avanzo, M. Beyond imaging: the promise of radiomics / M. Avanzo, J. Stancanello, I. El Naqa // *Phys. Med.* – 2017. – Vol. 38. – P. 122–139. – DOI: 10.1016/j.ejmp.2017.05.071.
53. Baessler, B. Cardiac MRI and texture analysis of myocardial T1 and T2 maps in myocarditis with acute versus chronic symptoms of heart failure / B. Baessler, C. Luecke, J. Lurz, K. Klingel, A. Das, M. von Roeder [et al.] // *Radiology.* – 2019. – Vol. 292, № 3. – P. 608–617. – DOI: 10.1148/radiol.2019190101.
54. Baessler, B. Robustness and reproducibility of radiomics in magnetic resonance imaging: a phantom study / B. Baessler, K. Weiss, D. Pinto Dos Santos // *Invest. Radiol.* – 2019. – Apr, Vol. 54, № 4. – P. 221–228. – DOI: 10.1097/RLI.0000000000000530. – PMID: 30433891.
55. Baessler, B. Texture analysis and machine learning of noncontrast T1-weighted MR images in patients with hypertrophic cardiomyopathy – Preliminary results / B. Baessler, M. Mannil, D. Maintz, H. Alkadhi, R. Manka // *European Journal of Radiology.* – 2018. – Vol. 102. – P. 61–67. – DOI: 10.1016/j.ejrad.2018.03.013.
56. Balagurunathan, Y. Reproducibility and prognosis of quantitative features extracted from CT images / Y. Balagurunathan, Y. Gu, H. Wang [et al.] // *Transl. Oncol.* – 2014. – Vol. 7, № 1. – P. 72–87.

57. Barat, M. CT and MRI of Gastrointestinal Stromal Tumors: New Trends and Perspectives / M. Barat, A. Pellat, A. Dohan, C. Hoeffel, R. Coriat, P. Soyer // *Canadian Association of Radiologists Journal*. – 2024. – Vol. 75, no. 1. – P. 107–117. – DOI: 10.1177/08465371231180510.

58. Barioni, E. D. Texture Analysis in Volumetric Imaging for Dentomaxillofacial Radiology: Transforming Diagnostic Approaches and Future Directions / E. D. Barioni, S. L. P. C. Lopes, P. R. Silvestre, C. L. Yasuda, A. L. F. Costa // *Journal of Imaging*. – 2024. – Vol. 10, № 11. – Art. 263. – DOI: 10.3390/jimaging10110263. – PMID: 39590727; PMCID: PMC11595357.

59. Bashir, U. Imaging heterogeneity in lung cancer: techniques, applications, and challenges / U. Bashir, M. M. Siddique, E. Mclean [et al.] // *AJR Am. J. Roentgenol.* – 2016. – Vol. 207, № 3. – P. 534–543. – DOI: 10.2214/ajr.15.15864.

60. Bassingthwaighe, J. B. The mechanical and metabolic basis of myocardial blood flow heterogeneity / J. B. Bassingthwaighe, D. A. Beard, Z. Li // *Basic Res. Cardiol.* – 2001. – Vol. 96. – P. 582–594. – DOI: 10.1007/s00395-001-0335-7.

61. Bayat N. Radiographic texture analysis of the hard tissue changes following socket preservation with allograft and xenograft materials for dental implantation: a randomized clinical trial / N. Bayat, M. A. Ghavimi, K. Rahimpour, S. Razi, F. Esmaili // *Oral and Maxillofacial Surgery*. – 2024. – Vol. 28, no. 2. – P. 705–713. – DOI: 10.1007/s10006-023-01193-z.

62. Bedard, P. L. Tumour heterogeneity in the clinic / P. L. Bedard, A. R. Hansen, M. J. Ratain [et al.] // *Nature*. – 2013. – Vol. 501, № 7467. – P. 355–364. – DOI: 10.1038/nature12627.

63. Bettinelli, A. Technical note: an IBEX adaption toward image biomarker standardization / A. Bettinelli, M. Branchini, F. De Monte [et al.] // *Med. Phys.* – 2020. – Vol. 47, № 3. – P. 1167–1173. – DOI: 10.1002/mp.13956.

64. Bicci, E. Role of Texture Analysis in Oropharyngeal Carcinoma: A Systematic Review of the Literature / E. Bicci, C. Nardi, L. Calamandrei, M.

Pietragalla, E. Cavigli, F. Mungai, L. Bonasera, V. Miele // *Cancers*. – 2022. – Vol. 14, № 10. – Art. 2445. – DOI: 10.3390/cancers14102445.

65. Bonjour, J.P. Peak bone mass / J. P. Bonjour, G. Theintz, B. Buchs // *Osteoporosis International*. – 1994. – T. 4. – C. 7–13. – DOI: 10.1007/BF01623429.

66. Buch K. Quantitative variations in texture analysis features dependent on MRI scanning parameters: A phantom model / K. Buch, H. Kuno, M. M. Qureshi, B. Li, O. Sakai // *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. – 2018. – Vol. 19, № 6. – P. 253–264. – DOI: 10.1002/acm2.12482.

67. Burian, E. Texture analysis of vertebral bone marrow using chemical shift encoding-based water-fat MRI: a feasibility study / E. Burian, K. Subburaj, M. R. K. Mookiah, A. Rohrmeier, D. M. Hedderich, M. Dieckmeyer [et al.] // *Osteoporosis International*. – 2019. – Vol. 30, № 6. – P. 1265–1274. – DOI: 10.1007/s00198-019-04924-9.

68. Buvat, I. Tumor texture analysis in PET: where do we stand? / I. Buvat, F. Orhac, M. Soussan // *J. Nucl. Med.* – 2015. – Vol. 56, № 11. – P. 1642–1644. – DOI: 10.2967/jnumed.115.163469.

69. Castellano, G. Texture analysis of medical images / G. Castellano, L. Bonilha, L. M. Li [et al.] // *Clin. Radiol.* – 2004. – Dec, Vol. 59, № 12. – P. 1061–1069. – DOI: 10.1016/j.crad.2004.07.008. – PMID: 15556588.

70. Chaddad, A. Radiomics in glioblastoma: current status and challenges facing clinical implementation / A. Chaddad, M. J. Kucharczyk, D. P. Daniel [et al.] // *Front Oncol.* – 2019. – Vol. 9. – P. 374. – DOI: 10.3389/fonc.2019.00374.

71. Chang, S. Quality of science and reporting for radiomics in cardiac magnetic resonance imaging studies: a systematic review / S. Chang, K. Han, Y. J. Suh, B. W. Choi // *European Radiology*. – 2022. – Vol. 32, № 7. – P. 4361–4373. – DOI: 10.1007/s00330-022-08587-9.

72. Chen B. Myocardial extracellular volume fraction radiomics analysis for differentiation of reversible versus irreversible myocardial damage and prediction of left ventricular adverse remodeling after ST-elevation myocardial infarction / B. Chen,

D. An, J. He, C.-W. Wu, T. Yue, R. Wu [et al.] // *European Radiology*. – 2021. – Vol. 31. – P. 504–514. – DOI: 10.1007/s00330-020-07117-9.

