

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРВЫЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И. М. СЕЧЕНОВА МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (СЕЧЕНОВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи



Тареева Татьяна Алексеевна

**Судебно-медицинская оценка возраста по морфологическим параметрам
грудины**

3.3.5. Судебная медицина

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Научный руководитель:

доктор медицинских наук, доцент
Золотенкова Галина Вячеславовна

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРУДИНЫ В КОНТЕКСТЕ СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ).....	14
1.1. Типы костей посткраниального скелета, позволяющие проводить диагностику общегрупповых признаков	14
1.2. Методы исследования, применяемые для установления общегрупповых признаков.....	17
1.3. Грудина как индикатор биологического профиля неопознанного индивида.....	25
1.4. Использование морфологических особенностей грудины для формирования биологического профиля неопознанного индивида.....	27
1.4.1. Возможности установления пола	28
1.4.2. Возможности установления возраста.....	32
1.4.3. Межпопуляционные различия	35
1.4.4. Влияние факторов внешней и внутренней среды.....	37
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	40
2.1. Материалы исследования	40
2.2. Методы исследования.....	46
2.2.1. Секционное исследование.....	46
2.2.2. Лучевые методы исследования.....	47
2.2.3. Морфометрический анализ	49
2.2.3.1. Оценка возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по результатам традиционной рентгенографии	49
2.2.3.2. Оценка динамики возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по результатам мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки.....	50
2.2.4. Методы статистического анализа.....	55

2.2.5. Методы AI-анализа данных	56
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗРАСТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГРУДИНЫ И ГРУДИНО-РЕБЕРНЫХ СОЧЛЕНЕНИЙ.....	59
3.1. Результаты исследования грудины и грудино-реберных сочленений при помощи традиционной рентгенографии.....	59
3.2. Результаты исследования грудины и грудино-реберных сочленений при помощи мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки.....	71
3.3. Воспроизводимость методов судебно-медицинского установления возраста по результатам радиологических исследований грудины и грудино-реберных сочленений	83
ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ AI-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ВОЗРАСТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МУЛЬТИСПИРАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ.....	89
4.1. Использование методов машинного обучения для установления возраста человека по результатам мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки.....	89
4.2. Разработка алгоритма установления возраста человека по результатам мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки с использованием методов машинного обучения.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
ВЫВОДЫ	102
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	104
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Экспертная оценка общегрупповых признаков является важнейшим этапом при проведении судебно-медицинской идентификации личности (ИЛ) [8, 30, 39, 41, 43, 44, 45]. Первостепенной значимостью обладают такие признаки, как пол и возраст, благодаря которым представляется возможность воссоздать биологический профиль неопознанных личностей для последующей идентификации [17, 18, 41, 44, 205].

Увеличение количества социально-правовых нарушений, эволюция преступной деятельности (изменение классической морфологии повреждений при использовании современных видов оружия, в том числе самодельных; усложнение способов сокрытия преступлений), при которых объектами исследования судебно-медицинскими экспертами становятся случаи насильственной смерти, нередко с выраженными поздними трупными изменениями (путрификация, скелетирование), а также фрагментированные останки, стало фактором для проведения исследований, направленных на детальное изучение, разработку и усовершенствование уже имеющихся методик, касающихся идентификации личности [21]. Помимо этого, установление личности в условиях локальных вооруженных конфликтов и закономерно последующих миграционных волн, требует применения экспресс-методов установления возрастной принадлежности в рамках судебно-медицинской ИЛ [4, 7, 43, 44].

Современный этап развития судебно-медицинской экспертизы (СМЭ) характеризуется сменой методологических парадигм: установление возраста перестает быть сугубо морфологической процедурой [34]. Прогресс в области информационных технологий и математического моделирования обуславливает необходимость интеграции точных и естественнонаучных наук [19]. Внедрение мультидисциплинарного подхода, совмещающего данные медико-биологических

наук с возможностями цифровой обработки биомаркеров старения, является не только условием повышения качества экспертиз и достоверности экспертных выводов, но и отвечает глобальным трендам персонализированной и предиктивной медицины.

Степень разработанности темы исследования

Попытки верифицировать личность погибших предпринимаются учеными разных стран на протяжении уже длительного времени [17, 18, 41, 42, 44]. При этом, одной из основных задач становится поиск тех анатомических образований организма человека, по которым с большой степенью достоверности можно было бы осуществить оценку половозрастной принадлежности [41].

Проведение идентификационных мероприятий, как правило, базируется на исследовании и анализе костных структур ввиду того, что костная ткань наиболее устойчива к действию средовых факторов [31]. С этой целью наиболее часто используются длинные трубчатые кости, череп, кости кисти и др. [30, 40].

Наряду с вышеуказанными костными образованиями, объектом судебно-медицинской идентификации личности, в ряде исследований, рассматривалась и грудина [17, 18, 23, 65]. Некоторые авторы отмечают, что степень оссификации манубриостернального и мечевидного сочленений заметно коррелирует с возрастом [64, 108, 113, 153], а линейные размеры грудины – с полом [115, 133, 158, 191, 193]. Однако результаты подобных исследований имеют явные межпопуляционные различия, нечеткие схемы описания динамики возрастных изменений, что, в конечном итоге, снижает значимость предлагаемых алгоритмов [41, 42, 45].

Анализ отечественной литературы показал, что единственной методикой, доступной на сегодняшний день в Российской Федерации, является методика З. Л. Лаптева [23, 41, 44, 45]. Учитывая, что с момента ее создания прошло ни одно десятилетие, а также отсутствие четко регламентированной системы оценки выраженности дегенеративно-дистрофических изменений костной и хрящевой

тканей, могут привести к неоднозначному толкованию экспертами с разным уровнем подготовки, и, как следствие, недостоверным заключениям [41, 42, 45]. В этой связи необходим пересмотр и усовершенствование алгоритма, согласно современным популяционным особенностям, в том числе с использованием современных методов медицинской визуализации [16].

Цель исследования

Разработать методику судебно-медицинского установления возраста человека на основе анализа инволютивных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по результатам мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) грудной клетки.

Задачи исследования

1. Изучить возрастные изменения грудины и грудино-реберных сочленений человека посредством анализа результатов проведенных лучевых исследований (традиционной рентгенографии и МСКТ).
2. Разработать оптимальную и информативную модель установления возраста человека по результатам МСКТ грудной клетки.
3. Оценить воспроизводимость методов установления возраста человека по результатам традиционной рентгенографии и МСКТ.
4. Сформировать алгоритм установления возраста человека по результатам МСКТ с использованием методов машинного обучения.

Научная новизна

Проведен структурированный анализ имеющихся научных сведений, касающихся судебно-медицинской диагностики общегрупповых признаков при

помощи детального изучения метрических и морфологических признаков грудины, а также грудино-реберных сочленений.

Дана оценка возрастной динамики грудины и грудино-реберных сочленений по результатам мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки. Выявлены и структурированы полуколичественные характеристики возрастных изменений стернальных и грудино-реберных сочленений в группах 18-79 лет.

Разработан инновационный метод судебно-медицинского установления возраста человека на основе оценки возрастной морфологии стернальных и грудино-реберных сочленений по данным реконструированных (трехмерных) МСКТ-изображений грудной клетки и предложено регрессионное уравнение для установления возраста человека, точность которого составляет 73,47% для мужчин и 73,42% для женщин.

Дана оценка воспроизводимости методов судебно-медицинского установления возраста на основе анализа радиологических изображений грудины (традиционная рентгенография и мультиспиральная компьютерная томография).

На основе методов интеллектуального анализа данных сформирован алгоритм установления возраста человека, включающий автоматизированную оценку и интерпретацию возрастных изменений стернальных и грудино-реберных сочленений.

Теоретическая и практическая значимость работы

В ходе работы получены новые данные, касаемые возрастной морфологии грудины и грудино-реберных сочленений, а именно: о временных интервалах синостозирования манубриостернального, ксифостернального и костостернальных сочленений, по отношению к современной популяции Российской Федерации (Центральный федеральный округ). На основе собственных исследований сформирована унифицированная классификация стадий оссификации стернальных и грудино-реберных сочленений, а также

разработана уникальная вспомогательная оценочная шкала стадий сращения манубриостерального, ксифостерального и костостеральных сочленений, подкрепленная эталонным иллюстративным материалом, позволяющая снизить риски субъективизма при интерпретации МСКТ-изображений, что обеспечивает высокую воспроизводимость предлагаемого метода установления возраста. Совокупность использованных морфологических признаков позволяет рассматривать грудину и грудино-реберные сочленения в качестве основных или дополнительных биомаркеров определения возраста человека, что, в свою очередь, расширяет спектр исследований по установлению возраста в рамках судебно-медицинской ИЛ.

Методология и методы исследования

Поставленные задачи реализовывались путем проведения наблюдательного ретроспективного поперечного исследования, выполненного в ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет) на базе кафедры судебной медицины Института клинической медицины им. Н. В. Склифосовского. В основу работы положена совокупность общенаучных и специальных методов исследования. Сформированный дизайн исследования представлен следующим образом. На начальном этапе проведен анализ и систематизация публикаций, соответствующих тематике. Проанализировано свыше 200 отечественных и зарубежных публикаций за период 2000-2025 гг., посвященных различным аспектам идентификации личности. Второй этап включал оценку возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по результатам традиционной рентгенографии. С этой целью были отобраны 369 рентгенографических изображений грудин с фрагментами хрящевых частей ребер с последующей оценкой комплекса морфологических признаков и построением предиктивной математической модели. На третьем

этапе выполнен анализ возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по данным 175 реконструированных МСКТ-изображений грудной клетки, а также сформирована регрессионная модель установления возраста. Отдельный этап работы включает сравнительную характеристику воспроизводимости методов установления возраста человека по результатам традиционной рентгенографии и МСКТ, а также разработку алгоритма установления возраста по результатам МСКТ с использованием методов машинного обучения. При анализе результатов исследования применялись параметрические и непараметрические статистические методы.

В основу работы легли «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации с поправками от 2013 года, а также основные принципы доказательной медицины.

Исследование в рамках диссертационной работы одобрено Локальным этическим Комитетом на базе ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), протокол № 01-25 от 23.01.2025 г.

Личный вклад автора

Диссертантом лично был осуществлен поиск, анализ и систематизация отечественной и зарубежной научной литературы, обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, сформирован дизайн исследования и положения, выносимые на защиту. Автором лично проведена интерпретация радиологических изображений, выполнен анализ и обобщение полученных результатов, а также подготовлены публикации, отражающие основные результаты исследования.

Положения, выносимые на защиту

1. Грудина и грудино-реберные сочленения характеризуются закономерной возрастной изменчивостью, которая может быть использована в качестве диагностического критерия при судебно-медицинском установлении возраста.

2. Предложенный новый метод полуколичественной оценки возрастных изменений костостернальных, манубриостернального и ксифостернального сочленений по результатам МСКТ грудной клетки может быть использован для установления возраста при судебно-медицинской идентификации личности.

3. Сформированный алгоритм установления возраста, в основе которого лежит анализ динамических изменений грудины и грудино-реберных сочленений посредством современных технологий компьютерного зрения, автоматизирует процесс интерпретации МСКТ-изображений и расчета возраста, повышая воспроизводимость и объективность конечных экспертных выводов при проведении судебно-медицинской идентификации личности.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Научные положения диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 3.3.5. Судебная медицина по следующим пунктам: 9. Разработка методов идентификации личности, в том числе с использованием визуализации и цифровой диагностики общегрупповых и индивидуальных признаков; 14. Совершенствование судебно-медицинской экспертизы трупов и живых лиц, экспертизы по материалам следственных и судебных дел с целью решения вопросов правоохранительных органов, в том числе в случаях неблагоприятных исходов при оказании медицинской помощи.

Степень достоверности и апробация результатов

Диссертационная работа выполнена на высоком методологическом уровне с использованием современных методов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается корректно поставленными целью и задачами исследования, четко сформулированными и обоснованными выводами, достаточным объемом анализируемого материала, а также применением актуальных методов статистической обработки.

Материалы диссертационного исследования доложены на XI Международном конгрессе «Актуальные вопросы судебной медицины и экспертной практики – 2024» (Москва, 2024), XVIII Всероссийском национальном конгрессе лучевых диагностов и терапевтов «Радиология – 2024» (Москва, 2024), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы судебной медицины» (Москва, 2024), XII Международном конгрессе «Актуальные вопросы судебной медицины и экспертной практики – 2025» (Москва, 2025), XIX Всероссийском национальном конгрессе лучевых диагностов и терапевтов «Радиология – 2025» (Москва, 2025), Научно-практической конференции «Судебно-медицинская радиология: перспективы научных исследований, преподавания и внедрения в судебно-экспертную практику» (Москва, 2025), IX Дальневосточном медицинском молодежном форуме «Актуальные вопросы современной медицины» (Хабаровск, 2025), XIII Международном конгрессе «Актуальные вопросы судебной медицины и экспертной практики – 2026» (Москва, 2026).

Апробация диссертационной работы состоялась на заседании кафедры судебной медицины Института клинической медицины им. Н. В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет) г. Москва (протокол № 9 от 18 мая 2026 года).

Внедрение результатов исследования

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры судебной медицины Института клинической медицины им. Н. В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет) (акт №904 от 25.03.2026), а также в экспертную деятельность отделения медико-криминалистической экспертизы ГБУЗ города Москвы «Бюро судебно-медицинской экспертизы Департамента здравоохранения города Москвы» (акт б/н от 19.03.2026).

Публикации по теме диссертации

По результатам исследования опубликовано 7 работ, в том числе 3 научных статьи в журнале, индексируемом в международных базах цитирования (Web of Science, Scopus), 1 иная публикация, а также 3 публикации в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 134 страницах машинописного текста, иллюстрирована 37 рисунками и 23 таблицами и состоит из введения, обзора литературы, материалов и методов, результатов собственных исследований, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы (236 источников: 49 отечественных и 187 иностранных).

Благодарности

Диссертант искренне признателен своему научному руководителю – доценту, доктору медицинских наук Золотенковой Галине Вячеславовне – за неоценимую помощь, поддержку и профессиональное руководство на всех этапах формирования работы. Отдельной благодарности всецело заслуживает коллектив кафедры судебной медицины Института клинической медицины имени Н. В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И. М. Сеченова Министерства Здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет). Диссертант благодарит сотрудников кафедр внутренних, профессиональных болезней и ревматологии Института клинической медицины им. Н. В. Склифосовского и информационных технологий и обработки медицинских данных Передовой инженерной школы «ИСТ» ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Министерства Здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), сотрудников ГБУЗ "Бюро судебно-медицинской экспертизы Департамента здравоохранения Москвы" за содействие при написании диссертационной работы, а также глубокоуважаемых рецензентов научных статей.

ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРУДИНЫ В КОНТЕКСТЕ СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1. Типы костей посткраниального скелета, позволяющие проводить диагностику общегрупповых признаков

Более века отечественными и иностранными учеными изучалась возможность установления возраста, а также пола и роста, при помощи исследования различных костей человеческого тела [17, 18, 40, 41, 206]. С этой целью, в случаях деструкции мягких тканей вплоть до полного скелетирования, в судебно-экспертной практике классически используется череп. Однако, в ряде случаев, в качестве биологического материала для производства СМЭ выступают фрагментированные останки, в составе которых череп отсутствует. В подобных ситуациях возникает необходимость детального исследования имеющихся костных структур. Е. Л. Воронцова (2005) отмечает перспективные возможности возрастной и половой идентификации личности по комплексному изучению костей посткраниального скелета [6].

На сегодняшний день в распоряжении судебных медиков и экспертов-криминалистов имеется достаточно большой объем знаний и методик, по которым представляется возможность установления общегрупповых признаков [17, 18, 30, 41].

Одним из таких методов является алгоритм определения пола, длины тела и возраста человека, разработанный Н. Л. Мальцевой (2006) с учетом анатомических и метрических особенностей подъязычной кости [24]. Другие же авторы, в частности А. А. Чертовских и соавт. (2019), в качестве объекта исследования, использовали лопатку [47]. Всестороннее изучение анатомических структур и дегенеративно-дистрофических изменений лопаток позволило разработать диагностические критерии определения общегрупповых признаков. Таким

образом, возможность установления верной половой принадлежности составила 97,22% случаев, а погрешность при определении длины тела равна 5,1 см. При этом отнести индивида к возрастным категориям 18-60 и 60-99 лет удалось в 88,9% случаев; процент ошибок между группами 18-25, 25-44 и 44-60 лет составил 7,4, а между группами 60-75, 75-90 и 90 лет и более – 18,5.

Возможность установления групповых признаков личности (пола) при судебно-медицинском исследовании ключиц была обоснована А. В. Смирновым (2017) [38]. Сформированные им математические модели в виде дискриминантных функций позволили с высокой степенью точности установить не только половую принадлежность, но и определить прижизненный тип телосложения индивида.

Общие закономерности, позволяющие определять половую принадлежность по морфологическим признакам ребер, обобщены А. А. Долговым и соавт. (2015) в своем научном труде [26]. Позже Звягиным В. Н. и соавт. (2016) были разработаны методические рекомендации по установлению личности скелетированных останков, используя комплексное исследование ребер [14]. Как объект судебно-медицинской ИЛ, ребро использовалось и в работах зарубежных исследователей. Так, еще в конце прошлого столетия М. Işcan et al. (1984, 1985) сформировали методику установления половозрастной принадлежности по грудинному концу 4-го ребра [150, 151, 152], которая впоследствии была апробирована на различных популяциях. Например, А. Muñoz et al. (2018) протестировали метод Işcan на современной мексиканской выборке [190]. По результатам исследования авторы пришли к выводам, что необходим пересмотр данной методики с учетом популяционной специфичности, в том числе с применением современных технологий для дальнейшего использования в вопросах идентификации личности.

Наряду с черепом, при судебно-медицинской ИЛ традиционно используются трубчатые кости. Как отмечает Н. С. Эделев и соавт. (2014), морфометрический коэффициент, отражающий соотношение общей ширины плечевой кости к среднеарифметической ширине стенок кости, имеет статистически достоверные различия в разных возрастных группах [49]. Среди трубчатых костей, диагностическую ценность в рамках проведения СМЭ по отождествлению

личности демонстрируют и малоберцовые кости. В. П. Бабенко и соавт. (2013) сформированы математические модели на основе комплексного изучения макроструктурных признаков малоберцовых костей с возможностью установления возраста, а также длины тела [1]. Половые различия в фалангах II-V пальцев кисти выявлены Т. С. Бикбаевой (2009), которая разработала ориентирующую вспомогательную таблицу, позволяющую проводить идентификацию фаланг III и V пальцев кисти с точностью до 95,0-99,0% [3].

Исследование компонентов таза при отождествлении личности не теряет своей актуальности. Так, М. San-Millán et al. (2017) был предложен алгоритм установления возраста путем оценки 7-ми показателей вертлужной впадины, точность которого достигает 89,0% [188]. А возрастная морфология лонного сочленения изучалась А. К. Гармусом. Разработанная им несколько десятилетий назад методика определения возрастной принадлежности неоднократно апробировалась, в том числе Е. Н. Титаренко и соавт. (2008) [46]. Результаты их исследования показали, что фактическая погрешность установления биологического возраста не противоречит регламентируемой методике, что свидетельствует о возможности применения данного метода в настоящее время.

Исследование тех или иных костных структур, в контексте судебно-медицинской идентификации личности, приводит к различным уровням достоверности полученных результатов, что связано как с диагностической ценностью выбранного материала, так и с применяемой методикой [5, 17, 18, 42, 171]. Наиболее предпочтительным решением в такой ситуации становится создание универсального алгоритма с максимально возможной достоверностью для применения в судебно-медицинской практике.

1.2. Методы исследования, применяемые для установления общегрупповых признаков

При производстве судебно-медицинских экспертиз по идентификации личности в настоящее время применяются различные методики, причем в подавляющем большинстве случаев – их совокупность [17, 18, 41]. Тем не менее, антропометрическое изучение неопознанных тел или же их костных останков, составляет основную часть всех медико-криминалистических экспертиз в практике судебных медиков.

Остеометрические методы. Традиционно основоположником отечественной остеометрии считается В. И. Пашкова (1978), которой были разработаны алгоритмы установления видовой, а также расовой и половозрастной принадлежности костных останков [29]. Вклад в разработку методов по установлению общегрупповых признаков внес В. Н. Звягин (2006), предложивший метод диагностики соматотипа [13]. Кроме того, им, совместно с И. М. Синевой (2007), проводились измерения длинных трубчатых костей и суставных анатомических образований таза и лопатки, итогом которых стала возможность определения пола по изолированным костям в 74-83,5% случаев, по их совокупной оценке – в 85,7-95,0% случаев [10]. В. Н. Звягиным также были выведены диагностические уравнения для определения половой принадлежности по изолированным ребрам, а позже – установлена возможность достоверного определения пола по изолированным поясничным позвонкам в 87,7-88,8% случаев, при их комплексной оценке – в 93,8% случаев. Длина же тела по отдельно взятым позвонкам определяется с точностью $\pm 6,22-6,45$ см, по их совокупности – до $\pm 6,02$ см [11, 12]. Определение половой принадлежности по остеометрическим показателям позвонков также изучали и зарубежные исследователи [129].