73. Chen, W. Radiomics Analysis of Contrast-Enhanced CT for Hepatocellular Carcinoma Grading / W. Chen, T. Zhang, L. Xu, L. Zhao, H. Liu, L. R. Gu [et al.] // *Frontiers in Oncology*. – 2021. – Vol. 11. – Art. 660509. – DOI: 10.3389/fonc.2021.660509.

74. Chung, R. Interreader Concordance of the TI-RADS: Impact of Radiologist Experience / R. Chung, A. B. Rosenkrantz, G. L. Bennett, B. Dane, J. E. Jacobs, C. Slywotzky, P. N. Smereka, A. Tong, S. Sheth // *American Journal of Roentgenology*. – 2020. – Vol. 214, № 5. – P. 1158–1164. – DOI: 10.2214/AJR.19.21913.

75. Cilengir A. H. The diagnostic value of magnetic resonance imaging-based texture analysis in differentiating enchondroma and chondrosarcoma / A. H. Cilengir, S. Evrimler, T. A. Serel, E. Uluc, O. Tosun // *Skeletal Radiology*. – 2023. – T. 52, № 5. – C. 1039–1049. – DOI: 10.1007/s00256-022-04242-y.

76. Corrias G. Texture analysis imaging "what a clinical radiologist needs to know" / G. Corrias, G. Micheletti, L. Barberini, J. S. Suri, L. Saba // *European Journal of Radiology*. – 2022. – Vol. 146. – Art. 110055. – DOI: 10.1016/j.ejrad.2021.110055.

77. Crimi F. Diagnostic Accuracy of CT Texture Analysis in Adrenal Masses: A Systematic Review / F. Crimi, E. Quaia, G. Cabrelle, C. Zanon, A. Pepe, D. Regazzo, I. Tizianel, C. Scaroni, F. Ceccato // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2022. – T. 23, № 2. – Cт. 637. – DOI: 10.3390/ijms23020637.

78. Di Noto, T. Radiomics for distinguishing myocardial infarction from myocarditis at late gadolinium enhancement at MRI: Comparison with subjective visual analysis / T. Di Noto, J. von Spiczak, M. Mannil, E. Gantert, P. Soda, R. Manka [et al.] // *Radiology: Cardiothoracic Imaging*. – 2019. – Vol. 1, № 5. – Art. e180026. – DOI: 10.1148/ryct.2019180026.

79. Dieckmeyer, M. Vertebral bone marrow heterogeneity using texture analysis of chemical shift encoding-based MRI: variations in age, sex, and anatomical location / M. Dieckmeyer, D. Junker, S. Ruschke, M. R. K. Mookiah, K. Subburaj, E.

Burian, N. Sollmann, J. S. Kirschke, D. C. Karampinos, T. Baum // *Frontiers in Endocrinology*. – 2020. – Vol. 11. – Art. 555931. – DOI: 10.3389/fendo.2020.555931.

80. Eftestøl, T. Texture analysis to assess risk of serious arrhythmias after myocardial infarction / T. Eftestøl, L. Woie, K. Engan, J. T. Kvaløy, D. W. Nilsen, S. Ørn // *Computing in Cardiology*, 2012. – Kraków, Poland, 2012. – P. 365–368. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6420406> (дата обращения: 06.07.2023).

81. Fazzalari, N.L. Intervertebral disc disorganisation and its relationship to age adjusted vertebral body morphometry and vertebral bone architecture / N.L. Fazzalari, B. Manthey, I.H. Parkinson // *The Anatomical Record*. – 2001. – Т. 262. – С. 331–339. – DOI: 10.1002/1097-0185(20010301)262:3<3>.

82. Feng, M. Texture analysis of MR images to identify the differentiated degree in hepatocellular carcinoma: a retrospective study / M. Feng, M. Zhang, Y. Liu, N. Jiang, Q. Meng, J. Wang [et al.] // *BMC Cancer*. – 2020. – Vol. 20, № 1. – Art. 611. – DOI: 10.1186/s12885-020-07094-8.

83. Feng, Q. MRI Radiomics classification and prediction in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment: A review / Q. Feng, Z. Ding // *Current Alzheimer Research*. – 2020. – Vol. 17, № 3. – P. 297–309. – DOI: 10.2174/1567205017666200303105016.

84. Ferdeghini E. M. Quantitative texture analysis in echocardiography: application to the diagnosis of myocarditis / E. M. Ferdeghini, B. Pinamonti, E. Picano, F. Lattanzi, R. Bussani, G. Slavich [et al.] // *Journal of Clinical Ultrasound*. – 1991. – Vol. 19, № 5. – P. 263–270. – DOI: 10.1002/jcu.1870190503.

85. Fiscone, C. Dataset for multiparametric MRI enabling extraction and analysis of susceptibility-based radiomic features / C. Fiscone, G. Siginolfi, D. N. Manners [et al.] // *Sci Data*. – 2024. – June, Vol. 11, № 1. – P. 575. – DOI: 10.1038/s41597-024-03418-6. – PMID: 38834674. – PMCID: PMC11150520.

86. Fiscone, C. Multiparametric MRI dataset for susceptibility-based radiomic feature extraction and analysis / C. Fiscone, G. Sighinolfi, D. N. Manners [et al.] // *Sci*

Data. – 2024. – June, Vol. 11, № 1. – P. 575. – DOI: 10.1038/s41597-024-03418-6. – PMID: 38834674. – PMCID: PMC11150520.

87. Florez E. Emergence of radiomics: Novel methodology identifying imaging biomarkers of disease in diagnosis, response, and progression / E. Florez, A. Fatemi, P. P. Claudio, C. M. Howard // *SM Journal of Clinical Medical Imaging*. – 2018. – Vol. 4, № 1. – Art. 1019.

88. Gabrys, E. Blood flow simulation through fractal models of circulatory system / E. Gabrys, M. Rybaczuk, A. Kedzia // *Chaos Solitons Fractals*. – 2006. – Vol. 27. – P. 1–7.

89. Galavis, P. E. Variability of textural features in FDG PET images due to different acquisition modes and reconstruction parameters / P. E. Galavis, C. Hollensen, N. Jallow [et al.] // *Acta Oncol.* – 2010. – Vol. 49, № 7. – P. 1012–1016. – DOI: 10.3109/0284186X.2010.498437.

90. Ganeshan, B. Quantifying tumour heterogeneity with CT / B. Ganeshan, K. A. Miles // *Cancer Imaging*. – 2013. – Vol. 13, № 1. – P. 140–149. – DOI: 10.1102/1470-7330.2013.0015.

91. Gardin, I. Radiomics: principles and radiotherapy applications / I. Gardin, V. Grégoire, D. Gibon [et al.] // *Crit. Rev. Oncol. Hematol.* – 2019. – Vol. 138. – P. 44–50. – DOI: 10.1016/j.critrevonc.2019.03.015.