T. R. Peckmann et al. (2016) в своем исследовании отметили выраженные половые различия в метрических показателях лопаток, а также сформировали модели прогнозирования пола в виде дискриминантных уравнений для

современной чилийской популяции с точностью 80,7-86,0 [175]. А возрастные изменения в крестцово-подвздошном сочленении описаны в работе K. Godde (2017) [136].

Остеометрические параметры надколенников по трем показателям (максимальной высоте, ширине и толщине) проанализированы M. Akhlaghi et al. (2010) [147]. На основе их данных, точность достоверного определения пола составляет 92,9%. Более точные предиктивные модели сформировали J. Albanese et al. (2008), способствовавшие определению половой принадлежности по проксимальному концу бедренной кости в 95,0-97,0% случаев без привязки к какой-либо популяции [75]. Модели оценки пола и возраста на совокупности метрических показателей проксимального отдела бедренной кости были предложены AR. Abdulai et al. (2022) и D. Carvallo et al. (2020) [53, 94]. Однако все еще требуются доработки в данном направлении, чтобы результаты указанных исследований можно было экстраполировать на различные популяции людей. Актуальность использования бедренной кости в контексте судебно-медицинской идентификации личности подтверждается и иными исследованиями [50, 195, 205, 230].

В своей работе C. Mountrakis et al. (2010) отметили, что плюсневые кости обладают значительным половым диморфизмом. По их данным, при использовании семи остеометрических параметров плюсневых костей, возможность точного определения пола составляет 90,1% [196]. На основе дискриминантного анализа, M. Phatsara et al. (2016) изучали антропометрические показатели плюсневых костей на популяции жителей средней Азии и вновь продемонстрировали высокую точность при определении пола [223].

Возможность установления пола по остеометрическим параметрам пястных костей с точностью более 79,5%, рассмотрено в исследовании P. Khanpetch et al. (2012) [107].

А. А. Сальманов и соавт. (2011) уделили внимание исследованию возможности определения возраста плода человека по антропометрическим показателям нижней конечности [37].

Современные требования к методам оценки возраста для каждого конкретного случая определили A. Schmeling et al. (2007) [60]. Ими также были обнародованы этические и правовые аспекты, касающиеся вопросов идентификации личности.

Гистологические методы. Процессы ремоделирования хрящевой и костной тканей, их гистологический анализ, также нашли свое применение при установлении половозрастной принадлежности в рамках судебной медицины. К примеру, A. H. W. Chan et al. (2007) [95] проводили количественную оценку микроструктурных компонентов костной ткани с течением времени и заключили, что вариации ремоделирования костей могут способствовать определению возраста индивида. Оценка возраста на момент смерти по костной компакте ребер человека, была проведена K. Absolonova et al. (2013) [143]. После термического воздействия на ребра были обнаружены половозрастные микроструктурные изменения и разработаны регрессионные уравнения для определения возраста. Схожие исследования проводились Y. Amiri et al. (2022) и T. Gumpangseth et al. (2023) [77, 139]. A. J. R. Goliath et al. (2016) предложили модель определения возраста, базирующуюся на морфологических свойствах остеонов, которые, с течением времени, подвергаются изменениям [137]. Позже F. Lagacé et al. (2019) протестировали указанную модель на французской выборке и обосновали предпосылки к ее усовершенствованию [222]. На основе подсчета микроструктурных элементов периостального отдела V плюсневой кости В. Н. Звягиным и соавт. (2021) при помощи дискриминантного анализа разработаны диагностические уравнения установления возраста [9]. Таким образом, точность определения возрастной группы между 18-49 и 50-90 лет составила 90,43%; между 18-35 и 36-49 лет – 94,12%; между 50-61 и 62-90 лет – 80,96%.

В 2022 году J. G. García-Donas et al. исследовали гистоморфометрические параметры реберной компакты и выявили связь гистохарактеристик кости не только с возрастом, но и с патологическими процессами, наблюдаемыми при жизни [63].

Попытки прогнозирования возраста при помощи энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии состава костной ткани, фигурируют в работе С. М. Нефедовой и соавт. (2023) [33]. Ими предложена формула, отражающая связь возраста и изменения химического состава кости.

Молекулярно-генетические методы. Молекулярный анализ, на основе рацемизации аспарагиновой кислоты (Асп.), является перспективным методом определения возраста. По сути, рацемизация аминокислот – это их переход из L-формы в D-форму (в так называемую неактивную форму) и скорость этого «перехода» определена и является достаточно стабильным параметром [20, 68, 69, 189]. В своем исследовании S. C. Zarico et al. (2022) показали, что с увеличением возраста, соотношение Асп.D/Асп.L увеличивается, на основании чего была выведена формула линейной регрессии, позволяющая установить возраст с точностью до ± 2 -6 лет [236].

Наряду с этим, в современной медико-криминалистической практике активно используются молекулярно-генетические методы оценки возраста [15]. Например, анализ мутаций в митохондриальной ДНК человека, накапливающихся с течением времени, позволяет устанавливать возрастную группу. Эпигенетический метод, основанный на метилировании ДНК (J. Naue et al., 2017, N. Terrado-Ortuño et al., 2025), позволяет определить возраст, путем секвенирования ДНК цельной крови по заранее отобранным маркерам и является достаточно надежным, однако он не учитывает этнические различия между индивидами и нуждается в доисследовании [98, 221].

Радиологические исследования (традиционная рентгенография (Rg), компьютерная томография (КТ)) – одни из наиболее популярных методов визуализации, применяемых в современной судебно-медицинской практике не только для обнаружения и установления локализации инородных предметов в тканях и полостях тела, но и также оказывают неоценимую помощь при идентификации останков неизвестных лиц [34, 40, 185].

Рентгенография. Наиболее частыми анатомическими структурами при определении возраста человека с помощью рентгенологического исследования

являются кисть и запястье [40]. Помимо этого, костный возраст, посредством рентгенографии, определяют по рентгенограммам ключицы, подвздошной и головке бедренной костей и др. Исследование возрастной морфологии по данным рентгенографии ведется на протяжении многих десятилетий. Первое врачебное пособие в виде атласа по рентгенографии сформировали W. Greulich и S. Pyle (1959), в которое включили Rg-изображения кистей и запястий мужчин и женщин с подробным толкованием возрастных изменений, которые наблюдаются в структуре указанных костей с течением времени [138]. Позже J. M. Tanner и R. H. Whitehouse (1962) предложили свою, более точную методику (TW-methods), основанную на анализе структурных элементов кости [220]. Впоследствии метод Таннера-Уайтхауса был модифицирован и усовершенствован. Так появились TW2- и TW3-методы [81, 82], более точные и воспроизводимые. На основе возрастных Rg-особенностей запястий левой руки, W. C. Chumela et al. (1989) был разработан и предложен метод FELS [99]. A. V. Gilsanz et al. (2005) представили цифровизированный атлас, в который вошли идеализированные модели кистей и запястий в соответствии с возрастом, на основе анализа морфологических параметров центров оссификации [135]. В исследовании M. Prokop-Piotrkowska et al. (2021) подробно разобраны представленные выше методики и пособия, а также приведена их сравнительная характеристика [228].

Предиктивную способность определения общегрупповых признаков по данным рентгенографии верхних конечностей, оценивало большое количество ученых из разных стран. Так, S. Schmidt et al. (2008) по рентгенограммам исследовали эпифизарное окостенение отдельных составляющих скелета верхних конечностей [216]. Методику прогнозирования возраста по рентгенограммам левой руки предложили использовать N. H. Nguyen et al. (2022), подчеркнув, что с помощью их разработки можно определить не только пол и возраст, но и расовую принадлежность [89]. На предмет половозрастных изменений Ю. И. Пиголкиным и соавт. (2015) проанализированы рентгенограммы кистей левой руки [27]. Кисть, как объект судебно-медицинской идентификации личности, фигурирует и в иных отечественных работах [32, 48].

Радиологические изменения ключицы и первого ребра, имеющие диагностическое значение для судебно-медицинской практики, описаны в исследовании P. M. Garamendi et al. (2011), тогда как в исследованиях Y. Yin et al. (2018), N. B. Keller et al. (2021), T. Hawellek et al. (2022) аналогичные изменения рассматриваются применительно к тазобедренному суставу [127, 225, 154, 167].

Возрастную оценку Rg-изменений бедренной кости на основе ее ремоделирования проводили A. Pujol et al. (2014) [173]. Характер эволюционных изменений бедренной кости также отражен и в иных исследованиях [201, 218]. Метрические параметры надколенника и плюсневых костей по рентгенографическим изображениям правой стопы и колена изучали W. M. Abdel Moneim et al. (2008), а также L. Hackman et al. (2013) [146, 142]. Более значимые половые различия были продемонстрированы при анализе рентгенограмм плюсневых костей. Разработкам рентгенографических признаков определения возраста по морфологическим параметрам коленного сустава посвящены работы J. E. O'Connor et al. (2008, 2014), а также R. Cameriere et al. (2012), S. M. Aly et al. (2016) и A. Demircioğlu et al. (2022) [51, 72, 182, 145, 176].

На основе Rg-оценки в клиническую практику, начиная с 2008 года, активно внедрялась автоматизированная компьютерная методика определения костного возраста – BoneXpert, основанная на сравнительном анализе одновременно нескольких костных структур одного индивида. Так, D. D. Martin et al. (2022) уточняют, что данный метод обладает высокой точностью, по сравнению с традиционной рентгенографией, но все же имеет ряд недостатков, среди которых – ограниченная воспроизводимость ввиду того, что разработка метода проводилась на определенных популяциях и повсеместное ее использование приведет к погрешностям при установлении возраста [54].

Несмотря на достаточно высокие показатели эффективности, традиционные рентгенографические методы имеют существенные недостатки (теневые наложения, низкий контраст и др.), в связи с чем возникает потребность использования более современных методов диагностики [73].

Компьютерная томография. КТ-исследования, а также автоматизированные системы определения биологического возраста человека, в том числе с использованием искусственного интеллекта, представляют повышенный интерес в сфере идентификации личности как методики, обладающие более высокой достоверностью (M. Barszcz et al., 2025, W. Yuan et al., 2025, C. Sun et al., 2025, T. Michiue et al., 2018) [86, 90, 97, 231].

Возможность применения КТ-данных IV-го шейного позвонка оценивалась в исследовании, проведенном R. Cameriere et al. (2015), при этом погрешность составила $\pm 2,32$ лет у лиц мужского пола и $\pm 1,72$ лет у лиц женского [67]. В иных исследованиях совокупная оценка XII грудного и I поясничного позвонков позволила установить половую принадлежность с точностью до 96,3% [85, 187]. Другими исследователями при помощи тонкосрезовой компьютерной томографии, определялась степень окостенения медиального конца ключицы [112]. Дальнейший анализ выявил заметную корреляцию между возрастом и степенью его оссификации. Свое применение медиальный конец ключицы нашел в ряде других исследований [70, 125, 128, 130, 181, 213, 214, 215, 219].

По данным компьютерной томографии F. Nougariolis et al. (2017) рассматривали лопатки в качестве объекта определения возраста, а G. Karaman et al. (2024) – для определения пола [91, 61].

В 2022 году на базе университета Erzincan Binali Yıldırım (Турция) было проведено исследование по КТ-снимкам брюшной полости и таза (B. Gümüş et al., 2022) [140]. В результате сравнительной оценки тазовых сочленений был сделан вывод, что компьютерная томография более предпочтительна при установлении возрастной группы, по сравнению с традиционной рентгенографией. Также ряд исследователей изучали КТ-параметры таза при определении пола [174, 197].

Возрастная морфология вертлужной впадины по данным КТ-изображений изучалась V. Warriar et al. (2022) [102]. Взяв за основу упомянутую ранее методику M. San-Millán et al. (2017) [188], авторы рассматривали возможность определения возраста, используя балльную оценку 5 морфологических признаков впадины. При совокупном анализе предложенных признаков и последующем построении

предиктивных моделей получено: погрешность установления возраста по правой вертлужной впадине составила порядка 9,475 года, по левой – 9,616.

Использование КТ-изображений коленного сустава, с последующей обработкой данных нейросетевыми технологиями, отмечено в работе Д. Д. Золотенкова и соавт. (2023) [28]. Авторами установлена сильная корреляционная связь между стадиями эпифизарного сращения (бедренной и берцовых костей) и возрастом, а также сформированы модели прогнозирования возраста.

В качестве объекта при судебно-медицинском определении возраста S. Mavroudas et al. (2022) предложили использовать внутреннюю структуру ребер [164].

КТ-картина области сочленения между телом грудины и мечевидным отростком по данным исследования P. V. Badhe et al. (2023) с высоким уровнем достоверности позволяет определять возраст человека [62]. Томографическое исследование грудины проводили и иные авторы с достаточно перспективными результатами [212].

При всем многообразии используемых методик, подавляющее большинство работ посвящено лучевым методам исследования костной ткани – компьютерной томографии, с более высоким уровнем убедительности, а также магнитно-резонансной томографии [59, 109, 124, 126, 159].

Помимо этого, в зарубежной литературе все чаще встречаются исследования, объектом которых являются не трубчатые кости (плечевые, кости голени, ключицы и др.), а плоские, например, грудина [106]. Вместе с этим, в отечественной литературе встречаются единичные публикации, отражающие возможность использования данного костного образования как объекта определения биологического возраста.

1.3. Грудина как индикатор биологического профиля неопознанного индивида

Грудина представляет собой Т-образную кость, расположенную в передней части грудной клетки по условной срединной линии. В совокупности с ребрами составляет единый костный каркас, обеспечивающий защиту органов переднего средостения и грудной полости. Анатомически грудина разделена на три составляющие: рукоятка, тело, мечевидный отросток.

Верхняя часть грудины – рукоятка, имеет трапециевидную форму, несколько вогнута сверху, образуя яремную вырезку. В верхнелатеральных частях рукоятки имеются парные ключичные вырезки, необходимые для сочленения с ключицами. Боковые поверхности рукоятки представлены реберными вырезками, к которым прилежит первая пара ребер. Тело – самая длинная часть грудины, плоской формы, на боковых поверхностях которой располагаются реберные вырезки для прикрепления III-VII пар ребер. Дистальная часть грудины представлена мечевидным отростком – небольшим костным выступом заостренной формы, к верхнелатеральному углу которого крепится нижняя часть VII пары ребер [233].

Аномалии развития грудной клетки не являются редкостью и представляют собой достаточно широкий спектр деформаций, приводящих к функциональным нарушениям, которые оказывают влияние на внешний вид и качество жизни.

В соответствии с наиболее распространенной классификацией изменений грудной клетки выделяют пять типов деформаций в зависимости от локализации:

- **I тип:** Деформации хрящевой части ребер. Наиболее часто встречается воронкообразная деформация (*Pectus excavatum*), распространенность которой варьируется от 1/100 до 1/1000 живорожденных и составляет около 90% всех аномалий грудной клетки. Представляет собой аномальную депрессию грудины с уменьшением ее переднезаднего размера [57, 79, 96, 100, 155, 179, 180].

Pectus carinatum, или килевидная деформация грудной клетки, является второй по частоте встречаемости среди всех аномалий развития передней грудной

стенки и, подобно *Pectus excavatum*, чаще выявляется у мужской половины населения. Проявляется выпячиванием рукоятки и/или грудино-реберных сочленений вперед [104, 162, 177, 180, 234].

- **II тип:** Деформации костной части ребер. К ним относятся аномалии развития ребер с интраторакальной локализацией (добавочные ребра, соединенные с телами позвонков, расщепленные ребра, соединенные с телами позвонков и другие) [87, 148, 186, 217], а также синдромальные аномалии, включающие синдром Жене (1/100.000-1/30.000 живорожденных). Характерной особенностью является сужение и удлинение грудной клетки, а также короткие, широкие, горизонтально расположенные ребра [88, 161, 177, 178].

- **III тип:** Деформации хрящевой и костной частей ребер. Синдром Поланда (Poland Syndrome) (1/30.000-32.000 живорожденных) отличается полным отсутствием, либо гипоплазией большой грудной мышцы в сочетании с другими аномалиями развития грудной клетки [93, 229].

- **IV тип:** Деформации тела грудины. В редких случаях (менее 0,5% всех аномалий развития передней грудной клетки) в результате нарушения процессов сращения грудины на этапе эмбриогенеза могут возникать ее расщелины [101].

- **V тип:** Деформации ключиц и лопаток [103].

Грудина имеет мезодермальное происхождение. Одним из первых признаков ее формирования является скопление мезенхимальных клеток в виде параллельных лентовидных тяжей (склеротомов) примерно на 6 неделе гестации. В дальнейшем эти тяжи сходятся и срастаются друг с другом, образуя грудинную пластинку. К 9-10 неделе внутриутробного развития она устанавливается по условной средней линии; к этому моменту грудина и прилегающие к ней ребра, приобретают хрящевое строение [22]. Следом начинаются процессы поперечного деления грудины на отдельные хрящевые сегменты, внутри которых располагаются эндохондральные центры оксификации. Так, в рукоятке грудины содержится один такой сегмент, в теле – четыре, в мечевидном отростке – один.

Изначально центры окостенения возникают в рукоятке, затем в краниокаудальном направлении появляются и в остальных частях грудины [163].

Учитывая, что на сроке 9-10 недель завершается развитие грудины плода, возможна ее визуализация путем ультразвукографии. В исследовании, проведенном Y. Zalel et al. [224], оценивалась зависимость длины грудины и количества центров оксификации от срока гестации. Впервые грудина была визуализирована на сроке в 19 недель, а также выявлено 2-3 центра окостенения в виде точечных эхопозитивных образований. По мере прогрессирования беременности увеличивался хрящевой каркас грудины и вместе с ним количество центров оксификации. На 22-23 неделе гестации появляется четвертый центр оксификации. Начиная с 29-й недели беременности появляются все центры оксификации.

Развитие центров окостенения, обычно, происходит по условной срединной линии грудины, в связи с чем, чаще всего, они имеют линейное расположение. Однако, в ряде случаев, оксификация может быть физиологически асинхронной, не приводя к какой-либо патологии.

1.4. Использование морфологических особенностей грудины для формирования биологического профиля неопознанного индивида

Грудина, как объект судебно-медицинской идентификации личности, неоднократно подвергалась исследованиям многочисленными учеными [6, 23, 71, 84, 183, 202]. На сегодняшний день установлено, что анатомические структуры грудины обладают выраженным половым диморфизмом и возрастными особенностями [23, 133, 163, 202, 203, 224], однако до сих пор не разработаны универсальные критерии, согласно которым можно было бы минимизировать погрешности при разработке предиктивных алгоритмов.

Помимо половозрастной принадлежности, нередко встает вопрос об определении ростовых параметров для воссоздания более точного антропологического профиля. В отсутствие наиболее предпочтительных останков (длинные трубчатые кости, кости кисти, стопы и др. [141, 156]), грудина может служить ориентирующим параметром при прогнозировании роста [149].

Оценку роста в китайской выборке при помощи КТ-исследования грудной клетки, проводили К. Zhang et al. (2015) [208]. Ими были рассмотрены 288 КТ-изображений грудной клетки, рассчитаны суммарные длины рукоятки и тела, и проведен линейный регрессионный анализ, по результатам которого выведены формулы определения длины тела с погрешностью в $\pm 4,76$ см у мужчин и $\pm 6,73$ у женщин:

- м (см) = $137,28 + 1,99 \times \sum \text{длина рукоятки и тела}$
- ж (см) = $111,59 + 3,51 \times \sum \text{длина рукоятки и тела}$.

R. G. Menezes et al. вывели уравнение линейной регрессии для определения длины тела также путем измерения суммарной длины рукоятки и тела для женской популяции южной Индии [119]. Погрешность при этом составила $\pm 4,11$ см:

рост ж (см): $111,599 + 3,316 \times \sum \text{длина тела и рукоятки}$.

Эволюция методов исследования метрических и неметрических параметров грудины позволила проводить оценку с незначительными временными затратами и, в то же время, с высокой точностью. Не стоит на месте и развитие организма человека, что подталкивает к пересмотру существующих ныне методик и их усовершенствованию. Вместе с этим необходимо учитывать тот факт, что все исследования, направленные на установление принадлежности останков к той или иной половой и/или возрастной группе, должны проводиться внутри выбранной популяции ввиду того, что степень выраженности половозрастных особенностей имеет свои отличия от этноса к этносу и при последующей апробации на различных группах высок риск получения недостоверных результатов [120].