92. Ger, R. B. Guidelines and experience using imaging biomarker explorer (IBEX) for radiomics / R. B. Ger, C. E. Cardenas, B. M. Anderson [et al.] // *J. Vis. Exp.* – 2018. – Vol. 131. – P. 57132. – DOI: 10.3791/57132.

93. Ghanem, N. Whole-body MRI in comparison to skeletal scintigraphy in detection of skeletal metastases in patients with solid tumors / N. Ghanem, C. Althoefer, T. Kelly [et al.] // *In Vivo*. – 2006. – Vol. 20. – P. 173–182.

94. Giganti, F. Gastric cancer: texture analysis from multidetector computed tomography as a potential preoperative prognostic biomarker / F. Giganti, S. Antunes, A. Salerno [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2017. – Vol. 27, № 5. – P. 1831–1839. – DOI: 10.1007/s00330-016-4540-y.

95. Gilsanz, V. Sexual dimorphism and the origins of human spinal health / V. Gilsanz, T. A. L. Wren, S. Ponrartana, S. Mora, C. J. Rosen // *Endocrine Reviews*. – 2018. – Vol. 39, № 2. – P. 221–239. – DOI: 10.1210/er.2017-00147.
96. Gong, H. Apparent- and Tissue-Level Yield Behaviors of L4 Vertebral Trabecular Bone and Their Associations with Microarchitectures / H. Gong, L. Wang, Y. Fan [и др.] // *Ann. Biomed Eng.* – 2016. – Т. 44. – С. 1204–1223. – DOI: 10.1007/s10439-015-1368-6.
97. Greco, F. Radiogenomics and Texture Analysis to Detect von Hippel-Lindau (VHL) Mutation in Clear Cell Renal Cell Carcinoma / F. Greco, V. D’Andrea, B. Beomonte Zobel, C. A. Mallio // *Current Issues in Molecular Biology*. – 2024. – Vol. 46, № 4. – P. 3236–3250. – DOI: 10.3390/cimb46040203.
98. Grimm, L. J. Computational approach to radiogenomics of breast cancer: luminal A and luminal B molecular subtypes are associated with imaging features on routine breast MRI extracted using computer vision algorithms / L. J. Grimm, J. Zhang, M. A. Mazurowski // *J. Magn. Reson. Imaging*. – 2015. – Vol. 42, № 4. – P. 902–907.
99. Groves, A. M. Can 16-detector multislice CT exclude skeletal lesions during tumour staging? Implications for the cancer patient / A. M. Groves, C. J. Beadsmoore, H. K. Cheow [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2006. – Vol. 16. – P. 1066–1073.
100. Gu, Z.-Y. Fractal analysis of left ventricular trabeculae in heart failure with preserved ejection fraction patients with multivessel coronary artery disease / Z.-Y. Gu, B.-H. Chen, L. Zhao, D.-A. An, C.-W. Wu, S. Xue, W.-B. Chen, S. Huang, Y.-Y. Wang, L.-M. Wu // *Insights into Imaging*. – 2024. – Vol. 15. – Art. 148. – DOI: 10.1186/s13244-024-01730-8.
101. Guezennec, C. Inter-observer and segmentation method variability of textural analysis in pre-therapeutic FDG PET/CT in head and neck cancer / C. Guezennec, D. Bourhis, F. Orhac [et al.] // *PLoS One*. – 2019. – Vol. 14, № 3. – P. e0214299. – DOI: 10.1371/journal.pone.0214299.

102. Guo, C. Textural analysis on contrast-enhanced CT in pancreatic neuroendocrine neoplasms: association with WHO grade / C. Guo, X. Zhuge, Z. Wang [et al.] // *Abdom. Radiol.* – 2019. – Vol. 44, № 2. – P. 576–585.

103. Guo, J. MR-based radiomics signature in differentiating ocular adnexal lymphoma from idiopathic orbital inflammation / J. Guo, Z. Liu, C. Shen [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2018. – Vol. 28, № 9. – P. 3872–3881. – DOI: 10.1007/s00330-018-5381-7.

104. Han, C. Prevalence of Modic changes in the lumbar vertebrae and their associations with workload, smoking and weight in northern China / C. Han, M. J. Kuang, J. X. Ma, X. L. Ma // *Scientific. Reports.* – 2017. – Vol. 7. – Art. 46341. – DOI: 10.1038/srep46341.

105. Hassani, C. Myocardial radiomics in cardiac MRI / C. Hassani, F. Saremi, B. A. Varghese, V. Duddalwar // *American Journal of Roentgenology.* – 2020. – Vol. 214, № 3. – P. 536–545. – DOI: 10.2214/AJR.19.21986.

106. Hrouda, D. The role of angiogenesis in prostate development and the pathogenesis of prostate cancer / D. Hrouda, D. L. Nicol, R. A. Gardiner // *Urol. Res.* – 2003. – Vol. 30. – P. 347–355. – DOI: 10.1007/s00240-002-0287-9.

107. Hu, G. Q. Predicting coronary artery calcified plaques using perivascular fat CT radiomics features and clinical risk factors / G. Q. Hu, Y. Q. Ge, X. K. Hu, W. Wei // *BMC Medical. Imaging.* – 2022. – Vol. 22, № 1. – Art. 134. – DOI: 10.1186/s12880-022-00858-7.

108. Hu, H. T. CT-based radiomics for preoperative prediction of early recurrent hepatocellular carcinoma: technical reproducibility of acquisition and scanners / H. T. Hu, Q. Y. Shan, S. L. Chen, B. Li, S. T. Feng, E. J. Xu [et al.] // *La Radiologia Medica.* – 2020. – Vol. 125, № 8. – P. 697–705. – DOI: 10.1007/s11547-020-01174-2.

109. Huang, Y. Q. Development and validation of a radiomics nomogram for preoperative prediction of lymph node metastasis in colorectal cancer / Y. Q. Huang, C. H. Liang, L. He [et al.] // *J. Clin. Oncol.* – 2016. – Vol. 34, № 18. – P. 2157–2164. – DOI: 10.1200/JCO.2015.65.9128.

110. Ibrahim, A. Radiomics for precision medicine: current challenges, future prospects, and the proposal of a new framework / A. Ibrahim, S. Primakov, M. Beuque [et al.] // *Methods*. – 2020. – Article no. S1046-2023(20)30111-0. – DOI: 10.1016/j.ymeth.2020.05.022.

111. Izquierdo C. Radiomics-based classification of left ventricular non-compaction, hypertrophic cardiomyopathy, and dilated cardiomyopathy in cardiovascular magnetic resonance / C. Izquierdo, G. Casas, C. Martin-Isla, V. M. Campello, A. Guala, P. Gkontra [et al.] // *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. – 2021. – Vol. 8. – Art. 764312. – DOI: 10.3389/fcvm.2021.764312.