1.4.1. Возможности установления пола

При анализе костных структур человеческого организма, отмечается значительный половой диморфизм линейных параметров между женской и мужской половинами не только в «привычных» трубчатых и тазовых костях, но и в грудице.

Комплексный морфометрический анализ, основанный на изучении 90 образцов грудин и направленный на определение половой принадлежности по линейным параметрам грудины, провели R. Selthofer et al. [168]. Сравнительный анализ морфометрических параметров показал значительные половые различия в метрических показателях: женская грудина более узкая, тонкая и короткая.

На изъятых в ходе патологоанатомического исследования грудинах, D. K. Atal et al. (2008), путем дискриминантного анализа, выявили статистически значимые половые различия в длине тела грудины, а также в сумме длин тела и рукоятки [133]. При этом достоверно определить пол удалось у 92,9% мужчин и 97,7% женщин.

Попытки к определению пола по расчету индекса грудины (отношение длины рукоятки к длине тела грудины) предприняли S. A. Hunnargi et al. (2009) [210]. Однако полученные ими значения оказались статистически не значимыми, вследствие чего, данный показатель может применяться только в качестве дополнительного параметра в совокупности с наиболее достоверными (длина рукоятки, суммарная длина тела и рукоятки и др.). Авторами также были рассчитаны метрические параметры грудин махараштрианской популяции Индии: длина рукоятки, длина тела, сумма длин тела и рукоятки, на основании которых, точность определения пола составила 85,3% у мужчин и 77,5% у женщин [200].

Jr P. J. Macaluso (2010), изучив 206 костных останков при помощи стандартной остеометрии, выявил более достоверный метрический параметр – общая площадь грудины (точность 86,9%) [158].

Морфометрический анализ анатомических частей грудины нигерийской выборки проводили E. A. Osunwoke et al. (2010) [52]. Согласно результатам их исследования, сумма длин тела и рукоятки с точностью 94,11% указывает на принадлежность к мужской половине и с точностью 69,23%, – к женской. При этом по изолированной длине тела грудины верно установить пол удастся у 89,7% мужчин и 61,5% женщин. Позже R. Bongiovanni et al. (2012), при исследовании останков североамериканской выборки, показали, что грудина является одним из

наиболее точных биомаркеров тела человека, позволяющих провести половую идентификацию с точностью до 84,12% [92].

В том же году D. Franklin et al. по данным МСКТ грудной клетки отметили наибольшие половые различия в следующих линейных параметрах грудины: в длине тела, сумме длин тела и рукоятки, а также в ширине тела и рукоятки. Совокупная оценка данных параметров позволяет с точностью до 72,2-84,5% определить пол в австралийской популяции [116].

J. Singh et al. (2013) на аутопсийном материале североиндийской выборки проводили морфометрическое исследование, путем формирования дискриминантных функций и регрессионных уравнений с точностью идентификации пола 84,8-89,8% в зависимости от используемой математической модели [203]. Отмечено, что у представителей мужского пола средние значения измеряемых параметров выше. Авторами также оценивалась рациональность определения индекса ширины грудины (отношение ширины тела грудины на уровне 1-го сегмента к ширине тела на уровне 3-го сегмента, умноженное на 100) и включение его в анализ определения пола [202].

Ретроспективный анализ с использованием компьютерной томографии, проведенный S. Torimitsu et al. (2015), позволил вывести уравнения дискриминантных функций, предназначенных для установления пола в современной японской популяции по линейным размерам грудины и ее индексам (80,0-90,0% случаев верного определения пола) [117]. На основе расчетов метрических параметров грудины из однородной тайской группы, S. Myint tun et al. (2015) пришли к следующим результатам: сумма длин тела и рукоятки способствует определению пола с точностью 82,4% у мужской половины и 95,7% у женской; площадь грудины – 79,2% и 91,2% у мужчин и женщин соответственно; а длина тела грудины – 78,8% у мужчин и 88,0% у женщин [193].

Уравнения дискриминантных функций, по установлению половой принадлежности, были разработаны А. А. Ahmed et al. (2017) для жителей Саудовской Аравии. Расчетные значения длин рукоятки и тела грудины показали значительный половой диморфизм (точность определения достигала 89,5%) [120].

Используя тонкосрезовые КТ-изображения грудной клетки, Z. Oner et al. (2019) провели исследование по определению половой принадлежности. Оцениваемые параметры (грудинный угол, длина рукоятки и тела грудины, длина мечевидного отростка) рассматривались не путем привычного дискриминантного анализа, а при помощи нейросетевых технологий [198]. Отмечено, что показатели, полученные по результатам использования нейросети, оказались на порядок выше.

В то же время, в североиндийской популяции дифференциация грудины по половому признаку производилась А. Tyagi et al. (2020): наибольшая диморфность была установлена у тела грудины (точность до 95,0%) [170].

По степени сращения манубриостернального и мечевидного сочленений, М. I. Mohammed Ali et al. (2021) установили верную половую принадлежность с точностью в 88,3% [212].

А. А. Ahmed et al. (2021), используя МСКТ-данные грудной клетки, проводили измерения рукоятки грудины [74]. Изначально ими была определена центральная точка в проекции верхней грани рукоятки, через которую проведены две диагонали к краям грудино-ключичных вырезок. Затем составлены модели оценки пола с помощью дискриминантного анализа, применив которые, представилась возможность определения пола с точностью до 79,0-86,0%, а используя регрессионный анализ, – точность варьировалась от 80,5 до 84,9%.

Грудину, как биоиндикатор, определяющий пол в испанской группе населения, изучали Е. Dorado-Fernández et al. (2021) [226]. В исследование был включен большой набор метрических параметров, а также индексы грудины. Последующий дискриминантный анализ установил наиболее значимые половые различия в следующих параметрах: общая длина грудины (точность верного определения пола составила $86,1 \pm 5,7\%$), длина тела грудины ($84,6 \pm 7,5\%$). В том же году Н. Kalbouneh et al. (2021) на основе КТ-изображений грудной клетки иорданской популяции, рассчитали ряд метрических параметров и индексы грудины, согласно которым, точное определение половой принадлежности наблюдалось в $83,6 \pm 1,2\%$ случаев у мужчин и $82,4 \pm 1,2\%$ у женщин [115].

Морфометрические параметры грудины по данным компьютерной томографии, отражены в исследовании М. Ё. Koşar et al. (2022) [191]. Ими было установлено, что для определения половой принадлежности предпочтительными являются общая длина тела грудины, а также сумма длин тела и рукоятки (точность 85%). По данным других авторов точность верной идентификации пола по аналогичным параметрам составляет 90,0% [118]. Наряду с этим, М. Ghorbanlou et al. (2022), путем ретроспективного анализа грудной клетки по данным компьютерной томографии, пришли к выводу, что в иранской популяции наиболее диморфным параметром является общая площадь грудины (установление верной половой принадлежности в $92,3 \pm 2,4\%$ случаев) [134].

Заслуживает внимание исследование F. Türk et al. (2023), посвященное половой идентификации при помощи нейросети (Dual channel fusion CNN) [211]. Выборка включала 300 пациентов, прошедших МСКТ грудной клетки с последующей оценкой следующих параметров: конфигурации рукоятки грудины, оксификации грудино-реберных сочленений, конфигурации мечевидного отростка и оксификации манубриостернального сочленения. Полученные данные подверглись анализу нейросетью, по результатам которого предложены модели, способствующие определению половой принадлежности с точностью до 73,0%.

1.4.2. Возможности установления возраста

Установление возрастной принадлежности имеет первостепенную значимость при формировании биологического профиля неизвестной личности. Анализ исследований по данному направлению показал наличие связи между морфологическими параметрами грудины и возрастом.

Так, в 2021 году R. Shedge et al. были проанализированы КТ-изображения грудной клетки для оценки степени сращения сегментов грудины [65]. При этом, для каждого из отдельных сращений, а также их совокупности, были сформированы модели линейной регрессии, позволяющие провести оценку возраста, погрешность которых составила 1,51-2,86 лет.

При помощи посмертной компьютерной томографии T. Monum et al. (2020) определяли возраст среди японского населения [64]. Исследованию подлежали 320 3D КТ-изображений грудной клетки с последующей оценкой четырех показателей: степени оссификации манубриостерального и мечевидного сочленений, степени окостенения II-VII реберных хрящей на уровне их прикрепления к грудины и ребрам, а также хряща I-го ребра. Авторы уточняют, что бóльшую корреляцию с возрастом в их выборке имеет степень окостенения реберных хрящей на грудинных концах.

Возрастные особенности грудины в тайской популяции изучали A. Kuatrakul et al. (2023) [157]. Исследователями определялась степень сращения сочленений грудины: отмечено, что окостенение манубриостерального сочленения у представителей женского пола начинается в 30 лет, у представителей мужского – в 36, а сращение мечевидного впервые наблюдалось в 30 и 32 года у женщин и мужчин соответственно. Вместе с этим, используя вышеуказанный метод на южноиндийской популяции, M. R. Sahu et al. (2022) показали иные результаты [66]. Оссификация манубриостерального сочленения впервые наблюдалась в 17 лет у представителей женского пола, у мужского – в 24 года, а полное окостенение в 51-60 лет независимо от пола; начальные признаки оссификации ксифостерального сочленения прослеживались в 25 лет у женщин и в 23 года у мужчин; полное сращение мечевидного отростка с телом грудины наблюдалось в 32-40 лет у женщин и в 25-40 лет у мужчин [66].

В средиземноморской выборке проанализировали степень окостенения различных сегментов грудины и их связь с возрастом M. Navadijo et al. (2022) [172]. По результатам исследования было выявлено, что значимая корреляция с возрастом наблюдалась при оценке ксифостерального сочленения.

C. Manoharan et al. (2016) изучали сращение отдельных частей грудины с целью выявления возрастных закономерностей [113]. Полученные результаты свидетельствовали о том, что в отсутствие сращения рукоятки и тела, предполагаемый возраст менее 35 лет у представителей мужского пола и менее 43

лет – у женщин; при наблюдении первых признаков окостенения мечевидного сочленения – возраст более 32 лет у мужчин и более 40 лет у женщин.

G. Bolatlı et al. в 2020 году оценивали степень оссификации (частичная, полная, ее отсутствие) грудины в разных возрастных группах по данным КТ-изображений грудной клетки [121]. Авторами установлено, что более полное окостенение наблюдается в 30-39 лет, частичное – в 20-29 лет, а его отсутствие – в 0-9 лет.

Посредством оценки сращения манубриостерального и ксифостерального сочленений, определение возраста проводили Н. V. Chandrakanth et al. (2012) [114]. Исследование показало, что окостенение мечевидного сочленения отсутствовало в образцах всех грудин до 30 лет, а сращение манубриостерального – обладало большой изменчивостью и у части объектов отсутствовало даже в пожилом возрасте. Тогда же V. Kumar et al. (2012) сравнивали степени сращения анатомических структур грудины [108]. По результатам исследования был сделан вывод, что при окостенении манубриостерального сочленения, предполагаемый возраст превышает 30 лет; при окостенении ксифостерального – больше 35 лет; а при полном сращении манубриостерального и ксифостерального сочленений – свыше 40 лет. Аналогичное исследование проводилось N. Pattamapaspong et al. [70]. Отмечено, что наиболее раннее сращение тела грудины с ее рукояткой у мужчин обнаруживается в 25 лет, у женщин – в 23 года; частичная оссификация манубриостерального сочленения происходит в возрасте 51-59,9 лет, а полная – в 60 лет и более у обоих полов.

Оценка состояния манубриостерального сочленения осуществлялась в работе R. Cameriere et al. (2012) [182]. Как показало исследование, минимальный возраст сращения рукоятки грудины с ее телом составил 37 лет у мужчин и 35 лет у женщин. На этом основании возможно отнести индивида только к двум возрастным группам: до 35-37 и после 35-37 лет.

Грудино-ключичные сочленения в 2024 году изучались L. Secco et al., которые при помощи компьютерной микротомографии определяли дегенеративно-дистрофические изменения на суставных поверхностях сочленений [165].

Обнаруженные при этом изменения продемонстрировали положительную корреляцию с возрастом и для ключичной поверхности сустава, и для грудинной; причем при их совокупной оценке, наблюдалась более сильная корреляция.

D. A. Silajiya et al. (2013) установили возрастные рамки сращения компонентов грудины [184]. У представителей мужского пола сращение мечевидного отростка с телом грудины происходит в 42 года, у женщин – в 44, а сращение манубриостерального сочленения – начиная с 50 лет у мужчин и с 54 лет у женщин. Вместе с этим, в исследовании R. Jaiswal (2018) начальные признаки оксификации сегментов тела грудины были отмечены в 20 лет у обоих полов, а полное окостенение – в $40 \leq$ у мужчин и $45 \leq$ у женщин [153].

1.4.3. Межпопуляционные различия

Известно, что от популяции к популяции наблюдается некоторая вариабельность, касающаяся темпов онтогенеза в разных возрастных группах, что связано с различными адаптационными возможностями, социальными и средовыми факторами [2].

В 2022 году C. V. Rojas et al. провели сравнительное исследование, направленное на выявление популяционных различий в строении грудины [210]. Ими были проанализированы 156 грудин, принадлежащих представителям испанского населения, на предмет морфометрических вариаций, а полученные результаты сравнены с исследованиями на других популяциях: E. Yekeler et al. (2006) [131], R. Bongiovanni et al. (2012) [92], J. Singh et al. (2017) [203], E. Verna et al. (2013) [110], P. García-Parra et al. (2014) [199], H. Bayaroğulları et al. (2014) [122], R. Turkay et al. (2017) [132], N. Gkantsinikoudis et al. (2017) [166], N. Bacci et al. [84], S. Ateşoğlu et al. (2018) [83]. При этом обнаружено, что процессы оксификации манубриостерального сочленения в южноафриканской популяции протекают интенсивнее у представителей мужского пола, в то время как у европейского и азиатского населения – у женщин.

Н. Bayaroğulları et al. (2014) [122] в своем исследовании отметили, что распространенность той или иной формы также имеет популяционные особенности. Например, среди испанцев распространена форма грудины I-го типа (по одному центру окостенения в каждой части), среди турков – II-ой тип (один центр окостенения в рукоятке, по два в теле грудины и мечевидном отростке), а среди африканцев – III-ий тип (по два центра окостенения в каждой части грудины).

Степень развития мечевидного отростка была проанализирована J. Singh et al. (2013) [203]. Согласно их исследованию, у женской половины индийского населения более развит мечевидный отросток, тогда как у французов и испанцев – наоборот [110, 209]. Ими также обобщены результаты исследований, касающиеся непосредственно метрических параметров грудины, проведенные в различных популяциях: D. K. Atal et al. [133] – индийской популяции (Дели), S. Hunnargi et al. [200, 210] – индийской популяции (Махараштра), R. Selthofer et al. [168] – хорватской, C. R. M. M. Torwalt et al. [227] – канадской, E. D. Fernández et al. [105] – испанской, S. U. Ramadan et al. [194] – турецкой, P. J. Macaluso Jr [158] – популяции Претории, R. Bongiovanni et al. [92] – североамериканской, D. Franklin et al. [116] – австралийской. Полученные сведения свидетельствуют о том, что средние значения измеряемых параметров разнились от одной популяции к другой. К тому же, учитывая генетические, социальные и экологические факторы, представляется невозможным экстраполировать одну и ту же методику половозрастной идентификации на различные группы населения.

Н. El-Busaidy et al. (2014) [78], при изучении анатомических особенностей грудины населения Кении, обратили внимание, что полученные ими средние значения метрических параметров кости, отличны от результатов хорватского исследования [168]. Так, у кенийцев максимальная толщина тела грудины определялась на уровне III реберной вырезки, в то время как у хорватов – на уровне V-VI.

А. А. Ahmed et al. (2021) [74] отметили, что при сравнении объема костномозговой полости грудины жителей Судана и Японии [117], последние показали большие значения.

В 2021 году Н. Kalbouneh et al. [115] также коснулись вопроса о межпопуляционных различиях в строении грудины. Авторы сравнили показатели сращения отдельных частей грудины у разных групп населения. В этой связи возникает необходимость проведения процедур по отождествлению личности, используя различные параметры грудины для каждой конкретной популяции. Примером служит исследование, проведенное на египетском населении [192], в котором были задействованы 5 измерений грудины (длина и ширина рукоятки, длина тела, ширина тела на уровне I и III реберных вырезок), позволяющие устанавливать половую принадлежность с точностью до 96,7%. Вместе с этим, в исследованиях на популяциях Западной Австралии [116] и Южной Африки [158] применялись 4 измерения: площадь грудины, суммарная длина рукоятки и тела, длина тела и ширина рукоятки. В этих случаях точность достигала 70,1-95,0%.

Таким образом, становится очевидно, что проведение подобных исследований должно ограничиваться конкретной популяцией, ввиду наличия определенных различий фило- и онтогенеза, опосредованных как генетическими, так и приобретенными заболеваниями, экологическими и социальными факторами.

1.4.4. Влияние факторов внешней и внутренней среды

Метрико-морфологические различия в строении грудины, как было сказано ранее [115, 203], имеют вариабельность среди групп населения.

Генетически детерминированные аномалии развития грудной клетки, в основе которых лежат нарушения остеогенеза, приводят к искажению средних значений измеряемых параметров внутри популяции, что может стать причиной неверной половозрастной идентификации.

Травматические повреждения грудной клетки, инфекционные, дегенеративные заболевания, опухолевые процессы и др. [80, 204] затрудняют визуальную оценку грудины и прилегающих к ней анатомических структур, следствием чего могут стать ошибки в расчетах линейных параметров в конкретных случаях, а также непригодность грудины в качестве объекта судебно-

медицинской идентификации личности. Изменения минеральной плотности кости, происходящие с течением времени, также оказывают влияние на морфологические свойства грудины [111, 169].

J. Wong et al. (2013) был приведен клинический случай пациента с остеопорозом, индуцированным длительным приемом стероидных гормонов [235]. С течением времени, заболевание неуклонно прогрессировало, что, в конечном итоге привело к снижению минеральной плотности грудины и возникновению перелома тела ее нижней трети.

Злоупотребление алкоголем и его пагубное воздействие на плотность костной ткани, отражено в исследовании J. Godos et al. (2022) [76]. Отмечается, что длительное употребление алкоголя приводит к нарушению процессов ремоделирования костей: нарушение регуляции гормонов (витамин Д, лептин и тд.), в том числе снижение уровня эстрогенов, которые обладают остеопротективным действием, и уровня тестостерона, участвующего в производстве остеобластов [123]. Все это повышает риск развития остеопороза, а в далеко зашедших случаях – остеопоротических переломов, включая переломы грудины.

Z. Huang et al. (2012) опубликовали исследование, демонстрирующее взаимосвязь дефицита эстрогенов в постменопаузальный период с изменениями структуры грудины [144]. Вместе с этим, С. Crandall et al. (2021) акцентировали внимание на том, что переломы грудины у темнокожих женщин, имеющих в анамнезе первичные переломы (плеча, бедра и др.), ассоциированные с остеопорозом, возникают на порядок чаще [58].

K. D. J. Jones et al. (2018) в своем исследовании обнаружили распространенность рахита с дефицитом витамина Д среди населения Кении, отметив, что доминирующей причиной развития заболевания является алиментарная недостаточность [232]. Причем у 90% наблюдались поражения стернальных концов ребер, приводящие к деформационным изменениям грудной клетки. Аналогичная ситуация наблюдается и в индийской популяции [160].

Оценку влияния средовых факторов, влияющих на возникновение генетически детерминированных заболеваний, дали С. L. Ackert-Bicknell et al. [55]. Авторы утверждают, что большинство заболеваний, встречающихся у человека, представляют собой результат многокомпонентного взаимодействия генетической предрасположенности и факторов внешней среды. Генотипы всех без исключения людей обладают определенной чувствительностью к воздействию окружающей среды и, в зависимости от нее, по-разному экспрессируются. Таким образом, одни средовые факторы могут стать триггерами возникновения заболеваний, а другие напротив – снизить их риск. Как пример, Индийское исследование, которое свидетельствует о том, что умеренное потребление витамина Д и кальция снижает риск развития остеопороза у предрасположенных к этому индивидов [207].

Резюме

Многообразие зарубежных исследований, направленных на разработку предиктивных моделей, а также модернизацию уже имеющихся, доказывает, что проблема судебно-медицинской ИЛ, в частности установления биологического возраста, не теряет своей актуальности [18]. Благодаря развитию научно-технической сферы судебным медикам стали доступны современные методы медицинской визуализации, а также алгоритмы интеллектуального анализа данных, с помощью которых необходимые измерения проводятся в минимальные сроки, но, тем не менее, с высокой точностью [16, 28]. Несмотря на это, по-прежнему существуют трудности при составлении биологического профиля неопознанных лиц [17, 18].

Одним из перспективных биомаркеров оценки возраста, по мнению ряда авторов, является грудина. При изучении отечественных публикаций, посвященных проблеме ИЛ, отмечено, что на сегодняшний день отсутствуют исследования возрастной морфологии грудины на современной российской выборке. Единственная доступная методика (З. Л. Лаптева [41]) вызывает сомнения с точки зрения актуальности и воспроизводимости, в связи с чем требуется её пересмотр, а также разработка нового подхода с применением современных средств медицинской визуализации.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реализация поставленной цели работы осуществлялась путем проведения наблюдационного ретроспективного поперечного исследования в период 2024-2025 гг. на базе кафедры судебной медицины Института клинической медицины им. Н. В. Склифосовского ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), состоящего из нескольких этапов.

2.1. Материалы исследования

На секционном этапе работы материалом послужили 374 трупа лиц мужского и женского пола (254 и 120 соответственно), погибших в результате различных причин, в анамнезе которых отсутствовали какие-либо задокументированные патологии и аномалии развития со стороны опорно-двигательной системы, а также травматические изменения грудной клетки. Объекты секционного исследования, с возрастным диапазоном 0-99 лет, были разделены на 10 случайных возрастных групп (Таблица 1, Рисунок 1).

Распределение объектов исследования на половозрастные группы представлено в Таблице 2 и на Рисунке 2. Средний возраст выборки составил $49,56 \pm 1,01$ года для мужчин и $57,57 \pm 1,96$ года для женщин (Таблица 3).

Обнаруженные при секционном исследовании аномалии развития тела грудины в виде ее расщелин, для большей объективности, из работы были исключены (2 объекта мужского пола, 1 – женского). Также исключены грудины трупов детей до года (1 объект мужского пола, 1 объект – женского).

Таблица 1 – Возрастная стратификация объектов исследования на секционном этапе исследования [41]

Возрастные группы (лет)	Количество объектов	
	N	%
0-9	2	0,53
10-19	8	2,14
20-29	24	6,42
30-39	61	16,31
40-49	83	22,2
50-59	63	16,85
60-69	71	18,98
70-79	26	6,95
80-89	24	6,42
90-99	12	3,2
Всего:	374	100



Рисунок 1 – Распределение объектов исследования по возрастным группам на этапе секционного исследования

Таблица 2 – Распределение объектов исследования по половозрастным группам [41]

Возраст (лет)	Мужчины	Женщины	Всего
0-9	1	1	2
10-19	6	2	8
20-29	15	9	24
30-39	47	14	61
40-49	64	19	83
50-59	51	12	63
60-69	41	30	71
70-79	17	9	26
80-89	11	13	24
90-99	1	11	12
Всего	120	254	374

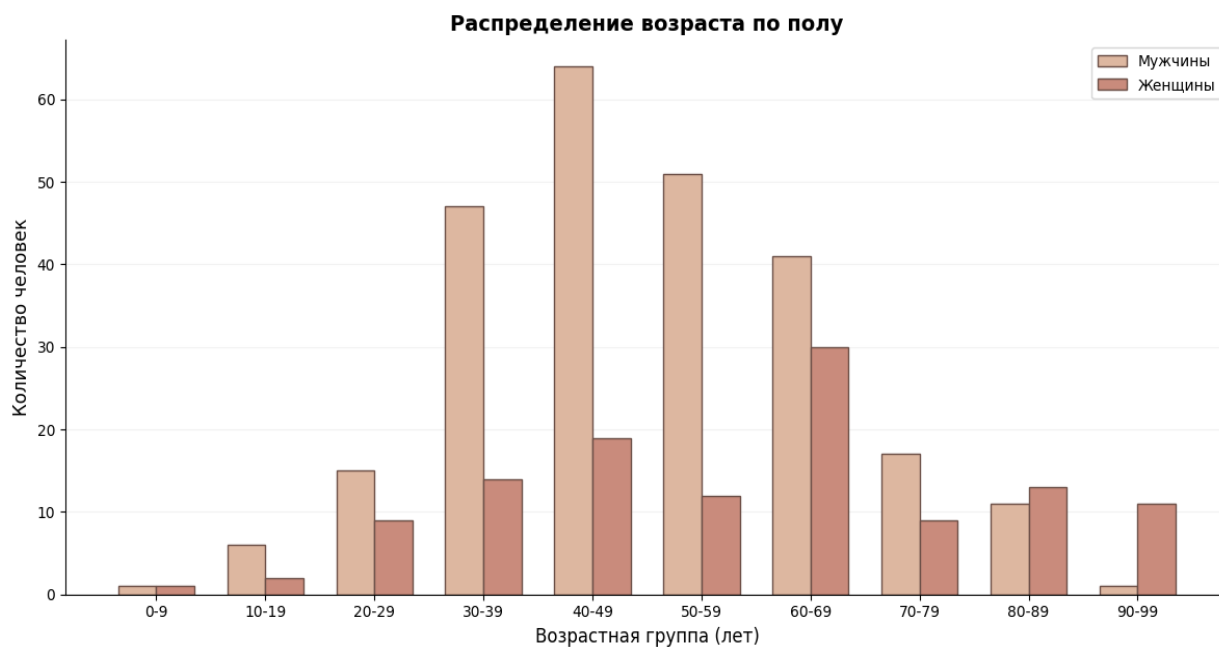


Рисунок 2 – Распределение объектов исследования по половозрастным группам

Таблица 3 – Возрастные характеристики объектов исследования в зависимости от половой принадлежности [41]

Пол	Количество объектов							
	N	%	M	m	σ	Min	Me	Max
М	254	68,02	49,56	1,01	21,51	0	49	94
Ж	120	31,98	57,57	1,96	16,15	0	60	96
Всего:	374	100,0	52,13	0,95	18,4	0	50,5	96

На последующем этапе работы материалом стали обезличенные рентгенографические изображения грудин с фрагментами хрящевых частей ребер от трупов лиц мужского (251) и женского (118) пола, выполненные в отделении медико-криминалистических исследований в ГБУЗ «Бюро судебно-медицинской экспертизы ДЗМ». Сформированные при этом возрастные группы имеют следующий вид (Таблица 4).

Таблица 4 – Распределение объектов исследования по возрастным группам при проведении рентгенографии [41]

Возрастные группы	Количество объектов	
	N	%
12-19	5	1,36
20-29	24	6,5
30-39	61	16,53
40-49	83	22,5
50-59	63	17,07
60-69	71	19,24
70-79	26	7,05
80-89	24	6,5
90-96	12	2,25
Всего:	369	100,0

На этапе оценки возрастной морфологии грудины и грудино-реберных сочленений по результатам мультиспиральной компьютерной томографии объектами исследования стали 175 МСКТ-изображений грудной клетки пациентов в возрасте от 18 до 79 лет, среди которых 50,86% составили мужчины (89), а 49,14 % – женщины (86) (Таблица 5, Рисунок 3) [42]. Материал был получен в отделении лучевой диагностики Университетской клинической больницы № 3 Сеченовского Университета от пациентов, не имеющих диагностированных патологических и травматических изменений костно-хрящевой системы.

Таблица 5 – Распределение объектов исследования по возрастным группам на этапе МСКТ-исследования [42]

Возрастные периоды	Количество объектов	
	N	%
10-19 лет	4	2,3
20-29 лет	25	14,2
30-39 лет	28	16
40-49 лет	28	16
50-59 лет	31	18
60-69 лет	30	17
70-79 лет	29	16,5
Всего:	175	100%

Средний возраст объектов мужского пола составил $50,2 \pm 17,8$ года, женского – $49,9 \pm 17,5$ года. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что сравниваемые группы практически сопоставимы по возрасту, в том числе и среднему, а также по отклонению от среднего (Рисунок 4).

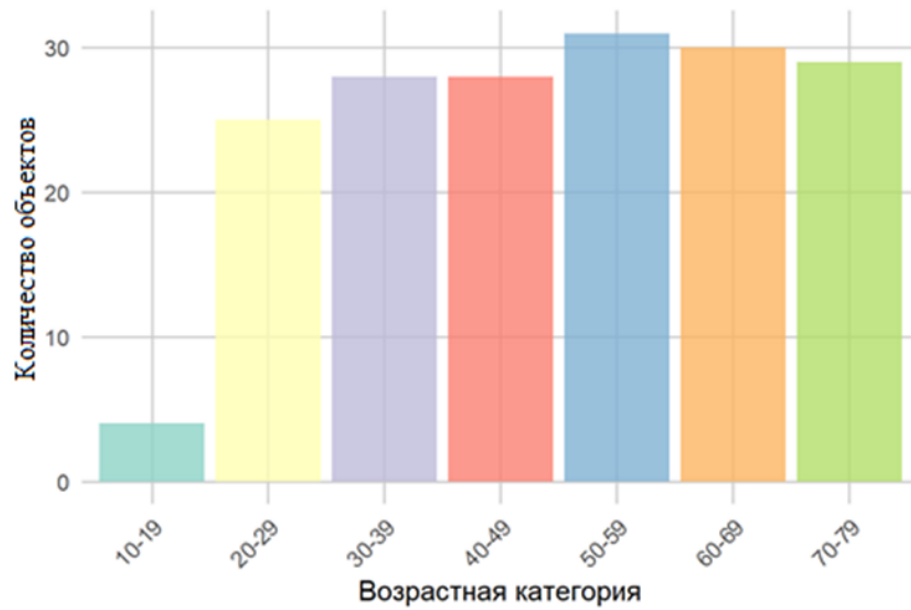


Рисунок 3 – Распределение объектов исследования по возрастным категориям на этапе МСКТ-исследования

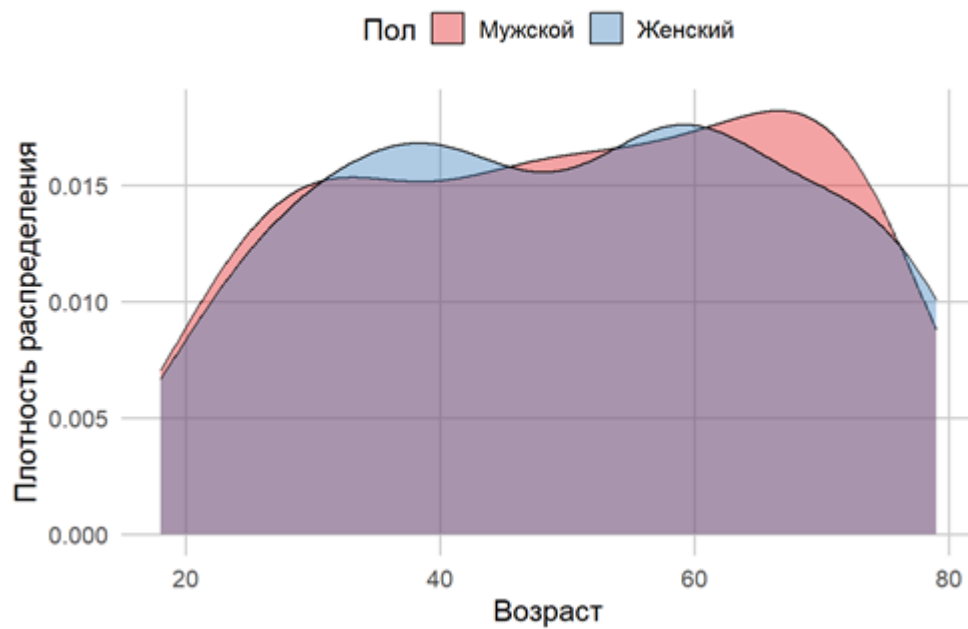


Рисунок 4 – Распределение объектов исследования по полу и возрасту

2.2. Методы исследования

2.2.1. Секционное исследование

Судебно-медицинские вскрытия трупов проводились в соответствии с положениями Приказа Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 12.05.2010 г. № 346-н «Об утверждении порядка организации и производства судебно-медицинских экспертиз в государственных судебно-экспертных учреждениях Российской Федерации» (ныне утративший силу, в связи с изданием Приказа Министерства здравоохранения Российской Федерации от 25.09.2023 № 491н "Об утверждении Порядка проведения судебно-медицинской экспертизы") [35, 36] на базе ГБУЗ Бюро СМЭ ДЗМ Москвы.

Внутренние органы извлекались единым органокомплексом по методу Г. В. Шора, с последующим разделным исследованием по модификации М. Лютеля. Каждое исследование включало обязательный осмотр и изучение трех полостей тела – грудной, брюшной и полости черепа с фиксацией таких признаков, как: правильность анатомического расположения органов в полостях, их макроскопические характеристики (морфологические и морфометрические параметры); при исследовании полых органов – свойства содержимого (объем, консистенция, цвет и др.), а также вид слизистых оболочек. Тщательно осматривалась грудина и прилежащие к ней ребра, грудино-ключичные сочленения на предмет их целостности и аномалий развития грудины (расщелины грудины, отверстия в её теле, синдром Поланда), а также оценивался общий вид грудной клетки на наличие деформаций (*pectus excavatum* и *pectus carinatum*). После отсепаровки мягких тканей грудной области отмечалось наличие или отсутствие опухолей, переломов, в том числе старых, следов оперативных вмешательств. Непосредственное изъятие грудин с хрящевыми фрагментами ребер осуществлялось стандартным путем: реберным ножом пересекались грудино-ключичные сочленения, затем – хрящевые части ребер (при наличии

полностью оссифицированных грудино-реберных сочленений, производился их распил).

2.2.2. Лучевые методы исследования

Традиционная рентгенография. Используемые в работе аналоговые рентгенограммы были выполнены на рентгенографической установке «МобиРенМТ» с трансляцией на пленку «Retina» в следующем режиме работы: напряжение на трубке 68 кВ, сила тока и выдержка 0,64 мАс, фокусное расстояние 50 мм. Рентгенографические изображения исследовали с помощью негатоскопа «Нега-Н-РМ-03» при помощи лупы с увеличением до $\times 6$. Все изображения просматривались на предмет травматических изменений, не попавших в поле зрения на этапе секционного исследования (Рисунок 5) [18].

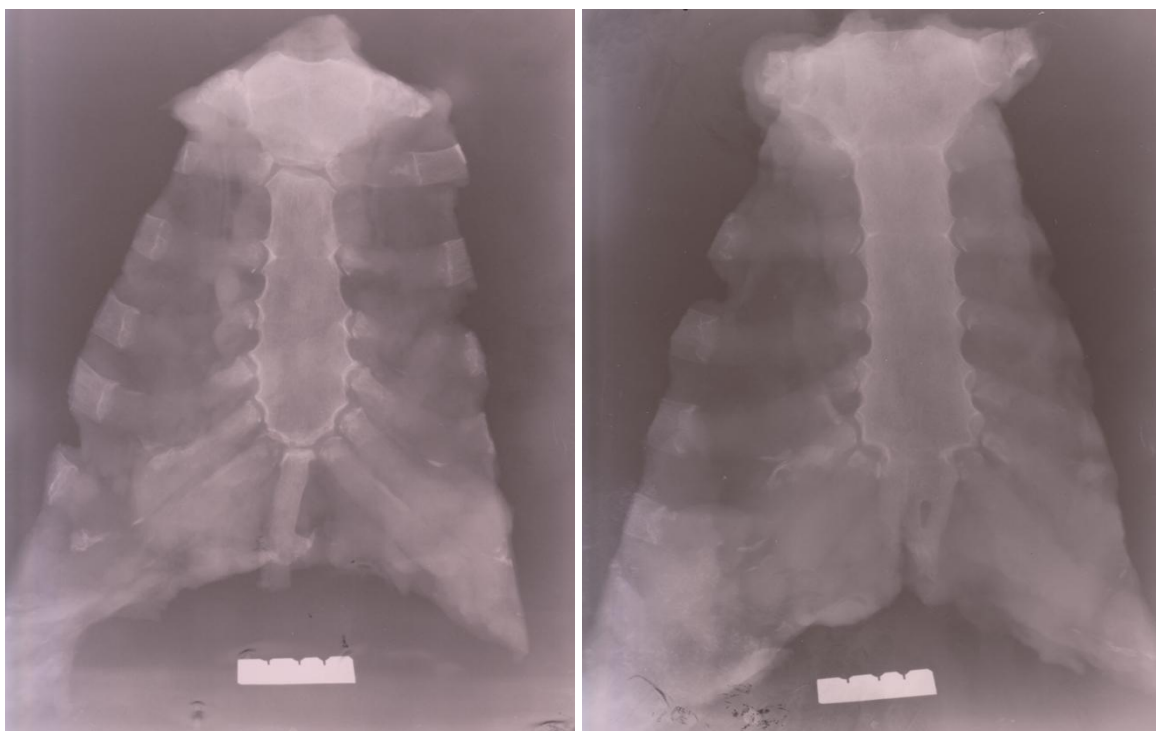


Рисунок 5 – Рентгенограммы грудин с фрагментами хрящевых частей ребер [41]

Сканирование рентгенограмм проводилось на многофункциональном устройстве XEROX CopyCentre C118 с разрешением 600×600 dpi и шагом масштабирования в 1%. Полученные обзорные рентгенографические снимки грудин с фрагментами хрящевых частей ребер сохранены в формат pdf, с присвоением каждому pdf-документу уникального идентификатора по типу «30ж», «30м».

Мультиспиральная компьютерная томография. Томографические изображения грудной клетки были получены с помощью спирального компьютерного томографа CANON (Toshiba) Aguillion One 640, Япония, толщина среза 0,5 мм с 640 срезами. Итоговые снимки были сохранены в формате DICOM, с условными обозначениями по типу «30ж», «30м» [42]. Анонимизация DICOM-файлов, для последующей 3D реконструкции, проводилась путем ручной замены ID, ФИО, даты рождения, пола и возраста пациента, а также даты исследования и учреждения, на базе которого была выполнена томография, с помощью библиотеки PyDicom. Мультипланарная реконструкция МСКТ-изображений выполнялась в программе InVesalius (версия 3.1.1, Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, Кампинас, Бразилия) с импортом всех срезов, во избежание потери качества итоговой 3D-модели. (Рисунок 6).

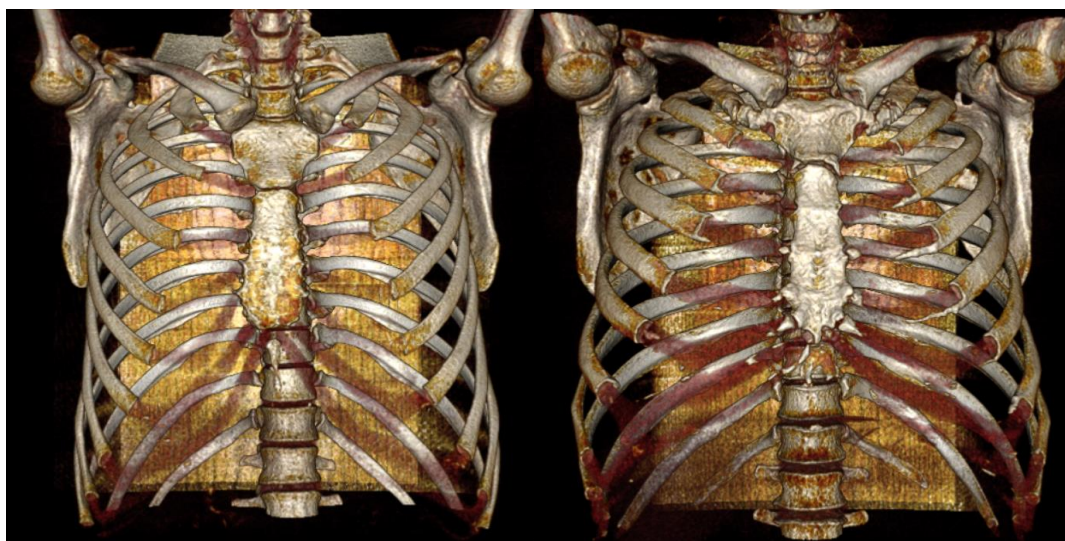


Рисунок 6 – Реконструированные МСКТ-изображения грудной клетки

Реконструированные изображения осматривались на наличие травматических, патологических и послеоперационных изменений, а также инородных тел в проекции грудины и грудино-реберных сочленений (фрагменты кардиостимуляторов и имплантируемых кардиовертеров-дефибрилляторов (ИКС, ИКД) и др.).