112. Jan Y. K. Texture Analysis in Musculoskeletal Ultrasonography: A Systematic Review / Y. K. Jan, I. Y. Hung, W. C. Cheung // *Diagnostics*. – 2025. – Vol. 15, № 5. – Art. 524. – DOI: 10.3390/diagnostics15050524.

113. Jang J. Reproducibility of segmentation-based myocardial radiomic features with cardiac MRI / J. Jang, L. H. Ngo, J. Mancio, S. Kucukseymen, J. Rodriguez, P. Pierce [et al.] // *Radiology: Cardiothoracic Imaging*. – 2020. – Vol. 2, № 3. – Art. e190216. – DOI: 10.1148/ryct.2020190216.

114. Jayalalitha, G. Fractal model for blood flow in cardiovascular system / G. Jayalalitha, V. Shantoshini Deviha, R. Uthayakumar // *Comput. Biol. Med.* – 2008. – Vol. 38. – P. 684–693.

115. Jolliffe I. Principal component analysis / I. Jolliffe // *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*. – Chichester: Wiley, 2005. – P. 501. – (Wiley StatsRef: Statistics Reference Online). – DOI: 10.1002/0470013192.bsa501.

116. Kagiya, N. A low-cost texture-based pipeline for predicting myocardial tissue remodeling and fibrosis using cardiac ultrasound / N. Kagiya, S. Shrestha, J. S. Cho, M. Khalil, Y. Singh, A. Challa [et al.] // *EBioMedicine*. – 2020. – Vol. 54. – Art. 102726. – DOI: 10.1016/j.ebiom.2020.102726

117. Karampinos, D. C. Quantitative MRI and spectroscopy of bone marrow / D. C. Karampinos, S. Ruschke, M. Dieckmeyer, M. Diefenbach, D. Franz, A. S. Gersing [et al.] // *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. – 2018. – Vol. 47, № 2. – P. 332–353. – DOI: 10.1002/jmri.25769.

118. Kassab, G. S. Scaling laws of vascular trees: of form and function / G. S. Kassab // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* – 2006. – Vol. 290. – P. H894–H903. – DOI: 10.1152/ajpheart.00579.2005.

119. Koçak, B. Radiomics with artificial intelligence: a practical guide for beginners / B. Koçak, E. Ş. Durmaz, E. Ateş [et al.] // *Diagn. Interv. Radiol.* – 2019. – Vol. 25, № 6. – P. 485–495. – DOI: 10.5152/dir.2019.19321.

120. Koda, E. CT texture analysis of mediastinal lymphadenopathy: combining with US-based elastographic parameter and discrimination between sarcoidosis and lymph node metastasis from small cell lung cancer / E. Koda, T. Yamashiro, R. Onoe [et al.] // *PLoS ONE.* – 2020. – Vol. 15, № 12. – Art. e0243181. – DOI: 10.1371/journal.pone.0243181.

121. Kuo, T. R. Bone biomarker for the clinical assessment of osteoporosis: recent developments and future perspectives / T. R. Kuo, C. H. Chen // *Biomark Res.* – 2017. – Vol. 5. – P. 18. – DOI: 10.1186/s40364-017-0097-4.

122. Kwok, A.W. Morphological changes of lumbar vertebral bodies and intervertebral discs associated with decrease in bone mineral density of the spine: a cross-sectional study in elderly subjects / A.W. Kwok, Y.X. Wang, J.F. Griffith [и др.] // *Spine (Phila Pa 1976).* – 2012. – T. 37, № 23. – C. E1415–E1421. – DOI: 10.1097/BRS.0b013e31826f561e.

123. Lambin, P. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis / P. Lambin, E. Rios-Velazquez, R. Leijenaar [et al.] // *Eur. J. Cancer.* – 2012. – Mar, Vol. 48, № 4. – P. 441–446. – DOI: 10.1016/j.ejca.2011.11.036.

124. Lambin, P. Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine / P. Lambin, R. T. Leijenaar, T. M. Deist [et al.] // *Nat Rev. Clin. Oncol.* – 2017. – Vol. 14, № 12. – P. 749–762. – DOI: 10.1038/nrclinonc.2017.141.

125. Langer, D. L. Intermixed normal tissue within prostate cancer: effect on MR imaging measurements of apparent diffusion coefficient and T2 – sparse versus

dense cancers / D. L. Langer, T. H. van der Kwast, A. J. Evans [et al.] // *Radiology*. – 2008. – Vol. 249. – P. 900–908. – DOI: 10.1148/radiol.2493080236.

126. Larroza, A. Texture analysis of cardiac cine magnetic resonance imaging to detect nonviable segments in patients with chronic myocardial infarction / A. Larroza, M. P. López-Lereu, J. V. Monmeneu, J. Gavara, F. J. Chorro, V. Bodí [et al.] // *Medical Physics*. – 2018. – Vol. 45, № 4. – P. 1471–1480. – DOI: 10.1002/mp.12783.

127. Lattanzi, F. Quantitative texture analysis in two-dimensional echocardiography: Application to the diagnosis of myocardial hemochromatosis / F. Lattanzi, P. Bellotti, E. Picano, F. Chiarella, M. Paterni, G. Forni [et al.] // *Echocardiography*. – 1996. – Vol. 13, № 1. – P. 9–20. – DOI: 10.1111/j.1540-8175.1996.tb00863.x.

128. Leijenaar, R. T. H. Stability of FDG-PET radiomics features: an integrated analysis of test-retest and inter-observer variability / R. T. H. Leijenaar, S. Carvalho, E. R. Velazquez [et al.] // *Acta Oncol*. – 2013. – Vol. 52, № 7. – P. 1391–1397. – DOI: 10.3109/0284186X.2013.812798.

129. Leiner, T. Radiomics in cardiac MRI: Sisyphean struggle or close to the summit of Olympus? / T. Leiner // *Radiology: Cardiothoracic Imaging*. – 2020. – Vol. 2, № 3. – Art. e200244. – DOI: 10.1148/ryct.2020200244

130. Lespessailles, E. Assessment of bone mineral density and radiographic texture analysis at the tibial subchondral bone / E. Lespessailles, R. Jennane // *Osteoporosis International*. – 2012. – Vol. 23, № 8. – P. 871–876. – DOI: 10.1007/s00198-012-2167-7.

131. Li, L. Radiomic features of plaques derived from coronary CT angiography to identify hemodynamically significant coronary stenosis, using invasive FFR as the reference standard / L. Li, X. Hu, X. Tao, X. Shi, W. Zhou, H. Hu // *European Journal of Radiology*. – 2021. – Vol. 140. – Art. 109769. – DOI: 10.1016/j.ejrad.2021.109769.

132. Liang, W. Differentiating Hepatic Epithelioid Angiomyolipoma From Hepatocellular Carcinoma and Focal Nodular Hyperplasia via Radiomics Models / W.

Liang, J. Shao, W. Liu, S. Ruan, W. Tian, X. Zhang [et al.] // *Frontiers in Oncology*. – 2020. – Vol. 10. – Art. 564307. – DOI: 10.3389/fonc.2020.564307.