2.2.3. Морфометрический анализ

2.2.3.1. Оценка возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по результатам традиционной рентгенографии

Структурные изменения грудины, протекающие с возрастом, оценивалась по комплексу признаков, разработанным, путем рентгенографии и микроскопии нативных объектов, З. Л. Лаптевым [41], включающий:

- полный синостоз рукоятки и тела грудины (A1);
- частичный синостоз рукоятки и тела грудины (A2);
- уплотнение по ходу синостоза (или на сочленяющихся краях тела и рукоятки грудины) (A3);
- полный синостоз сегментов тела грудины (A4);
- частичный синостоз сегментов тела грудины (A5);
- следы сращения сегментов тела грудины (A6);
- полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка (A7);
- частичный синостоз тела грудины и мечевидного отростка (A8);
- уплотнение по ходу синостоза (или на сочленяющихся краях тела и мечевидного отростка) (A9);
- форма реберных вырезок тела грудины (A10);
- наличие уплотнений суставных краев тела грудины (A11);

- наличие очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер (A12);
- глубина вырезок тела грудины более 5 мм (A13);
- наросты на суставных краях тела грудины (A14);
- наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений (A15).

Под следами сращения подразумеваются межсегментарные уплотнения в виде поперечно расположенных линий или щелей, образованные в результате синостозирования отдельных сегментов тела грудины.

Интерпретация признаков A1-A9, A13 и A15 осуществлялась по принципу «наличие/отсутствие», с присвоением, соответственно, 1 или 0 балла; признака A10 – по четырем формам реберных вырезок (фигурная скобка – 0 баллов, треугольная – 1 балл, полулунная – 2 балла, треугольная и полулунная – 3 балла); уплотнение суставных краев тела (A11) – в зависимости от вида уплотнения (очаговое – 1 балл, линейное – 2 балла, полосовидное – 3 балла и отсутствие уплотнений – 0 баллов); A12 – в зависимости от количества пар ребер, в хрящах которых обнаруживались очаги обызвествления (в одной паре ребер – 1 балл, в 2-3 парах ребер – 2 балла, в 4-5 парах ребер – 3 балла, во всех 6 парах ребер – 4 балла, отсутствие очагов обызвествления – 0 баллов); A14 – в зависимости от типа наростов (хрящевые – 1 балл, экзостозы – 2 балла или отсутствие уплотнения – 0 баллов).

2.2.3.2. Оценка динамики возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по результатам мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки

На основе анализа специализированной научной литературы и результатов собственных исследований, был сформирован комплекс МСКТ-признаков,

отражающих степень выраженности возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений [18].

Динамика возрастных изменений костостернальных сочленений (признак СІ).

Оссификация костостернальных сочленений между рукояткой грудины и первыми ребрами оценивалась по четырем последовательным стадиям (1, 2, 3, 4) с присвоением соответствующего балла (1, 2, 3, 4).

Стадия 1: оссификация отсутствует, оба сочленения полностью представлены хрящевым компонентом (1 балл) (Рисунок 7, а).

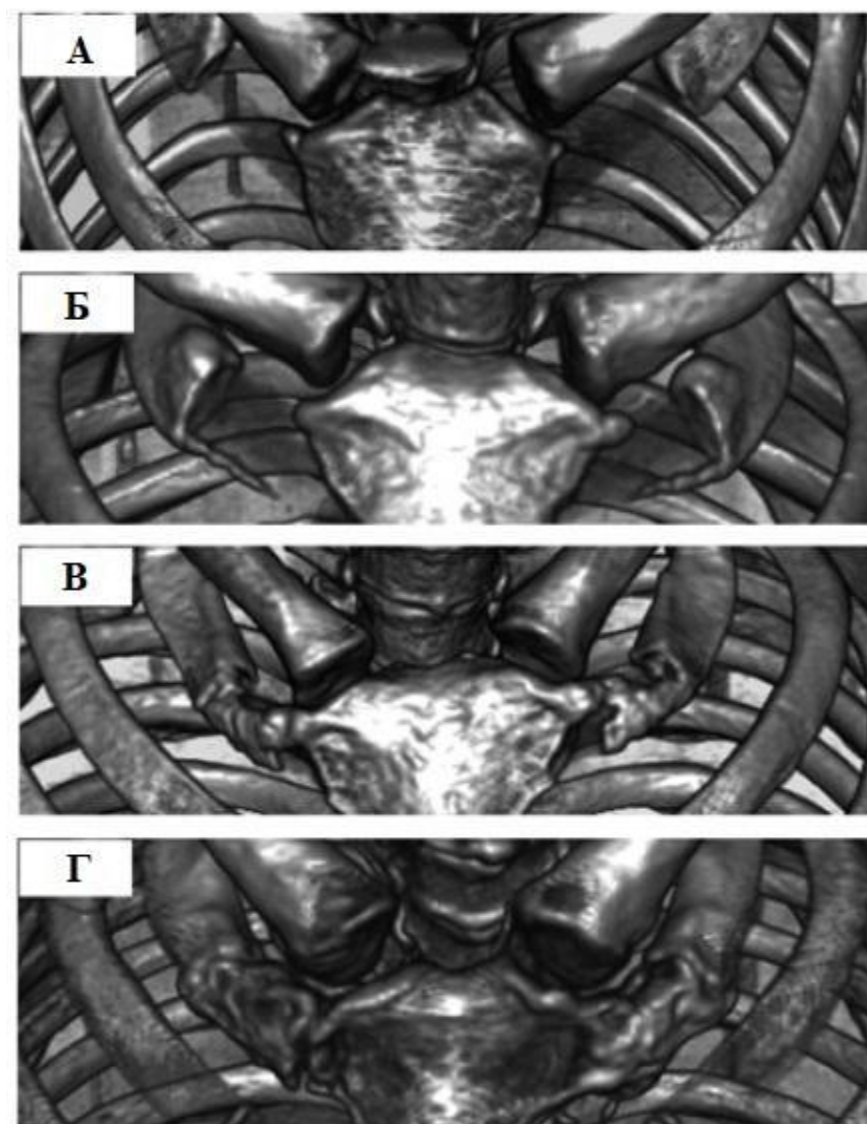


Рисунок 7 – Динамика возрастных изменений костостернальных сочленений (СІ): а) 1 стадия, б) 2 стадия, в) 3 стадия, г) 4 стадия [42]

Стадия 2: частичная оссификация, затрагивающая менее 50% площади (S) хотя бы одного из сочленений (2 балла) (Рисунок 7, б).

Стадия 3: частичная оссификация, затрагивающая 50% и более площади хотя бы одного сочленения ($50\% \leq S < 100\%$) (3 балла) (Рисунок 7, в).

Стадия 4: полное окостенение хотя бы одного сочленения (4 балла) (Рисунок 7, г).

Стадии оссификации манубриостерального сочленения (признак СII).

Балльная оценка оссификации сочленения между телом и рукояткой грудины проводилась в соответствии с тремя стадиями (1 стадия – 1 балл, 2 стадия – 2 балла, 3 стадия – 3 балла).

Стадия 1: оссификация отсутствует, сочленение полностью представлено хрящевым компонентом (Рисунок 8, а).

Стадия 2: частичная оссификация сочленения ($0\% < S < 100\%$) (Рисунок 8, б).

Стадия 3: полная оссификация (сочленение полностью представлено костным компонентом) (Рисунок 8, в).

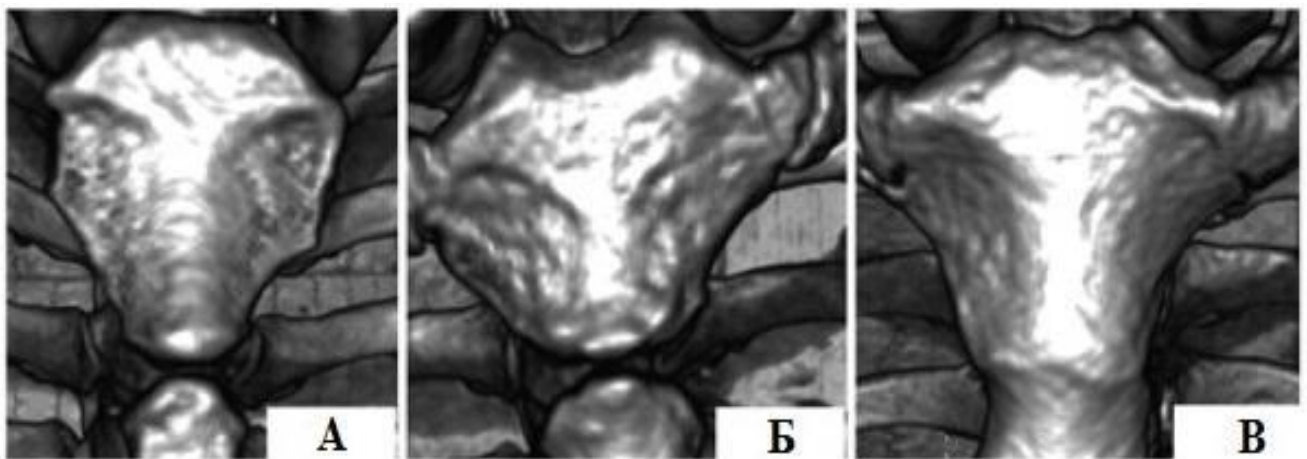


Рисунок 8 – Стадии оссификации манубриостерального сочленения (СII): а) 1 стадия, б) 2 стадия, в) 3 стадия [42]

Стадии оссификации ксифостернального сочленения (СШ).

Возрастные изменения в сочленении между телом грудины и мечевидным отростком оценивались по трехбалльной шкале.

Стадия 1: оссификация отсутствует, сочленение представлено хрящевым компонентом (1 балл) (Рисунок 9, а).

Стадия 2: частичная ($0\% < S < 100\%$) оссификация сочленения (2 балла) (Рисунок 9, б).

Стадия 3: полная оссификация (сочленение полностью представлено костным компонентом) (Рисунок 9, в).

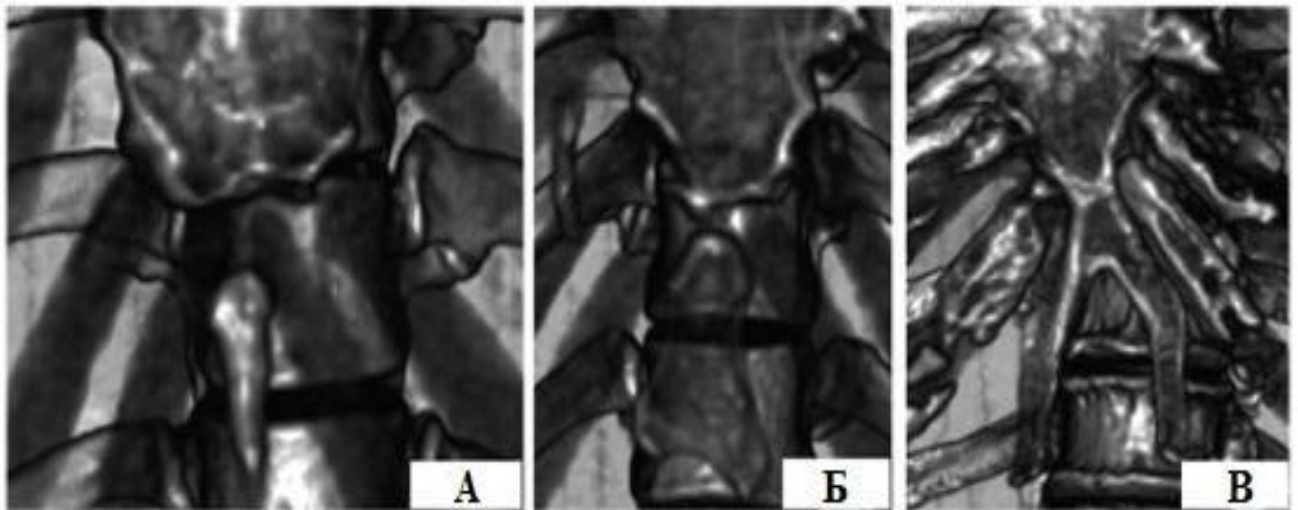


Рисунок 9 – Стадии оссификации ксифостернального сочленения (СШ): а) 1 стадия, б) 2 стадия, в) 3 стадия [42]

Стадийность возрастных изменений костостернальных сочленений (признак CIV).

Возрастные изменения в костостернальных сочленениях (между реберными вырезками тела грудины и 2-7 парами ребер) представлены следующими стадиями.

Стадия 1: оссификация отсутствует во всех 6 парах грудино-реберных сочленений (1 балл) (Рисунок 10, а).

Стадия 2: частичная оссификация, затрагивающая не более 50% хотя бы одного из сочленений (2 балла) (Рисунок 10, б).

Стадия 3: частичная оссификация, затрагивающая 50% и более площади хотя бы одного сочленения, но не достигающая его центральной части (3 балла) (Рисунок 10, в).

Стадия 4: частичная оссификация, затрагивающая 50% и более площади хотя бы одного сочленения и достигающая его центральной части, а также полная оссификация хотя бы одного из сочленений (4 балла) (Рисунок 10, г).

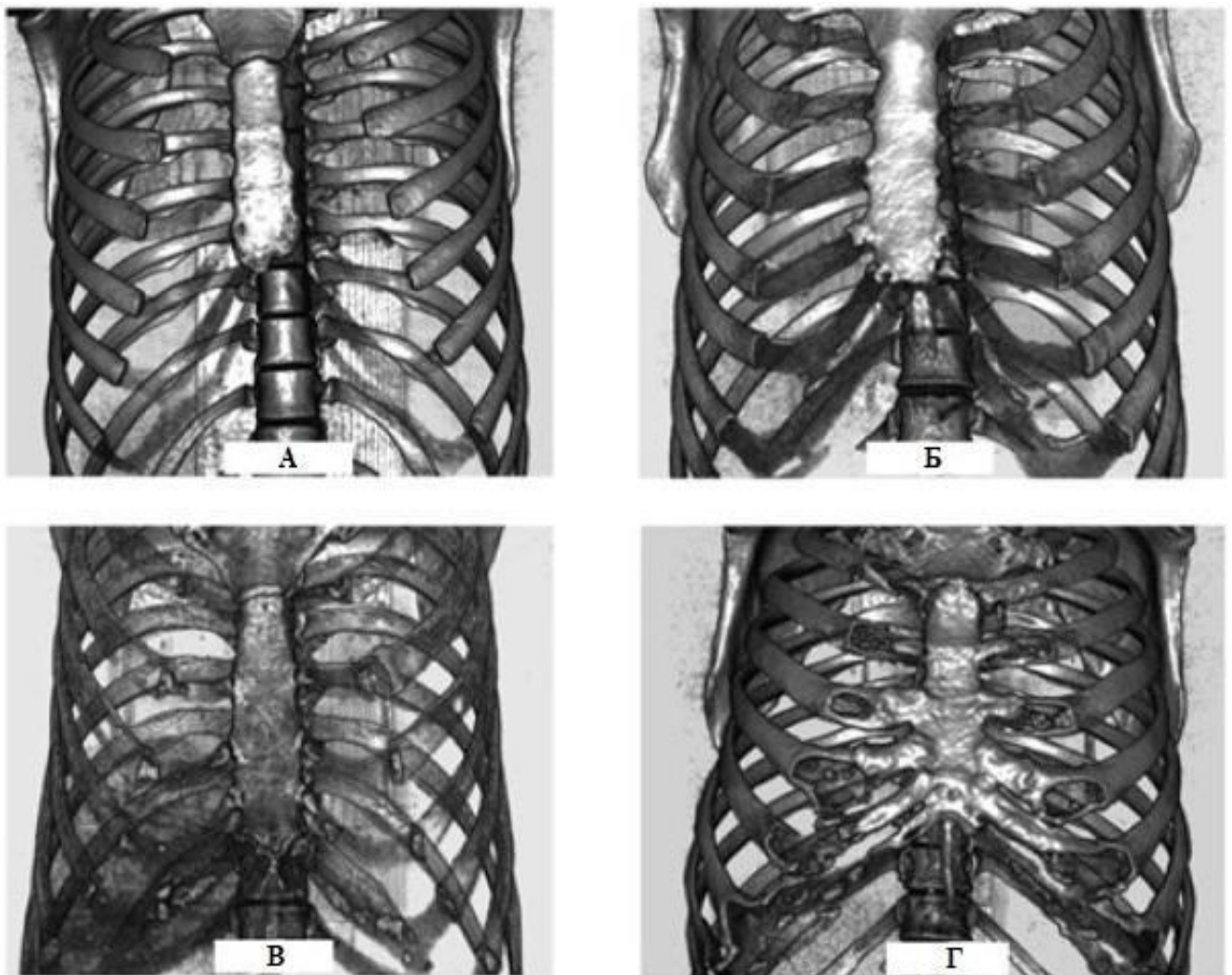


Рисунок 10 – Возрастные изменения костостернальных сочленений (CIV): а) 1 стадия, б) 2 стадия, в) 3 стадия, г) 4 стадия [42]

Учитывая, что интерпретируемые на данном этапе признаки имеют дискретные количественные значения, для дальнейшего анализа они представлены медианой с 1 и 3 квартилем (Me, Q1-Q3) (Таблица 6).

Таблица 6 – Половые различия количественных характеристик признаков CI-CIV

Пол	CI (Q1-Q3)	СИ (Q1-Q3)	СП (Q1-Q3)	CIV (Q1-Q3)
М	3 (2-3)	2 (2-2)	3 (2-3)	2 (2-3)
Ж	3 (3-3)	2 (2-3)	3 (2-3)	2 (2-3)

2.2.4. Методы статистического анализа

Описательная и аналитическая статистики с формированием модели установления возраста на основе оценки возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по результатам традиционной рентгенографии выполнялись с помощью программных обеспечений IBM SPSS Statistics (версия 21, IBM Corp., Армонк, Нью-Йорк, США) и Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corp., Редмонд, Вашингтон, США) с расчетом следующих показателей: среднее арифметическое (M), стандартная ошибка среднего (m), среднеквадратичное отклонение (σ), минимальное значение (Min), медиана (Me), максимальное значение (Max), доверительный интервал (ДИ), критерий Манна-Уитни (U), критерий Колмогорова-Смирнова (KC), коэффициент корреляции Пирсона (r), а также проведением однофакторного дисперсионного (ANOVA) и регрессионного анализа (линейная регрессия), результаты сравнений считались достоверными при уровне значимости $p < 0,05$. Формирование базы данных, проведение статистического анализа при оценке возрастной морфологии грудины и грудино-реберных сочленений по результатам МСКТ, а также разработка математической модели установления возраста, осуществлялись в: Microsoft Excel 2021 для Mac (версия 16.80, Microsoft Corp., Редмонд, Вашингтон, США); Numbers Apple (версия 14.1, Apple Inc., Купертино, Калифорния, США); библиотеке Scikit-learn (версия 1.7.0, INRIA, Франция). Для описательной статистики, использованы: M , m , σ , Min , Me , Max , а также медиана с 1-3 квартилем ($IQR = Q_3 - Q_1$). Элементом аналитической статистики при этом является регрессионный анализ (линейная регрессия) с расчетом коэффициента детерминации (R^2), отражающего предсказательную способность модели, а также среднеквадратичной ошибки

(MSE), средней абсолютной ошибки (MAE) и средней абсолютной процентной ошибки (MAPE). Межэкспертная вариабельность определялась путем расчета коэффициента каппы-Коэна (k). Показатели качества модели установления возраста, на основе методов машинного обучения: точность классификации (Accuracy (acc)), функция потерь (Val loss), среднее значение функции потерь (Train loss), F1-score (гармоническое среднее между точностью и полнотой, отражает качество модели), средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации (R^2).

2.2.5. Методы AI-анализа данных

Последовательность действий на данном этапе представлена следующим образом. Вначале осуществлялась предобработка МСКТ-изображений: анонимизация исходных DICOM-файлов, конвертация в NIfTI формат, их мультипланарная реконструкция, переориентация, ресемплинг до единого размера вокселя, а также нормализация диапазона плотностей. Подобная предобработка позволяет привести имеющийся массив к единому виду, минимизировать влияние артефактов изображений и их технических различий, чтобы, в конечном итоге, получить сопоставимые данные.

Далее в программном обеспечении InVesalius 3.1.1 проводилась ручная сегментация зон интереса, соответствующих признакам CI, CII, CIII, CIV, и формирование базы данных, включающей 875 3D фрагментов (по 175 на каждый МСКТ-признак). Каждый из 3D-фрагментов анализировался и сопоставлялся с табличными значениями экспертной оценки стадий оссификации стернальных и грудино-реберных сочленений. Подаваемые для последующего обучения данные включали по одному трехмерному NIfTI-фрагменту для признаков CI-CIII и по два – для признака CIV.

После анонимизации, нормализации и сличения с таблицей экспертной оценки, итоговый датасет выглядит следующим образом (Таблица 7).