133. Limkin, E. J. Promises and challenges for the implementation of computational medical imaging (radiomics) in oncology / E. J. Limkin, R. Sun, L. Dercle [et al.] // *Ann. Oncol.* – 2017. – Vol. 28, № 6. – P. 1191–1206. – DOI: 10.1093/annonc/mdx034.

134. Lisson, C. S. Diagnostic value of MRI-based 3D texture analysis for tissue characterisation and discrimination of low-grade chondrosarcoma from enchondroma: a pilot study / C. S. Lisson, C. G. Lisson, K. Flosdorf, R. Mayer-Steinacker, M. Schultheiss, A. von Baer [et al.] // *European Radiology*. – 2018. – Vol. 28, № 2. – P. 468–477. – DOI: 10.1007/s00330-017-5014-6.

135. Litvin, A. A. Radiomics and digital image texture analysis in oncology (review) / A. A. Litvin, D. A. Burkin, A. A. Kropinov, F. N. Paramzin // *Modern Technologies in Medicine*. – 2021. – Vol. 13, № 2. – P. 97–106. – DOI: 10.17691/stm2021.13.2.11.

136. Liu, X. Can machine learning radiomics provide pre-operative differentiation of combined hepatocellular cholangiocarcinoma from hepatocellular carcinoma and cholangiocarcinoma to inform optimal treatment planning? / X. Liu, F. Khalvati, K. Namdar, S. Fischer, S. Lewis, B. Taouli [et al.] // *European Radiology*. – 2021. – Vol. 31, № 1. – P. 244–255. – DOI: 10.1007/s00330-020-07119-7.

137. Liu, Z. Radiomics analysis allows for precise prediction of epilepsy in patients with low-grade gliomas / Z. Liu, Y. Wang, X. Liu [et al.] // *Neuroimage Clin.* – 2018. – Vol. 19. – P. 271–278. – DOI: 10.1016/j.nicl.2018.04.024.

138. Liu, Z. Radiomics analysis for evaluation of pathological complete response to neoadjuvant chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer / Z. Liu, X. Y. Zhang, Y. J. Shi [et al.] // *Clin. Cancer Res.* – 2017. – Vol. 23, № 23. – P. 7253–7262. – DOI: 10.1158/1078-0432.CCR-17-1038.

139. Liu, Z. The applications of radiomics in precision diagnosis and treatment of oncology: opportunities and challenges / Z. Liu, S. Wang, D. Dong [et al.] // *Theranostics*. – 2019. – Vol. 9, № 5. – P. 1303–1322. – DOI: 10.7150/thno.30309.

140. Lubner, M. G. CT texture analysis: definitions, applications, biologic correlates, and challenges / M. G. Lubner, A. D. Smith, K. Sandrasegaran [et al.] // *Radiographics*. – 2017. – Vol. 37, № 5. – P. 1483–1503. – DOI: 10.1148/rg.2017170056.

141. Mackay, J. W. Association of subchondral bone texture on magnetic resonance imaging with radiographic knee osteoarthritis progression: data from the Osteoarthritis Initiative Bone Ancillary Study / J. W. Mackay, G. Kapoor, J. B. Driban, G. H. Lo // *European Radiology*. – 2018. – Vol. 28, № 11. – P. 4687–4695. – DOI: 10.1007/s00330-018-5449-9.

142. Mackin, D. Measuring computed tomography scanner variability of radiomics features / D. Mackin, X. Fave, L. Zhang [et al.] // *Invest. Radiol*. – 2015. – Vol. 50, № 11. – P. 757–765. – DOI: 10.1097/RLI.0000000000000180.

143. Mannil, M. Texture analysis of paraspinal musculature in MRI of the lumbar spine: analysis of the lumbar stenosis outcome study (LSOS) data / M. Mannil, J. M. Burgstaller, A. Thanabalasingam, S. Winklhofer, M. Betz, U. Held [et al.] // *Skeletal Radiology*. – 2018. – Vol. 47, № 7. – P. 947–954. – DOI: 10.1007/s00256-018-2919-3.

144. Masokano, I. B. The application of texture quantification in hepatocellular carcinoma using CT and MRI: a review of perspectives and challenges / I. B. Masokano, W. Liu, S. Yie [et al.] // *Cancer Imaging*. – 2020. – Vol. 20, № 1. – Art. 67. – DOI: 10.1186/s40644-020-00341-y.

145. Mazurowski, M. A. Radiogenomic analysis of breast cancer: luminal B molecular subtype is associated with enhancement dynamics at MR imaging / M. A. Mazurowski, J. Zhang, L. J. Grimm [et al.] // *Radiology*. – 2014. – Vol. 273, № 2. – P. 365–372. – DOI: 10.1148/radiol.14132442.

146. Meyer, H. J. CT texture analysis – correlations with histopathology parameters in head and neck squamous cell carcinomas / H. J. Meyer, G. Hamerla, A. K. Höhn, A. Surov // *Frontiers in Oncology*. – 2019. – Vol. 9. – Art. 444. – DOI: 10.3389/fonc.2019.00444.

147. Meyer, H. J. CT texture analysis and node-RADS CT score of mediastinal lymph nodes – diagnostic performance in lung cancer patients / H. J. Meyer, B. Schnarkowski, J. Pappisch [et al.] // *Cancer Imaging*. – 2022. – Vol. 22. – Art. 75. – DOI: 10.1186/s40644-022-00506-x.

148. Meyer, H. J. CT texture analysis of pulmonary neuroendocrine tumors – associations with tumor grading and proliferation / H. J. Meyer, J. Leonhardi, A. K. Höhn [et al.] // *Journal of Clinical Medicine*. – 2021. – Vol. 10, № 23. – Art. 5571. – DOI: 10.3390/jcm10235571.

149. Michallek, F. Accuracy of fractal analysis and PIRADS assessment of prostate magnetic resonance imaging for prediction of cancer grade groups: a clinical validation study / F. Michallek, H. Huisman, B. Hamm [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2021. – DOI: 10.1007/s00330-021-08358-y.

150. Michallek, F. Prediction of prostate cancer grade using fractal analysis of perfusion MRI: retrospective proof-of-principle study / F. Michallek, H. Huisman, B. Hamm [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2022. – May, Vol. 32, № 5. – P. 3236–3247. – DOI: 10.1007/s00330-021-08394-8.

151. Michaud, F. Determination of the 3D human spine posture from wearable inertial sensors and a multibody model of the spine / F. Michaud, U. Lugrís, J. Cuadrado // *Sensors (Basel)*. – 2022. – Vol. 22, № 13. – P. 4796. – DOI: 10.3390/s22134796.

152. Michallek, F. Prediction of prostate cancer grade using fractal analysis of perfusion MRI: retrospective proof-of-principle study / F. Michallek, H. Huisman, B. Hamm [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2022. – May, Vol. 32, № 5. – P. 3236–3247. – DOI: 10.1007/s00330-021-08394-8.