Задача машинного обучения в настоящей работе – многозадачная классификация. Целевая переменная – категориальная, принимающая дискретные значения (1, 2, 3, 4), соответствующие экспертной оценке стадий синостозирования стернальных и грудино-реберных сочленений. По признакам CI и CIV 4 класса, по признакам CII и CIII – 3 класса.

Таблица 7 – Структура итогового датасета для обучения нейросетевой модели

Поле датасета	Содержание
Id	Уникальный идентификатор пациента
ct_path	Путь к нормализованному полному МСКТ-изображению в формате NIfTI
c1_path, c2_path, c3_path	Пути к ROI-фрагментам признаков CI, CII, CIII
c4a_path, c4b_path	Пути к ROI-фрагментам признака CIV
c1, c2, c3, c4	Экспертные балльные оценки стадий оссификации
Итог	175 полностью подготовленных наблюдений для пилотного обучения

При выполнении исследования построена многовходовая 3D-сверточная модель с входными ветвями: 3D-фрагменты CI, CII и CIII, а также отдельная ветвь для CIV с подачей фрагментов в виде двухканального трехмерного входа. В каждой из ветвей 3D-сверточный энкодер выделял пространственные признаки соответствующей зоны интереса с последующим объединением в общий вектор. На выходе располагались четыре классификационных блока для каждого признака.

Обучение осуществлялось на базе библиотеки PyTorch, функция потерь для каждого из признаков рассчитывалась отдельно с использованием CrossEntropyLoss с последующим суммированием полученных значений. Ввиду неравномерного распределения стадий оссификации стернальных и грудино-реберных сочленений, учитывались весовые коэффициенты классов. Качество классификации оценивается по Accuracy, macro F1-score и матрицам ошибок отдельно для CI, CII, CIII, CIV и MAE (после подстановки предсказанных балльных значений признаков в регрессионное уравнение).

Предобработка данных выполнялась на языке программирования Python с использованием библиотек PyDicom (для чтения и анонимизации DICOM-файлов), SimpleITK (для чтения DICOM-серий, преобразования их в трехмерные изображения, стандартизации ориентации, ресемплинга трехмерных изображений), а также NiBabel для дополнительной проверки и работы с NIfTI-файлами. Численная обработка данных проводилась в библиотеках NumPy (работа с массивами изображений и нормализация интенсивности) и Pandas (структурирование и анализ табличных данных, содержащих идентификаторы пациентов, их возраст и балльную интерпретацию признаков CI-CIV).

Разработка и первичное тестирование модели проводились в среде Visual Studio Code, для обучения и оценки использовались PyTorch, Scikit-learn, Matplotlib и tqdm (Рисунок 11).

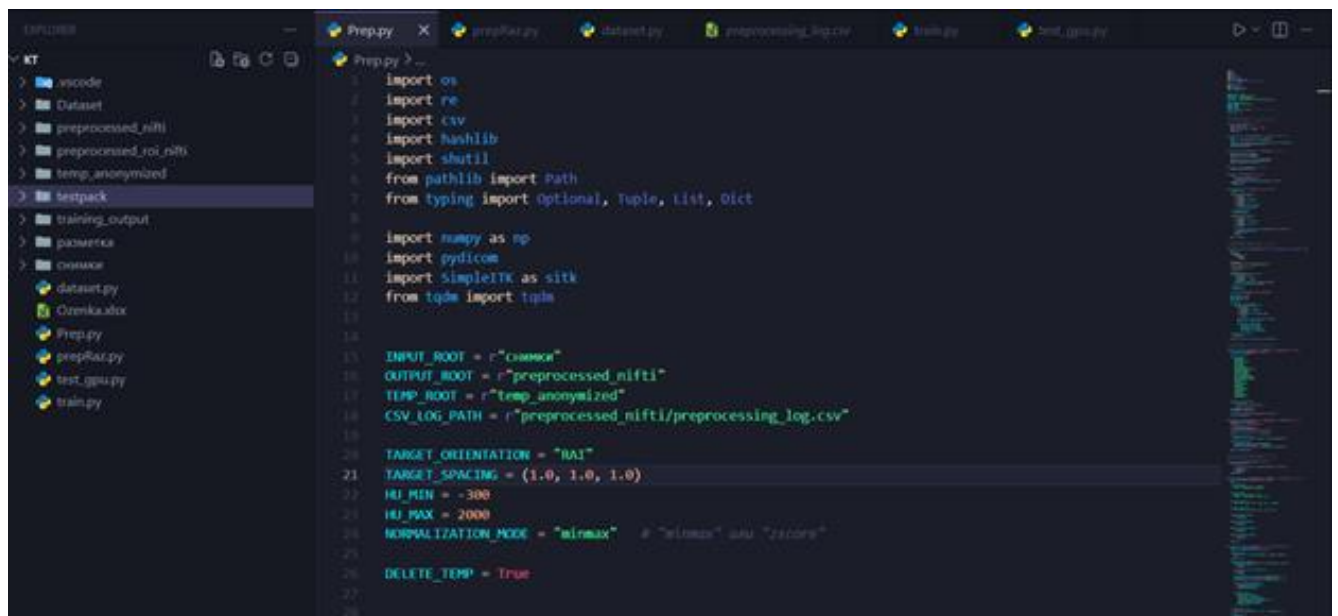


Рисунок 11 – Рабочее окружение разработки и предобработки данных в Visual Studio Code

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗРАСТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГРУДИНЫ И ГРУДИНО-РЕБЕРНЫХ СОЧЛЕНЕНИЙ

3.1. Результаты исследования грудины и грудино-реберных сочленений при помощи традиционной рентгенографии

По результатам проведенного статистического анализа была определена частота встречаемости рентгенологических признаков, интерпретируемых как «наличие/отсутствие признака» (Таблица 8, Рисунок 12) [41].

Таблица 8 – Частота встречаемости признаков типа да/нет

Rg-признаки возрастных изменений грудины	Доля	95%-ный доверительный интервал	
		от	до
Полный синостоз рукоятки и тела грудины	17,47%	14,00%	21,43%
Частичный синостоз рукоятки и тела грудины	27,69%	23,45%	32,26%
Уплотнение по ходу синостоза между рукояткой и телом грудины	89,52%	86,25%	92,21%
Полный синостоз сегментов тела грудины	94,89%	92,46%	96,69%
Частичный синостоз сегментов тела грудины	4,03%	2,48%	6,23%
Следы сращения сегментов тела грудины	20,70%	16,94%	24,89%
Полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка	52,57%	47,61%	57,50%
Частичный синостоз тела грудины и мечевидного отростка	19,29%	15,64%	23,41%
Уплотнение по ходу синостоза между телом грудины и мечевидным отростком	68,75%	64,02%	73,20%
Глубина вырезок тела грудины более 5 мм	47,01%	42,09%	51,98%
Наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений	20,27%	16,54%	24,44%

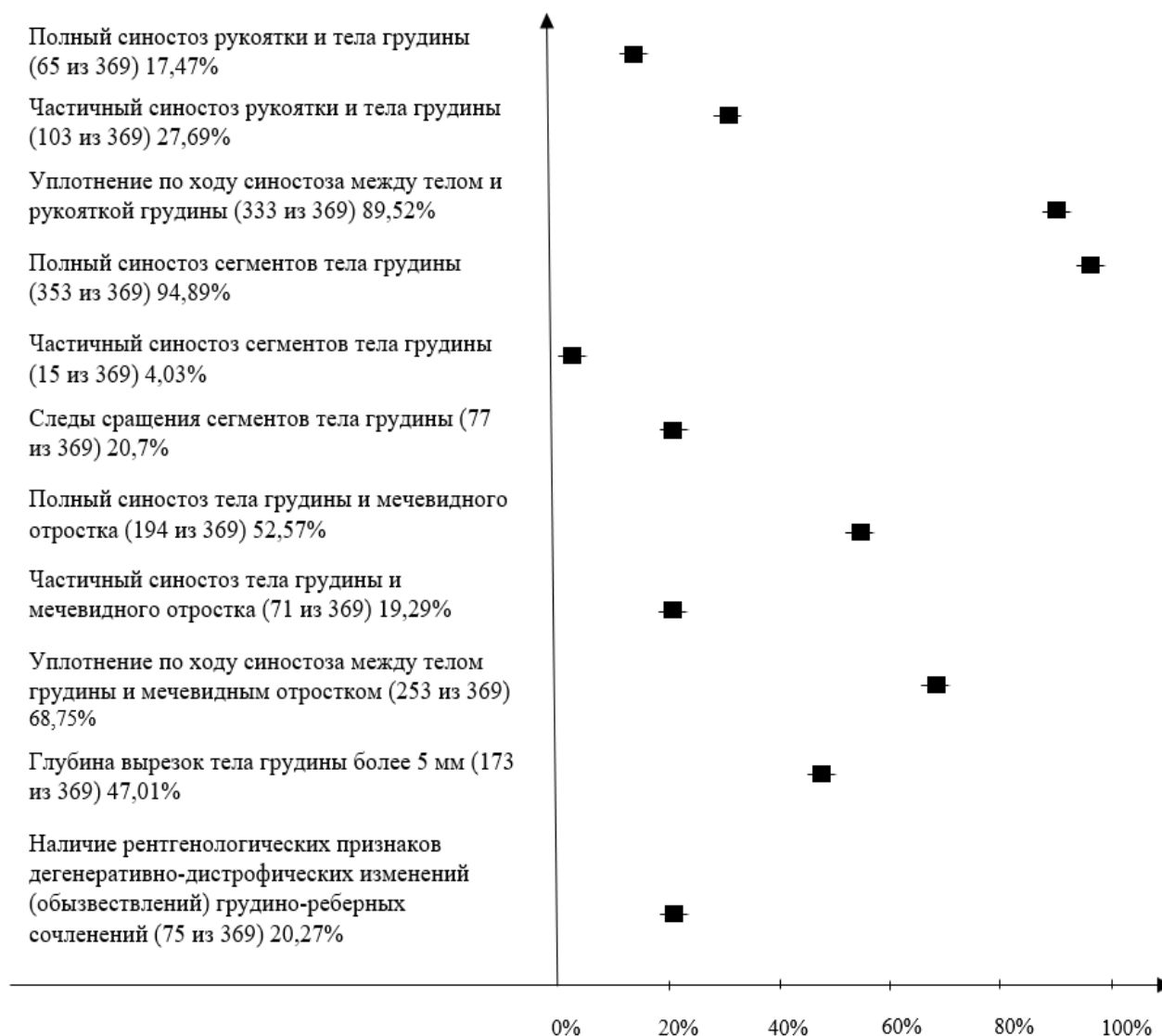


Рисунок 12 – Графическое изображение частоты встречаемости признаков типа да/нет

Помимо этого, графические изображения, представленные на Рисунках 13-16 демонстрируют частоты встречаемости следующих признаков: форма реберных вырезок тела грудины, наличие уплотнений суставных краев тела грудины, наличие очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер, наросты на суставных краях тела грудины.

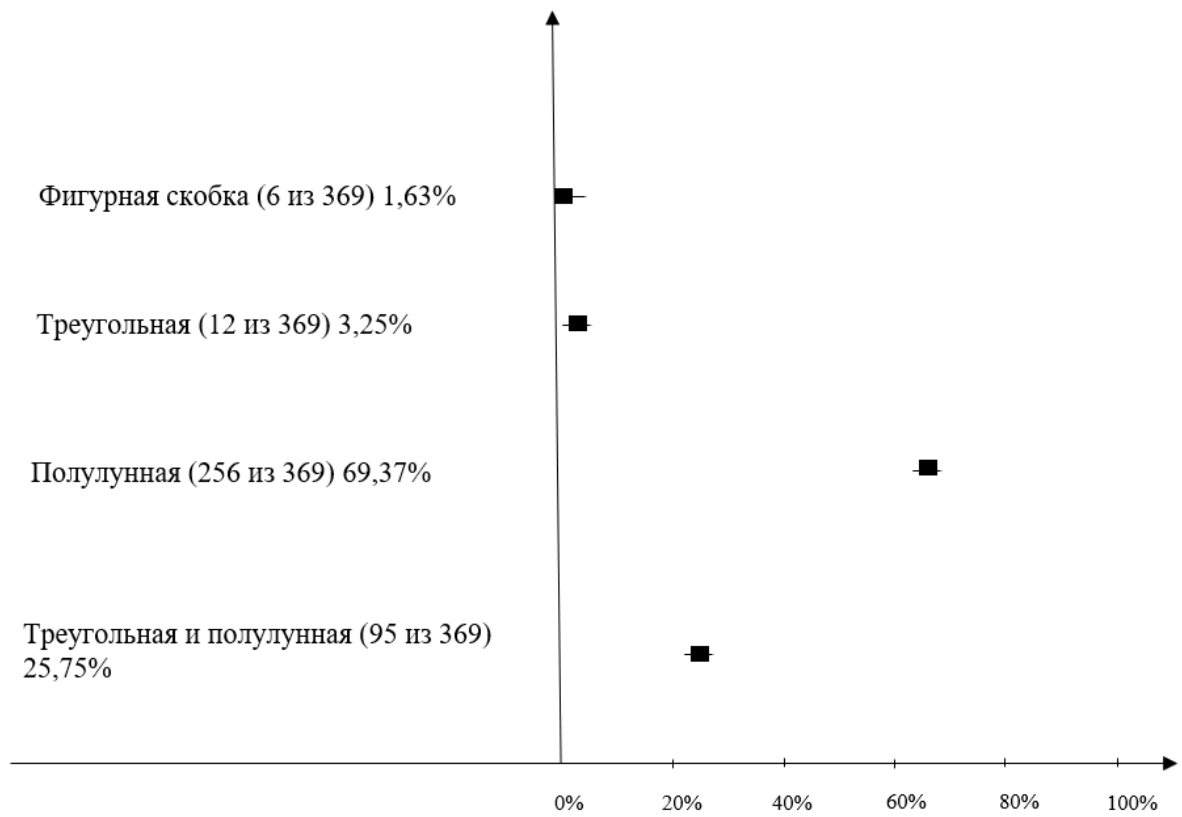


Рисунок 13 – Частота встречаемости форм реберных вырезок

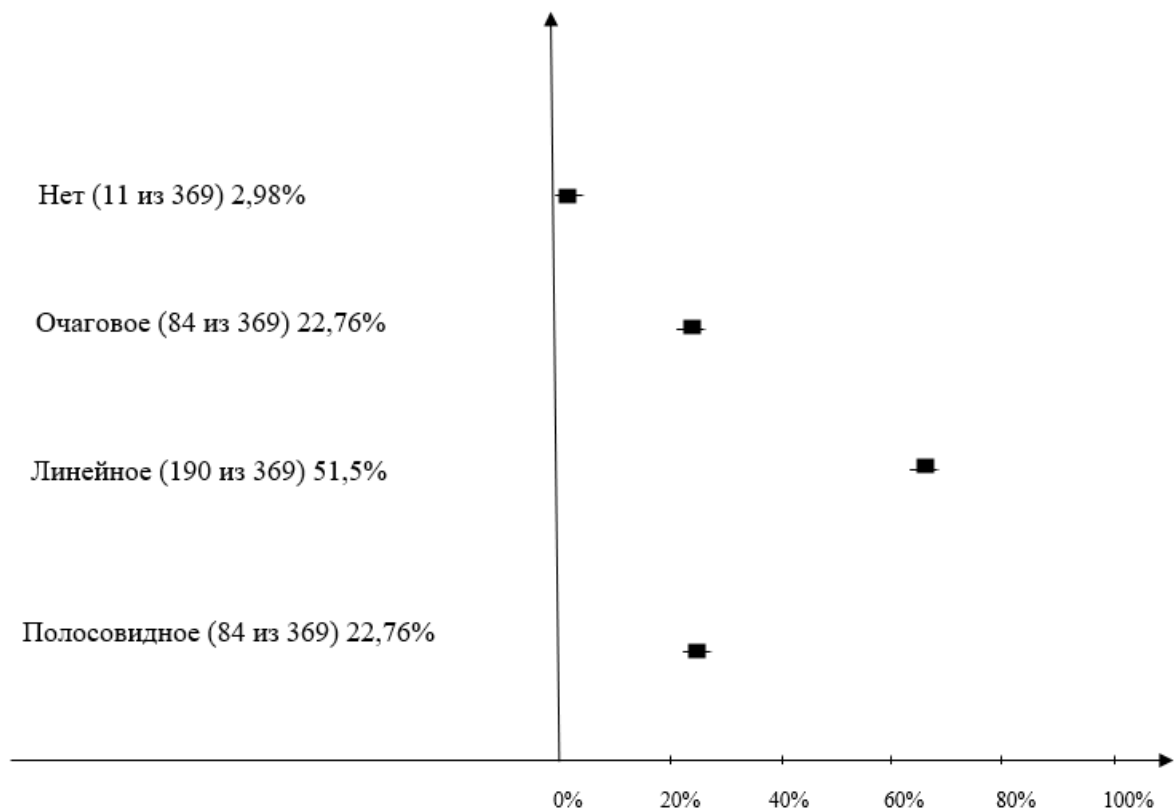


Рисунок 14 – Частота встречаемости вариантов уплотнений суставных краев тела грудины

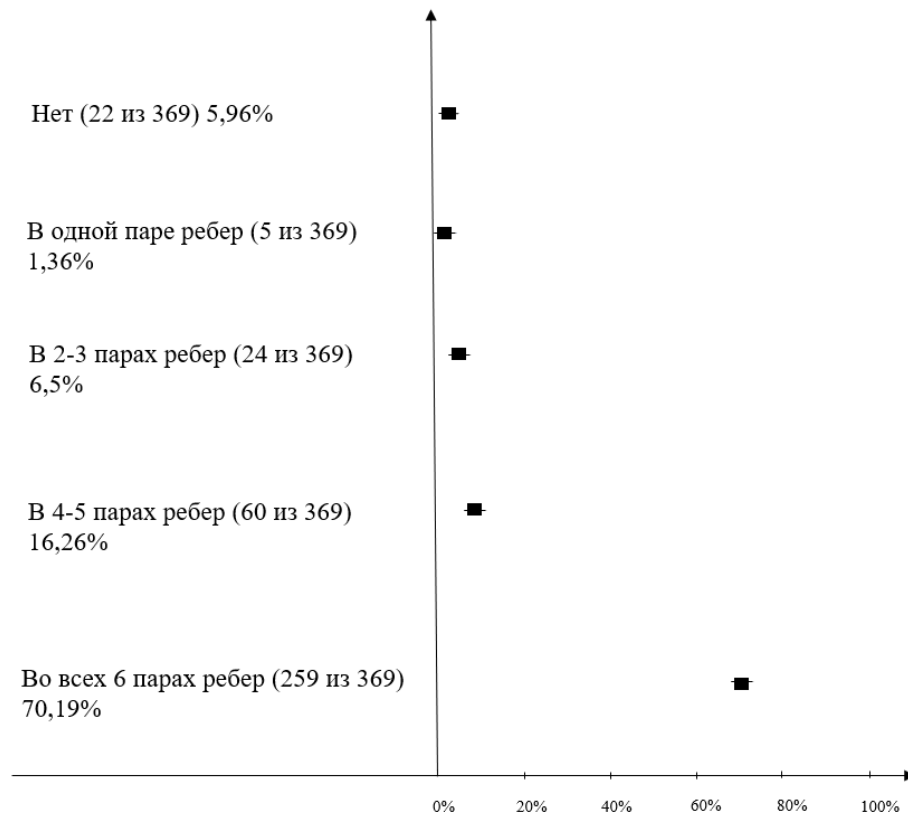


Рисунок 15 – Частота встречаемости наличия очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер

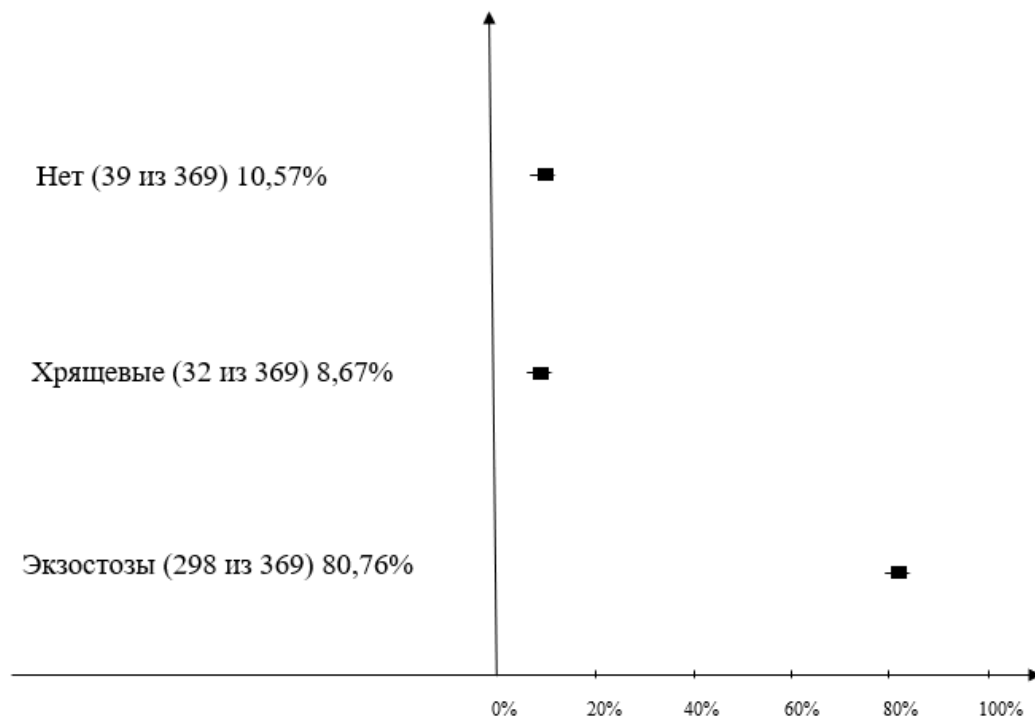


Рисунок 16 – Частота встречаемости видов наростов на суставных краях тела грудины

Проведенный однофакторный дисперсионный анализ показал следующие значения в отношении связи морфологических признаков грудины и грудино-реберных сочленений с возрастом (Таблица 9). Из данной таблицы следует следующее: переменные типа «частичное наличие» (частичный синостоз рукоятки и тела, частичный синостоз сегментов тела, частичный синостоз тела и мечевидного отростка) имеют слабую связь с возрастом. Это связано с тем, что наличие этого признака сравнивается с суммой более сильного наличия и отсутствия, поэтому для проведения дальнейшего регрессионного анализа подобные признаки объединены и приобретают вид: «полный синостоз рукоятки и тела грудины (A1)», «полный синостоз сегментов тела грудины (A4)» и «полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка (A7)» соответственно [41].

Подобным образом проанализированы признаки A10 (форма реберных вырезок тела грудины), A11 (наличие уплотнений суставных краев тела грудины), A12 (наличие очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер), A14 (наросты на суставных краях тела грудины) с их дальнейшей линеаризацией (Таблицы 10-13) [41].

Таблица 9 – Возраст в зависимости от переменных типа да/нет

Признак	Нет			Да			p		
	N	M	m	N	M	m	Cреднего	KC	U
Полный синостоз рукоятки и тела грудины (A1)	304	50,77	1,016	65	59,12	2,425	0,001	0,024	0,004
Частичный синостоз рукоятки и тела грудины (A2)	266	51,45	1,075	103	54,25	1,985	0,189	0,057	0,348
Уплотнение по ходу синостоза между рукояткой и телом грудины (A3)	36	48,65	3,597	333	52,65	0,977	0,199	0,428	0,418
Полный синостоз сегментов тела грудины (A4)	16	27,65	4,125	353	53,55	0,929	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Частичный синостоз сегментов тела грудины (A5)	354	53,04	0,952	15	32,87	4,507	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Следы сращения сегментов тела грудины (A6)	292	53,5	1,035	77	47,36	2,265	0,009	0,008	0,006
Полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка (A7)	175	44,41	1,232	194	59,65	1,214	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Частичный синостоз тела грудины и мечевидного отростка (A8)	298	53,36	1,096	71	48,72	1,777	0,054	0,145	0,034
Уплотнение по ходу синостоза между телом грудины и мечевидным отростком (A9)	115	54,29	2,167	253	51,63	0,973	0,196	0,009	0,226
Глубина вырезок тела грудины более 5 мм (A13)	195	50,43	1,356	173	55,29	1,234	0,009	0,001	0,002
Наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений (A15)	294	48,01	0,975	75	69,08	1,687	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Примечание: KC – критерий Колмогорова-Смирнова, U – критерий Манна-Уитни

Таблица 10 – Возраст в зависимости от формы реберных вырезок

Форма реберных вырезок	N	M	m	σ	Min	Me	Max
Фигурная скобка	6	22,83	1,99	4,88	18	22	30
Треугольная	12	41	6,51	22,54	19	34,5	96
Полулунная	256	54,68	1,11	17,70	16	53	95
Треугольная и полулунная	95	50,8	1,62	15,76	19	50	91
Всего	369	52,71	0,93	17,86	16	51	96

Таблица 11 – Возраст в зависимости от уплотнения суставных краев тела

Уплотнение суставных краев тела	N	M	m	σ	Min	Me	Max
Нет	11	19,18	1,10	3,66	12	19	26
Очаговое	84	42,85	2,05	18,78	19	36,5	96
Линейное	190	53,97	1,05	14,50	25	52	92
Полосовидное	84	63,12	1,70	15,66	29	63	94
Всего	369	52,51	0,94	18,02	12	51	96

Таблица 12 – Возраст в зависимости от наличия очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер

Наличие очагов обызвествления в грудинном конце 2-7-го ребер	N	M	m	σ	Min	Me	Max
Нет	22	22,41	1,01	4,74	12	22	30
В одной паре ребер	5	29,4	2,66	5,94	24	27	38
В 2-3 парах ребер	23	36,33	1,81	8,86	21	33,5	65
В 4-5 парах ребер	60	45,48	1,96	15,16	24	43	92
Во всех 6 парах ребер	259	58,64	0,97	15,53	18	58	96
Всего	369	52,51	0,94	18,02	12	51	96

Параметр A14 (наросты на суставных краях тела грудины), имеет линейный характер связи, что отражено в Таблице 13. В этой связи, необходимость для проведения линеаризации при регрессионном анализе отсутствует.

Таблица 13 – Возраст в зависимости от наростов на суставных краях тела

Наросты на суставных краях тела	N	M	m	σ	Min	Me	Max
Нет	39	25,79	1,13	7,06	12	25	44
Хрящевые	32	42,81	2,84	16,08	24	40	91
Экзостозы	298	57,04	0,90	15,64	30	56	96
Всего	369	52,51	0,94	18,02	12	51	96

Проведение корреляционного анализа позволило выявить корреляционные связи между исследуемыми параметрами и возрастом, с учетом предшествующей перенумерации (Таблица 14) [41].

Таблица 14 – Корреляционные связи параметров грудины с возрастом

Параметр грудины	Коэффициент корреляции с возрастом (r)	p	N
Наросты на суставных краях тела грудины (A14)	0,6	< 0,001	369
Наличие очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер (A12)	0,6	< 0,001	369
Уплотнение суставных краев тела грудины (A11)	0,5	< 0,001	369
Наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений (A15)	0,5	< 0,001	369
Полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка (A7)	0,4	< 0,001	369
Полный синостоз сегментов тела грудины (A4)	0,3	< 0,001	369
Форма реберных вырезок тела грудины (A10)	0,3	< 0,001	369
Полный синостоз рукоятки и тела грудины (A1)	0,2	< 0,001	369
Пол	-0,2	< 0,001	369
Глубина вырезок тела грудины более 5 мм (A13)	0,1	0,009	369
Следы сращения сегментов тела грудины (A6)	-0,1	0,009	369
Уплотнение по ходу синостоза тела грудины и мечевидного отростка (A9)	-0,07	0,196	369
Уплотнение по ходу синостоза рукоятки и тела грудины (A3)	-0,07	0,199	369

Исходя из этого, выделены признаки, обладающие максимальными значениями коэффициента корреляции: наросты на суставных краях тела грудины (A14) ($r = 0,6$); наличие очагов обызвествления в грудинном конце 2-7-го ребер (A12) ($r = 0,6$); уплотнение суставных краев тела грудины (A11) ($r = 0,5$); Наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений (A15) ($r = 0,5$); полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка (A7) ($r = 0,4$). Используя метод линейной регрессии, были получены регрессионные коэффициенты, представленные в Таблице 15 [41, 44].

Результатом последующего анализа стала возможность разработки экспертной модели линейной регрессии определения возраста неизвестного индивида в виде математического уравнения:

$$\text{ExpAGE} = 0,426 + 0,411 \times A12 + 4,233 \times A14 + 0,43 \times A11 + 12,477 \times A15 + 3,189 \times A7 - 8,43 \times G,$$

где ExpAGE (expected age) – предполагаемый возраст человека,

A12 – наличие очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер (если нет – 22,41; если в одной паре ребер – 29,4; если в 2-3 парах ребер – 36,33; если в 4-5 парах ребер – 45,48; если во всех шести парах ребер – 58,64);

A14 – наросты на суставных краях тела грудины (если нет – 0; если хрящевые – 1; если экзостозы – 2);

A11 – уплотнение суставных краев тела грудины (если нет – 19,18; если очаговое – 42,85; если линейное – 53,97; если полосовидное – 63,12);

A15 – наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений (если нет – 0; если есть – 1);

A7 – синостоз тела грудины и мечевидного отростка (если нет – 0; если частичный – 1; если полный – 2);

G – пол (если женский – 0; если мужской – 1) [41, 44].

Таблица 15 – Коэффициенты линейной регрессии

	В	Стандартная ошибка	β	t	p
Константа	0,426	4,348		0,098	0,922
Наличие очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер	0,411	0,093	0,239	4,432	< 0,001
Наросты на суставных краях тела грудины	4,233	1,494	0,15	2,832	0,005
Уплотнение суставных краев тела грудины	0,43	0,088	0,213	4,907	< 0,001
Наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) реберно-грудинных сочленений	12,477	1,634	0,28	7,635	< 0,001
Синостоз тела грудины и мечевидного отростка	3,189	0,802	0,153	3,975	< 0,001
Пол	-8,431	1,366	-0,219	-6,174	< 0,001
Примечание: В – коэффициент регрессии, β – стандартизированный коэффициент, t – t-критерий Стьюдента, p – уровень значимости					

При совместном распределении истинного и прогнозируемого возраста получено следующее (Рисунок 17).

Исходя из этого, следует, что в самой младшей и самой старшей возрастных группах ошибки между фактическим и прогнозируемым возрастом не столь критичны; однако при оценке средних возрастных групп возможны ошибочные выводы с попаданием прогноза в соседнюю группу. Это связано с тем, что сила корреляционной связи между исследуемыми параметрами грудины и грудино-реберных сочленений и возрастом недостаточна для приемлемого уровня точности при судебно-медицинском установлении возраста [41, 44].

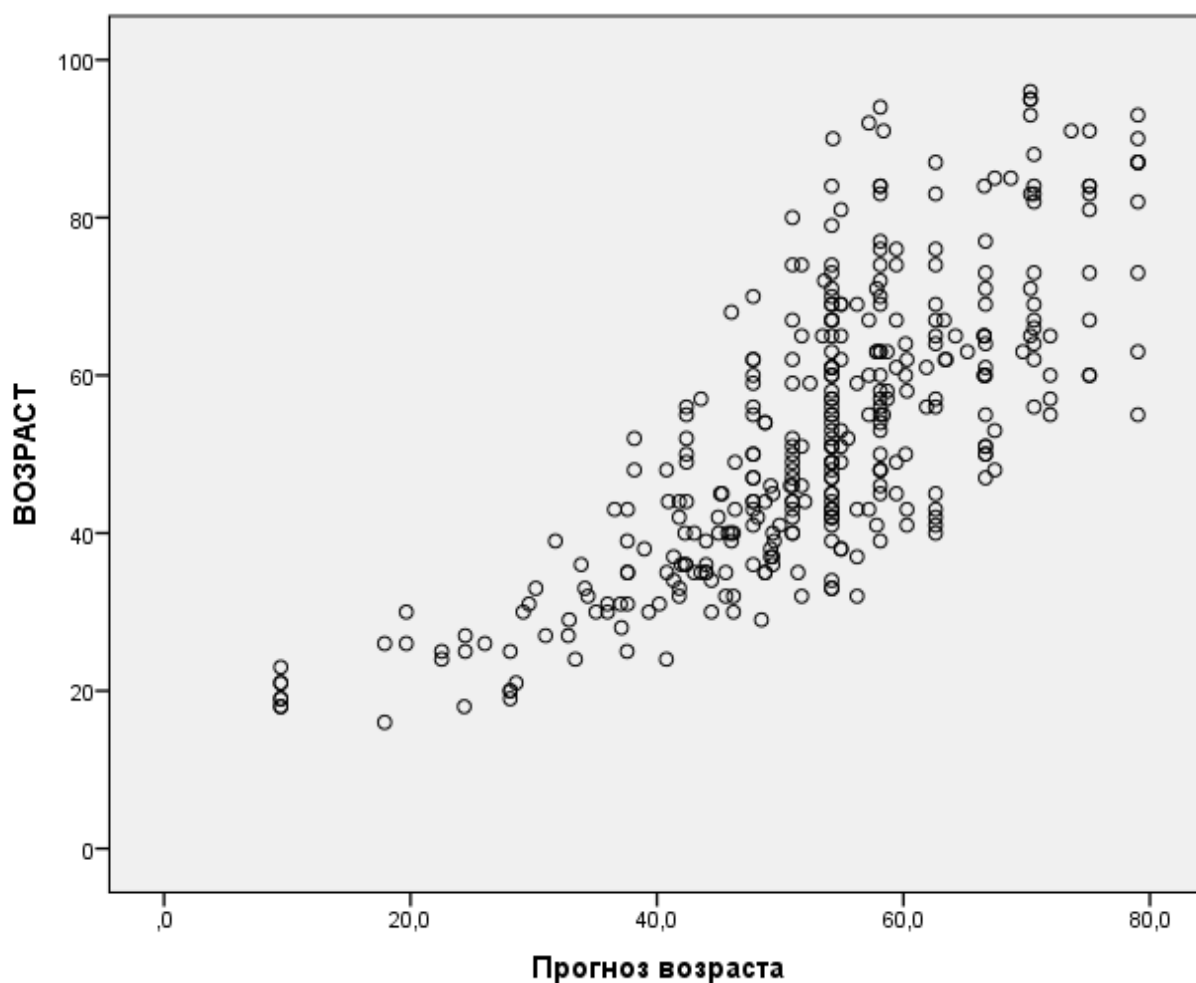


Рисунок 17 – Совместное распределение истинного и прогнозируемого возраста [41]

Сопоставив ошибку прогнозирования в различных возрастных группах, средняя ее величина составила 11,77 лет (Рисунок 18).

Таким образом, используя предложенную регрессионную модель, неопознанного индивида с большой вероятностью можно отнести лишь к двум возрастным категориям – < 30 лет и > 30 лет, что ставит под сомнение объективность окончательных выводов.

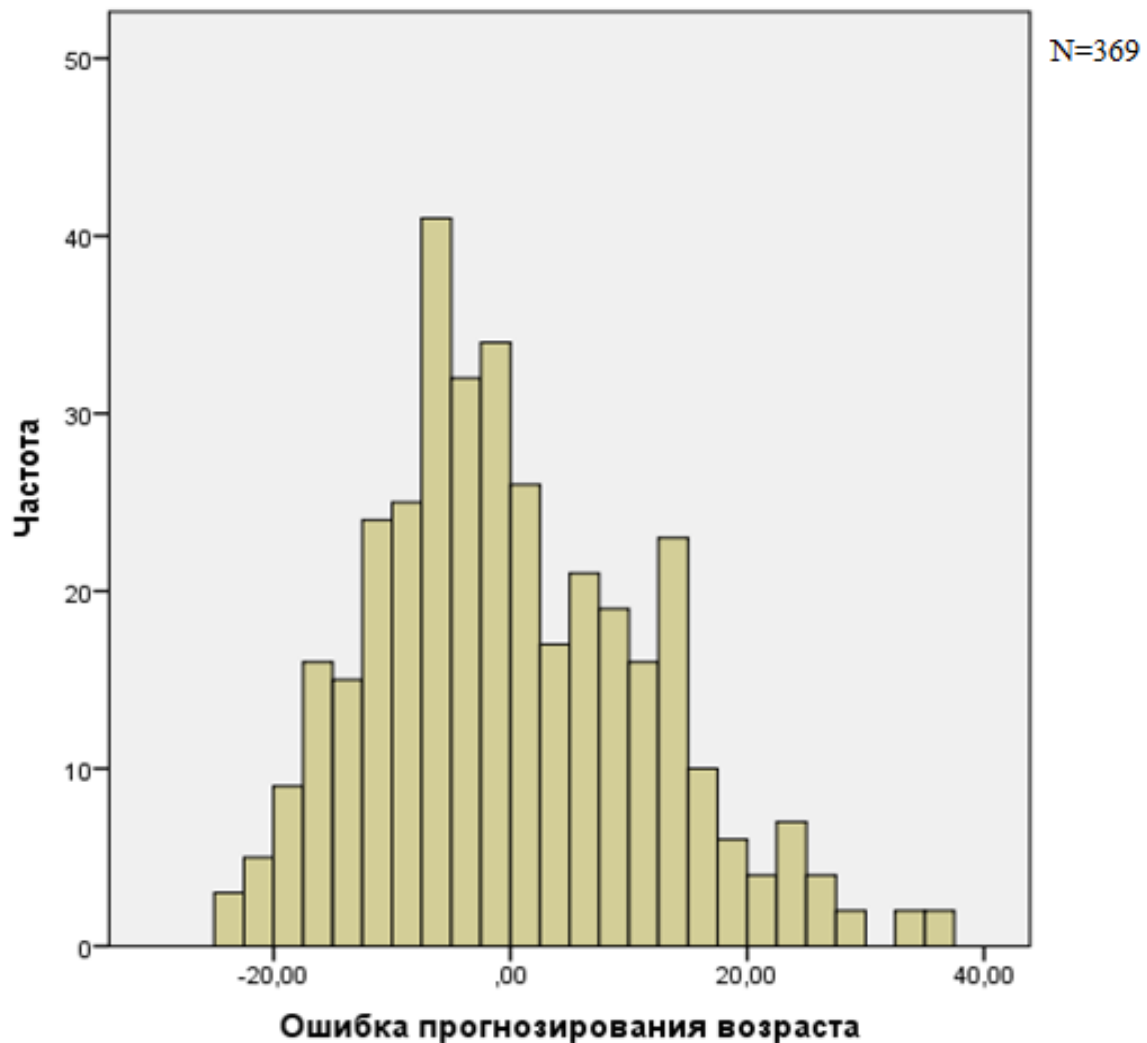


Рисунок 18 – Распределение ошибки прогнозирования возраста [41]

Резюме

По результатам проведенной оценки диагностической значимости возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по данным традиционной рентгенографии установлено, что наибольшую прогностическую ценность имеют признаки: A12 – наличие очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер ($r=0,6$), A14 – наросты на суставных краях тела грудины ($r=0,6$), A11 – уплотнение суставных краев тела грудины ($r=0,5$), A15 – наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений ($r=0,5$), A7 – синостоз тела грудины и мечевидного отростка ($r=0,4$). Основанная на этих данных предиктивная модель обладает удовлетворительной предсказательной способностью, со средней

величиной ошибки прогнозирования возраста человека в 11,77 лет. Показано, что применение разработанной модели позволяет верно установить возрастные группы до и после 30 лет, а при их конкретизации модель демонстрирует существенную погрешность между установленным и реальным возрастом. По-видимому, это обусловлено субъективной оценкой рентгенографических признаков возрастных изменений грудины, в отсутствии вспомогательного иллюстративного материала дегенеративно-дистрофических изменений, стадий оссификации стернальных сочленений и др., а также сложностями интерпретации рентгенографических изображений, за счет наложения теней [7, 41, 44].

Таким образом, полученные на данном этапе результаты служат предпосылкой для дальнейшего изучения возрастной морфологии грудины с использованием томографического исследования грудной клетки, а также формирования нового комплекса воспроизводимых признаков.

3.2. Результаты исследования грудины и грудино-реберных сочленений при помощи мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки

Для формирования математической модели установления возраста использовалась линейная регрессия, для чего исследуемая выборка была случайным образом разделена на тренировочную и тестовую подгруппы в соотношении 70% и 30% соответственно.