153. Mirestean, C. C. Radiomic machine learning and texture analysis – new horizons for head and neck oncology / C. C. Mirestean, O. Pagute, C. Buzea [et al.] // *Maedica (Bucur)*. – 2019. – Vol. 14, № 2. – P. 126–130.

154. Naderi, S. History of spine biomechanics: part I-the pre-Greco-Roman, Greco-Roman, and medieval roots of spine biomechanics / S. Naderi, N. Andalkar,

E.C. Benzel // *Neurosurgery*. – 2007. – Vol. 60. – №2. – P. 382–391. DOI: 10.1227/01.NEU.0000249276.94933.8D.

155. Neri, E. Radiomics and liquid biopsy in oncology: the holons of systems medicine / E. Neri, M. Del Re, F. Paiar [et al.] // *Insights Imaging*. – 2018. – Vol. 9, № 6. – P. 915–924. – DOI: 10.1007/s13244-018-0657-7.

156. Ng, F. Assessment of tumor heterogeneity by CT texture analysis: can the largest cross-sectional area be used as an alternative to whole tumor analysis? / F. Ng, R. Kozarski, B. Ganeshan [et al.] // *Eur. J. Radiol.* – 2013. – Vol. 82, № 2. – P. 342–348. – DOI: 10.1016/j.ejrad.2012.10.023.

157. Nie, P. A CT-based radiomics nomogram for differentiation of focal nodular hyperplasia from hepatocellular carcinoma in the non-cirrhotic liver / P. Nie, G. Yang, J. Guo, J. Chen, X. Li, Q. Ji [et al.] // *Cancer Imaging*. – 2020. – Vol. 20, № 1. – Art. 20. – DOI: 10.1186/s40644-020-00297-z.

158. Nie, P. CT-Based Radiomics Nomogram: A Potential Tool for Differentiating Hepatocellular Adenoma From Hepatocellular Carcinoma in the Noncirrhotic Liver / P. Nie, N. Wang, J. Pang, G. Yang, S. Duan, J. Chen [et al.] // *Academic. Radiology*. – 2021. – Vol. 28, № 6. – P. 799–807. – DOI: 10.1016/j.acra.2020.04.027.

159. Nioche, C. LIFEx: a freeware for radiomic feature calculation in multimodality imaging to accelerate advances in the characterization of tumor heterogeneity / C. Nioche, F. Orlhac, S. Boughdad [et al.] // *Cancer Res.* – 2018. – Vol. 78, № 16. – P. 4786–4789. – DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-18-0125.

160. Oliver, J. A. Variability of image features computed from conventional and respiratory-gated PET/CT images of lung cancer / J. A. Oliver, M. Budzevich, G. G. Zhang [et al.] // *Transl. Oncol.* – 2015. – Vol. 8, № 6. – P. 524–534. – DOI: 10.1016/j.tranon.2015.11.013.

161. Oprea-Lager, D. E. Bone Metastases Are Measurable: The Role of Whole-Body MRI and Positron Emission Tomography / D. E. Oprea-Lager, C. F. Cysouw, R. Boellaard [et al.] // *Frontiers in Oncology*. – 2021. – Vol. 11. – Art. 772530. – DOI: 10.3389/fonc.2021.772530.

162. Oravec D., Kim W., Flynn M. J, Yeni Y.N. The relationship of whole human vertebral body creep to bone density and texture via clinically available imaging modalities // *J. Biomech.* – 2022. – N. 135. – P. 110-1121. - DOI: 10.1016/j.jbiomech.2022.111021.

163. Özgül, H. A. Diagnostic value of machine learning-based computed tomography texture analysis for differentiating multiple myeloma from osteolytic metastatic bone lesions in the peripheral skeleton / H. A. Özgül, I. B. Akin, U. Mutlu, A. Balci // *Skeletal Radiology.* – 2023. – Vol. 52, № 9. – P. 1845–1854. – DOI: 10.1007/s00256-023-04333-4.

164. Park, S. CT Radiomics-Based Preoperative Survival Prediction in Patients With Pancreatic Ductal Adenocarcinoma / S. Park, J. G. Sham, S. Kawamoto [et al.] // *AJR Am. J. Roentgenol.* – 2021. – Nov, Vol. 217, № 5. – P. 1104–1112. – DOI: 10.2214/AJR.20.23490.

165. Ra, J. C. Diagnostic performance of stomach CT compared with endoscopic ultrasonography in diagnosing gastric subepithelial tumors / J. C. Ra, E. S. Lee, J. B. Lee [et al.] // *Abdominal. Radiology.* – 2017. – Vol. 42, № 2. – P. 442–450. – DOI: 10.1007/s00261-016-0906-5.

166. Ramón Y Cajal, S. Clinical implications of intratumor heterogeneity: challenges and opportunities / S. Ramón Y Cajal, M. Sesé, C. Capdevila [et al.] // *J Mol. Med. (Berl).* – 2020. – Vol. 98, № 2. – P. 161–177. – DOI: 10.1007/s00109-020-01874-2.

167. Reymond, P. Validation of a one-dimensional model of the systemic arterial tree / P. Reymond, F. Merenda, F. Perren [et al.] // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* – 2009. – Vol. 297, № 1. – P. H202–H218.

168. Rios Velazquez, E. Somatic mutations drive distinct imaging phenotypes in lung cancer / E. Rios Velazquez, C. Parmar, Y. Liu [et al.] // *Cancer Res.* – 2017. – Vol. 77, № 14. – P. 3922–3930. – DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-17-0122.

169. Ryan, L. Breast Cancer Detection Using Infrared Thermography: A Survey of Texture Analysis and Machine Learning Approaches / L. Ryan, S. Agaian //

Bioengineering. – 2025. – Vol. 12, no. 6. – Art. 639. – DOI: 10.3390/bioengineering12060639.

170. Schmidt, G. P. Whole-body imaging of the musculoskeletal system: the value of MR imaging / G. P. Schmidt, M. F. Reiser, A. Baur-Melnyk // *Skeletal Radiol.* – 2007. – Vol. 36. – P. 1109–1119.

171. Shafiq-Ul-Hassan, M. Intrinsic dependencies of CT radiomic features on voxel size and number of gray levels / M. Shafiq-Ul-Hassan, G. G. Zhang, K. Latifi [et al.] // *Med. Phys.* – 2017. – Mar, Vol. 44, № 3. – P. 1050–1062. – DOI: 10.1002/mp.12123. – PMID: 28112418. – PMCID: PMC5462462.

172. Shao, Z. Radiographic changes in the lumbar intervertebral discs and lumbar vertebrae with age / Z. Shao, G. Rompe, M. Schiltenwolf // *Spine (Phila Pa 1976)*. – 2002. – T. 27, № 3. – C. 263–268. – DOI: 10.1097/00007632-200202010-00013.

173. Shen, C. Building CT radiomics based nomogram for preoperative esophageal cancer patients lymph node metastasis prediction / C. Shen, Z. Liu, Z. Wang [et al.] // *Transl. Oncol.* – 2018. – Vol. 11, № 3. – P. 815–824. – DOI: 10.1016/j.tranon.2018.04.005.

174. Shin, S. Y. Quantitative computed tomography texture analysis: can it improve diagnostic accuracy to differentiate malignant lymph nodes? / S. Y. Shin, I. K. Hong, Y. S. Jo // *Cancer Imaging.* – 2019. – Vol. 19. – Art. 25. – DOI: 10.1186/s40644-019-0211-7.

175. Siddique, M. M. The image biomarker standardization initiative: standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping / M. M. Siddique, N. M. Sijtsema, J. Socarras Fernandez [et al.] // *Radiology.* – 2020. – Vol. 295, № 2. – P. 328–338. – DOI: 10.1148/radiol.2020191145.

176. Sollmann, N. Spine Imaging: Novel Image Acquisition Techniques and Analysis Tools / N. Sollmann, T. Baum // *Diagnostics.* – 2022. – Vol. 12, № 6. – Art. 1361. – DOI: 10.3390/diagnostics12061361.

177. Sollmann, N. Texture Analysis Using CT and Chemical Shift Encoding-Based Water-Fat MRI Can Improve Differentiation Between Patients With and

Without Osteoporotic Vertebral Fractures / N. Sollmann, E. A. Becherucci, C. Boehm [et al.] // *Frontiers in Endocrinology*. – 2022. – Vol. 13. – Art. 778537. – DOI: 10.3389/fendo.2021.778537.

178. Song, J. A review of original articles published in the emerging field of radiomics / J. Song, Y. Yin, H. Wang [et al.] // *Eur. J. Radiol.* – 2020. – Vol. 127. – P. 108991. – DOI: 10.1016/j.ejrad.2020.108991.

179. Steinhauer, V. Neuroph and DL4J / V. Steinhauer, L. Steinhauer // *Java Magazine*. – 2021. – № 6. – P. 79–82.

180. Subhawong, T. K. MRI Volumetrics and Image Texture Analysis in Assessing Systemic Treatment Response in Extra-Abdominal Desmoid Fibromatosis / T. K. Subhawong, K. Feister, K. Sweet, N. Alperin, D. Kwon, A. Rosenberg, J. Trent, B. A. Wilky // *Radiology: Imaging Cancer*. – 2021. – Vol. 3, no. 4. – Art. e210016. – DOI: 10.1148/rycan.2021210016.

181. Sudarshan, V. K. Application of wavelet techniques for cancer diagnosis using ultrasound images: a review / V. K. Sudarshan, M. R. Mookiah, U. R. Acharya [et al.] // *Comput. Biol. Med.* – 2016. – Vol. 69. – P. 97–111. – DOI: 10.1016/j.combiomed.2015.12.006.

182. Tang, Z. Identifying the white matter impairments among ART-naïve HIV patients: a multivariate pattern analysis of DTI data / Z. Tang, Z. Liu, R. Li [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2017. – Vol. 27, № 10. – P. 4153–4162. – DOI: 10.1007/s00330-017-4820-1.

183. Taverna, G. Fractal analysis of two-dimensional vascularity in primary prostate cancer and surrounding non-tumoral parenchyma / G. Taverna, P. Colombo, F. Grizzi [et al.] // *Pathol. Res. Pract.* – 2009. – Vol. 205. – P. 438–444. – DOI: 10.1016/j.prp.2008.12.019.

184. Telecan, T. More than Meets the Eye: Using Textural Analysis and Artificial Intelligence as Decision Support Tools in Prostate Cancer Diagnosis – A Systematic Review / T. Telecan // *Journal of Personalized Medicine*. – 2022. – Vol. 12, no. 6. – Art. 983. – DOI: 10.3390/jpm12060983.

185. Tixier, F. Reproducibility of tumor uptake heterogeneity characterization through textural feature analysis in ^{18}F -FDG PET / F. Tixier, M. Hatt, C. C. Le Rest [et al.] // *J. Nucl. Med.* – 2012. – Vol. 53, № 5. – P. 693–700. – DOI: 10.2967/jnumed.111.099127.

186. Tochigi T. Response prediction of neoadjuvant chemoradiation therapy in locally advanced rectal cancer using CT-based fractal dimension analysis / T. Tochigi, S. C. Kamran, A. Parakh, Y. Noda, B. Ganeshan, L. S. Blaszkowsky, D. P. Ryan, J. N. Allen, D. L. Berger, J. Y. Wo, T. S. Hong, A. Kambadakone // *European Radiology.* – 2022. – Vol. 32, no. 4. – P. 2426–2436. – DOI: 10.1007/s00330-021-08303-z.

187. Tomaszewski, M. R. The biological meaning of radiomic features / M. R. Tomaszewski, R. J. Gillies // *Radiology.* – 2021. – Mar, Vol. 298, № 3. – P. 505–516. – DOI: 10.1148/radiol.2021202553.

188. Triggiani S. The Role of Artificial Intelligence and Texture Analysis in Interventional Radiological Treatments of Liver Masses: A Narrative Review / S. Triggiani, M. T. Contaldo, G. Mastellone, M. Cè, A. M. Ierardi, G. Carrafiello, M. Cellina // *Critical Reviews in Oncogenesis.* – 2024. – Vol. 29, № 2. – P. 37–52. – DOI: 10.1615/CritRevOncog.2023049855.

189. Tseng, H. H. Machine learning and imaging informatics in oncology / H. H. Tseng [et al.] // *Oncology.* – 2020. – Vol. 98, № 6. – P. 344–362.

190. Vallières, M. Enhancement of multimodality texture-based prediction models via optimization of PET and MR image acquisition protocols: a proof of concept / M. Vallières, S. Laberge, A. Diamant [et al.] // *Phys. Med. Biol.* – 2017. – Vol. 62, № 22. – P. 8536–8565. – DOI: 10.1088/1361-6560/aa8a49.

191. Van Griethuysen, J. J. M. Computational radiomics system to decode the radiographic phenotype / J. J. M. van Griethuysen, A. Fedorov, C. Parmar [et al.] // *Cancer Res.* – 2017. – Vol. 77, № 21. – P. e104–e107. – DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-17-0339.

192. Van Timmeren, J. E. Radiomics in medical imaging – "how-to" guide and critical reflection / J. E. van Timmeren, D. Cester, S. Tanadini-Lang [et al.] // *Insights*

Imaging. – 2020. – Aug, Vol. 11, № 1. – P. 91. – DOI: 10.1186/s13244-020-00887-2. – PMID: 32785796. – PMCID: PMC7423816.

193. Varghese, B. A. Spatial assessments in texture analysis: what the radiologist needs to know / B. A. Varghese, B. K. K. Fields, D. H. Hwang, V. A. Duddalwar, G. R. Matcuk Jr., S. Y. Cen // *Frontiers in Radiology*. – 2023. – Vol. 3. – Art. 1240544. – DOI: 10.3389/fradi.2023.1240544.

194. Wang, Y. Regional variations in trabecular architecture of the lumbar vertebra: associations with age, disc degeneration and disc space narrowing / Y. Wang, J.S. Owoc, S.K. Boyd // *Bone*. – 2013. – T. 56, № 2. – C. 249–254. – DOI: 10.1016/j.bone.2013.06.022.

195. Weiner S. Vertebrate mineralized tissues: A modular structural analysis / S. Weiner, R. Shahar // *Acta Biomaterialia*. – 2024. – Vol. 179. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.actbio.2024.03.026.

196. Weygand, J. Spatial precision in magnetic resonance imaging-guided radiation therapy: the role of geometric distortion / J. Weygand, C. D. Fuller, G. S. Ibbott [et al.] // *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* – 2016. – Vol. 95, № 4. – P. 1304–1316. – DOI: 10.1016/j.ijrobp.2016.02.059.

197. Whybra, P. The image biomarker standardization initiative: standardized convolutional filters for reproducible radiomics and enhanced clinical insights / P. Whybra, A. Zwanenburg, V. Andrearczyk [et al.] // *Radiology*. – 2024. – Vol. 310, № 2. – P. e231319. – DOI: 10.1148/radiol.231319. – PMID: 38319168. – PMCID: PMC10902595.

198. Wibmer, A. Haralick texture analysis of prostate MRI: utility for differentiating non-cancerous prostate from prostate cancer and differentiating prostate cancers with different Gleason scores / A. Wibmer, H. Hricak, T. Gondo [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2015. – Vol. 25, № 10. – P. 2840–2850. – DOI: 10.1007/s00330-015-3701-8.

199. Wu, M. On mutual information in contrastive learning for visual representations / M. Wu, C. Zhuang, M. Mosse, D. Yamins // *arXiv preprint arXiv:2005.13149*. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2005.13149> (дата обращения: 20.12.2025).

200. Xiao M. L. MRI Texture Analysis for Preoperative Prediction of Lymph Node Metastasis in Patients with Nonsquamous Cell Cervical Carcinoma / M. L. Xiao,

Y. Wei, J. Zhang, J. M. Jian, Y. Song, Z. J. Lin, L. Qian, G. F. Zhang, J. W. Qiang // *Academic. Radiology.* – 2022. – Vol. 29, № 11. – P. 1661–1671. – DOI: 10.1016/j.acra.2022.01.005.

201. Yang, X. Magnetic resonance radiomics signatures for predicting poorly differentiated hepatocellular carcinoma: A SQUIRE-compliant study / X. Yang, C. Yuan, Y. Zhang, Z. Wang // *Medicine.* – 2021. – Vol. 100, № 19. – Art. e25838. – DOI: 10.1097/MD.00000000000025838.

202. Yeni, Y.N. Trabecular shear stress in human vertebral cancellous bone: intra- and inter-individual variations / Y.N. Yeni, F.J. Hou, D. Vashishth, D.P. Fyhrie // *J. Biomech.* 2001. – T. 34, № 10. – C. 1341–1346. – DOI: 10.1016/s0021-9290(01)00089-6.

203. Yip, S. Comparison of texture features derived from static and respiratory-gated PET images in non-small cell lung cancer / S. Yip, K. McCall, M. Aristophanous [et al.] // *PLoS One.* – 2014. – Vol. 9, № 12. – P. e115510. – DOI: 10.1371/journal.pone.0115510.

204. Yip, S. S. F. Applications and limitations of radiomics / S. S. F. Yip, H. J. W. L. Aerts // *Phys. Med. Biol.* – 2016. – Vol. 61, № 13. – P. R150–R166. – DOI: 10.1088/0031-9155/61/13/R150.

205. Yu, W. Accuracy of CT texture analysis for differentiating low-grade and high-grade renal cell carcinoma: systematic review and meta-analysis / W. Yu, G. Liang, L. Zeng, Y. Yang, Y. Wu // *BMJ Open.* – 2021. – Vol. 11, no. 12. – Art. e051470. – DOI: 10.1136/bmjopen-2021-051470.

206. Zhang Y. R. Pretreatment CT Texture Analysis for Predicting Survival Outcomes in Advanced Nonsmall Cell Lung Cancer Patients Receiving Immunotherapy: A Systematic Review and Meta-Analysis / Y. R. Zhang, Y. H. Lu, C. M. Lin, J. W. Ku // *Thoracic. Cancer.* – 2025. – Vol. 16, № 15. – Art. e70144. – DOI: 10.1111/1759-7714.70144.

207. Zhang, L. IBEX: an open infrastructure software platform to facilitate collaborative work in radiomics / L. Zhang, D. V. Fried, X. J. Fave [et al.] // *Med. Phys.* – 2015. – Vol. 42, № 3. – P. 1341–1353. – DOI: 10.1118/1.4908210.

208. Zhao X. Three-dimensional texture analyses of multi-quantitative relaxation time maps for evaluating cartilage repair with the treatment of allogeneic

human adipose-derived mesenchymal progenitor cells / X. Zhao, J. Ruan, J. Li, C. Dai, M. Pei, Y. Zhou // *Magnetic Resonance Imaging*. – 2024. – Vol. 110. – P. 7–16. – DOI: 10.1016/j.mri.2024.03.039.

209. Zhao, B. Reproducibility of radiomics for deciphering tumor phenotype with imaging / B. Zhao, Y. Tan, W. Y. Tsai [et al.] // *Sci. Rep.* – 2016. – Vol. 6. – P. 23428. – DOI: 10.1038/srep23428.

210. Zheng, W. Textural features of the frontal white matter could be used to discriminate amnesic mild cognitive impairment patients from the normal population / W. Zheng, R. Mu, F. Liu, X. Qin, X. Li, [et al.] // *Brain and Behavior*. – 2023. – Vol. 13, № 11. – Art. e3222. – DOI: 10.1002/brb3.3222.

211. Zhong, X. Differentiation of neurogenic tumours and pleomorphic adenomas in the parapharyngeal space based on the texture analysis of T2WI / X. Zhong, C. Huang, B. Yu, S. Liu, T. Li, Y. Guan // *BMC Oral Health*. – 2023. – Vol. 23, № 1. – Art. 548. – DOI: 10.1186/s12903-023-03283-6.

212. Zhong, X. Differentiation of small (≤ 3 cm) hepatocellular carcinomas from benign nodules in cirrhotic liver: the added value of MRI-based radiomics analysis to LI-RADS version 2018 algorithm / X. Zhong, T. Guan, D. Tang, J. Li, B. Lu, S. Cui [et al.] // *BMC Gastroenterology*. – 2021. – Vol. 21, № 1. – Art. 155. – DOI: 10.1186/s12876-021-01710-y.

213. Zwanenburg, A. The image biomarker standardization initiative: standardized quantitative radiomics for high-throughput image-based phenotyping / A. Zwanenburg, M. Vallières, M. A. Abdalah [et al.] // *Sci. Rep.* – 2020. – Vol. 10. – P. 11038. – DOI: 10.1038/s41598-020-68193-y.