На начальном этапе был проведен расчет частоты встречаемости каждого признака и отдельно взятой стадии. Ввиду аплазии мечевидного отростка у шести объектов исследования, для объективного построения модели, значения по признаку СIII (степень оссификации ксифостернального сочленения) заменены на медианное значение по параметру ($Me=3$). Таким образом получено следующее: средний возраст объектов, у которых была зафиксирована 1 стадия признака СI составил $24,75 \pm 2,61$ года (минимальный возраст обнаружения в исследуемой выборке у женщин и мужчин – 18 лет, максимальный возраст обнаружения 1 стадии у представителей мужского пола 56 лет, у представителей женского – 46

лет), 2 стадия – $37,72 \pm 2,24$ года (минимальный возраст обнаружения у объектов мужского пола 19 лет, максимальный – 40 лет, у объектов женского – 21 год и 74 года соответственно), 3 стадия – $52,43 \pm 1,41$ года (у мужчин минимальный возраст обнаружения 24 года, максимальный – 75 лет, у женщин – 27 и 75 лет соответственно), 4 стадия – $66,19 \pm 2,12$ года (минимальный возраст объектов мужского пола, у которых была обнаружена 4 стадия 44 года, максимальный – 79 лет, минимальный возраст обнаружения у объектов женского пола – 41 год, максимальный – 78 лет); средний возраст обнаружения 1 стадии признака CII – $29,44 \pm 1,51$ года (минимальный возраст обнаружения данной стадии у объектов мужского пола составил 18 лет, у объектов женского – 20 лет, максимальный у объектов мужского пола – 47 лет, женского – 46 лет), 2 стадии – $54,34 \pm 1,64$ года (минимальный возраст обнаружения у представителей мужского пола 19 лет, у представителей женского – 18 лет, максимальный – 78 лет у объектов мужского и женского пола), 3 стадии – $55,43 \pm 2,5$ года (у мужчин минимальный возраст обнаружения 24 года, максимальный – 79 лет, минимальный возраст у женщин 29 лет, максимальный – 76 лет); для 1 стадии признака CIII средний возраст составил $28,89 \pm 1,82$ года (минимальный возраст обнаружения данной стадии у мужчин 19 лет, у женщин – 24 года, максимальный возраст – 43 года и 36 лет у мужчин и женщин соответственно), для 2 стадии – $44,12 \pm 2,16$ года (минимальный возраст объектов мужского пола, у которых была обнаружена 2 стадия составил 18 лет, женского пола – 21 год, максимальный – 74 года у мужчин, 73 года у женщин), для 3 стадии – $57,92 \pm 1,46$ года (минимальный возраст обнаружения 24 года у представителей мужского пола и 39 лет у представителей женского, максимальный – 79 лет у мужчин и 78 лет у женщин); средние значения возраста выявления признака CIV – $22,15 \pm 1,17$ года (минимальный возраст обнаружения у мужчин и женщин 18 лет, максимальный – 26 лет у мужчин и 31 год у женщин) для 1 стадии, $43,61 \pm 1,36$ года (минимальный возраст обнаружения у объектов мужского пола составил 23 года, у объектов женского – 21 год, максимальный – 74 года и 75 лет соответственно у мужчин и женщин) для 2 стадии, $57,85 \pm 2,07$ года (у объектов мужского пола минимальный возраст 24 года, женского пола – 22 года,

максимальный – 78 лет для объектов обоих полов) для 3 стадии и $74,82 \pm 0,56$ года (минимальный возраст обнаружения составил 73 года у мужчин и 71 год у женщин, максимальный – 79 лет у мужчин и 77 лет у женщин) для 4 стадии (Таблицы 16-19).

Таблица 16 – Возрастные характеристики по признаку СІ

Признак СІ	N	M	m	σ	Min	Me	Max
1 стадия	12	24,75	2,61	9,04	18	21	56
2 стадия	39	37,72	2,24	13,83	19	32	74
3 стадия	88	52,43	1,41	12,6	24	54	75
4 стадия	36	66,19	2,12	12,72	41	74	79

Графически количественные и процентные значения представлены на Рисунках 18-21 в виде столбчатых диаграмм [44].

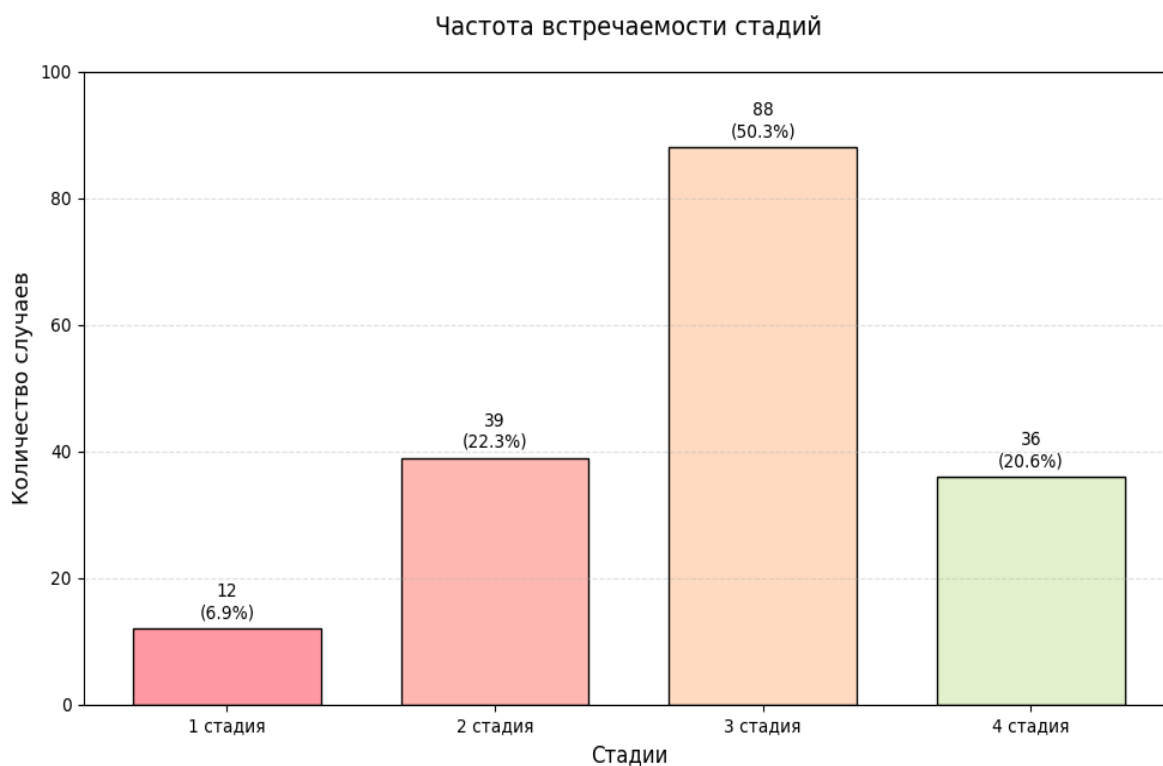


Рисунок 18 – Частота встречаемости стадий признака СІ

Таблица 17 – Возрастные характеристики по признаку СII

Признак СII	N	M	m	σ	Min	Me	Max
1 стадия	34	29,44	1,51	8,83	18	27	47
2 стадия	106	54,34	1,64	16,9	18	57	78
3 стадия	35	55,43	2,5	14,78	24	54	79

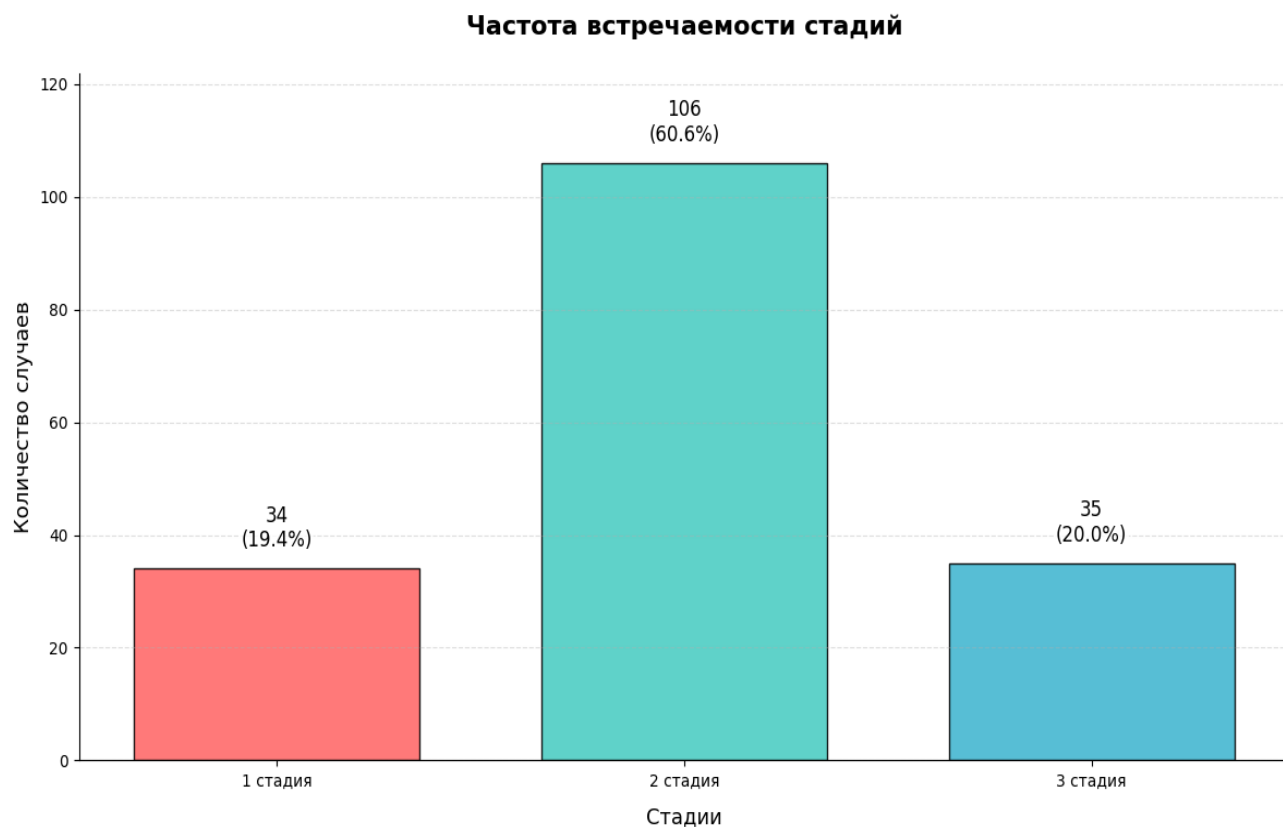


Рисунок 19 – Частота встречаемости стадий признака СII

Таблица 18 – Возрастные характеристики по признаку СIII

Признак СIII	N	M	m	σ	Min	Me	Max
1 стадия	19	28,89	1,82	7,94	18	29	43
2 стадия	58	44,12	2,16	16,47	18	44	74
3 стадия	92	57,92	1,46	13,72	24	60	79

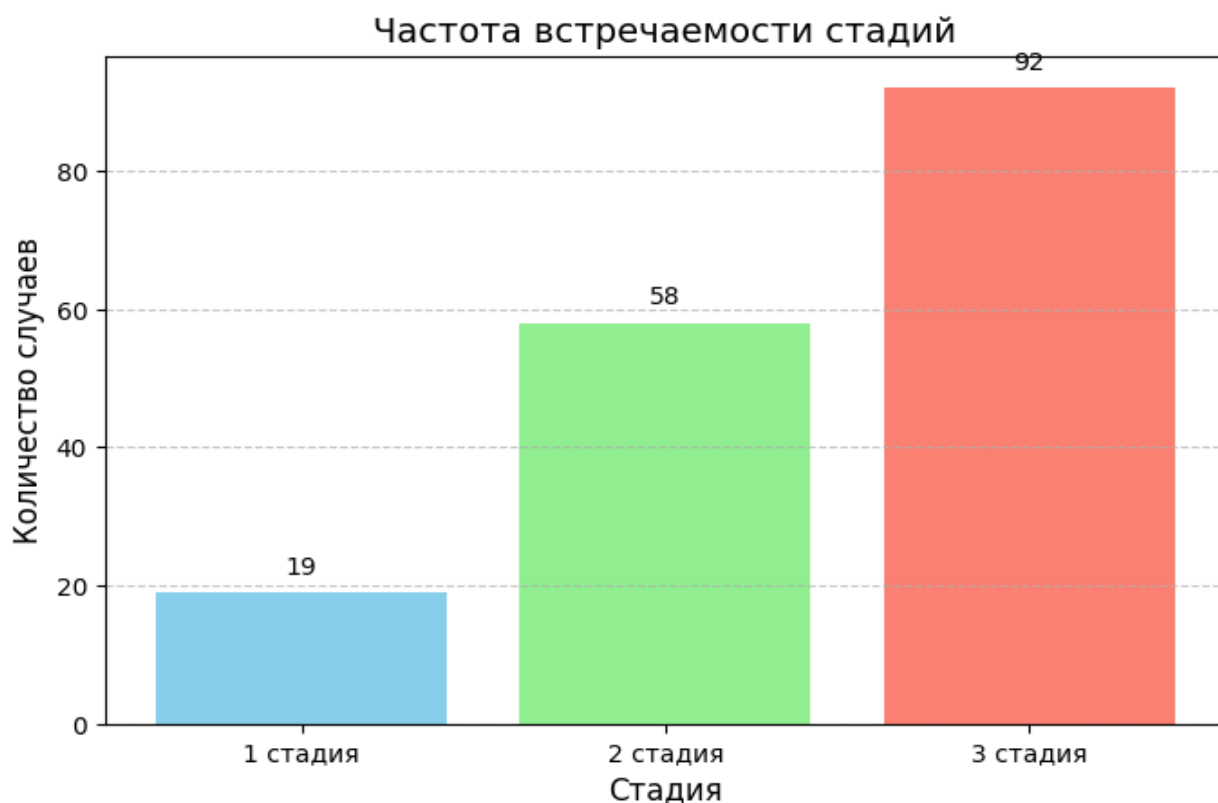


Рисунок 20 – Частота встречаемости стадий признака СIII

Таблица 19 – Возрастные характеристики по признаку CIV

Признак CIV	N	M	m	σ	Min	Me	Max
1 стадия	13	22,15	1,17	4,22	18	20	31
2 стадия	90	43,61	1,36	12,93	21	44	75
3 стадия	55	57,85	2,07	15,37	22	64	78
4 стадия	17	74,82	0,56	2,29	71	75	79

Далее проведено распределение стадийностей признаков CI, CII, CIII, CIV по возрастным группам. При этом установлено, что наличие 1 стадии признака CI наиболее характерно для возрастных групп до 25 лет, а встречаемость 4 стадии – для 50 и более лет, причем наибольшее сосредоточение наблюдается в группе 70 лет и более (Рисунок 22). Вместе с этим, количество наблюдений 2 стадии имеет бóльшую плотность встречаемости в возрастном диапазоне 20-40 лет.

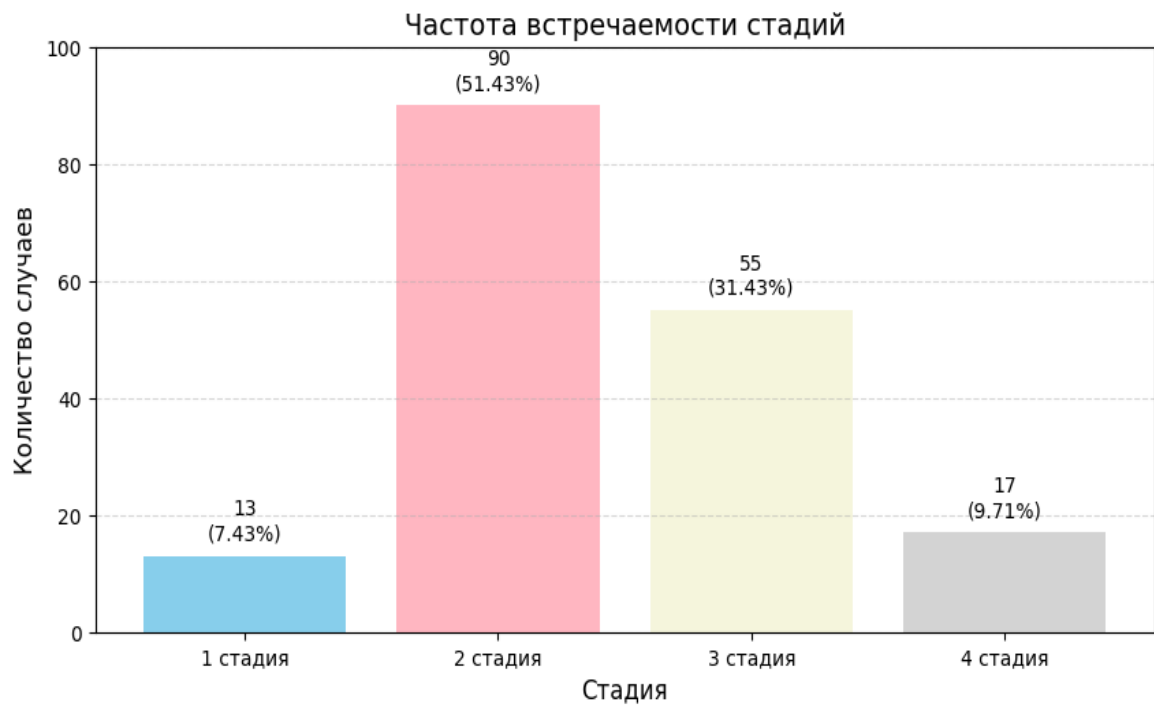


Рисунок 21 – Частота встречаемости стадий признака CIV

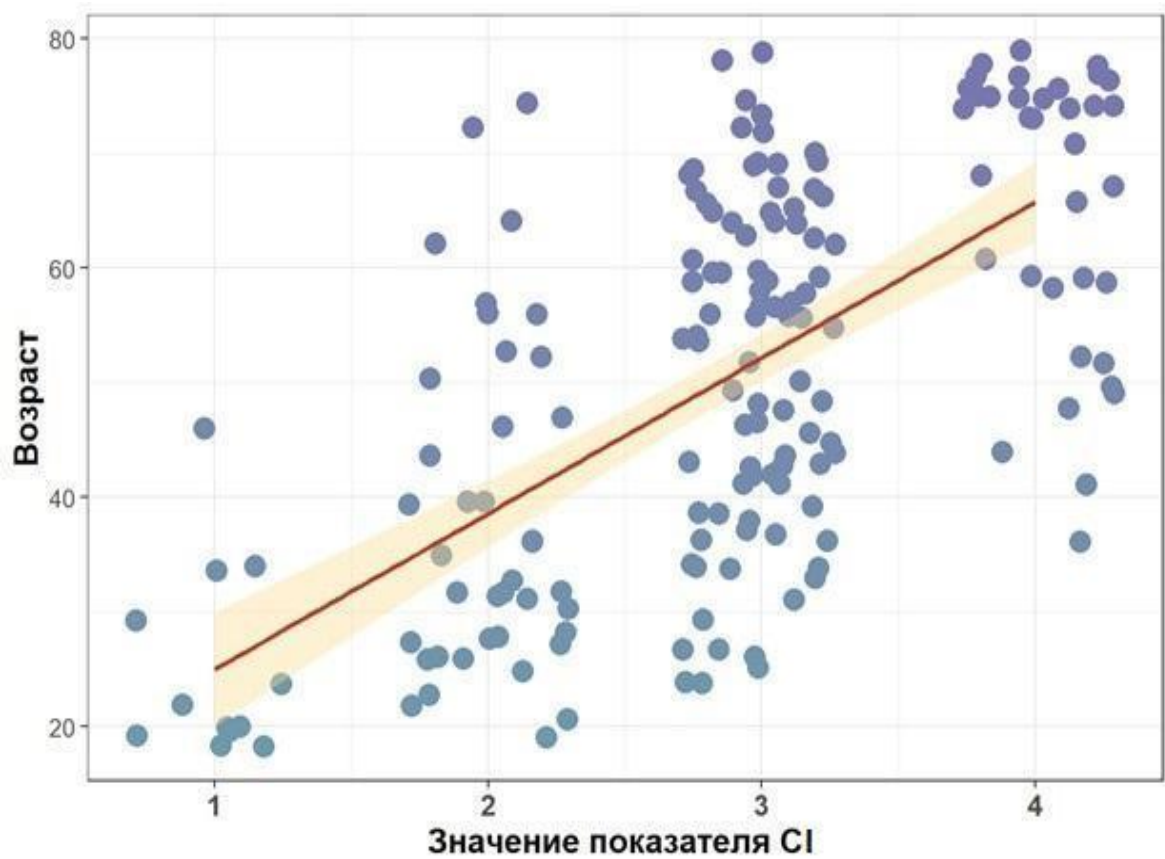


Рисунок 22 – Распределение стадий признака CI по возрастным группам [42]

Показано также, что наличие 3 стадии характеризуется значительной дисперсией по возрастным группам с наибольшей аккумуляцией в интервале 40-70 лет.

Рассматривая признак СII (Рисунок 23), отмечено, что наибольшая частота встречаемости 1 стадии располагается в промежутке 20-40 лет.

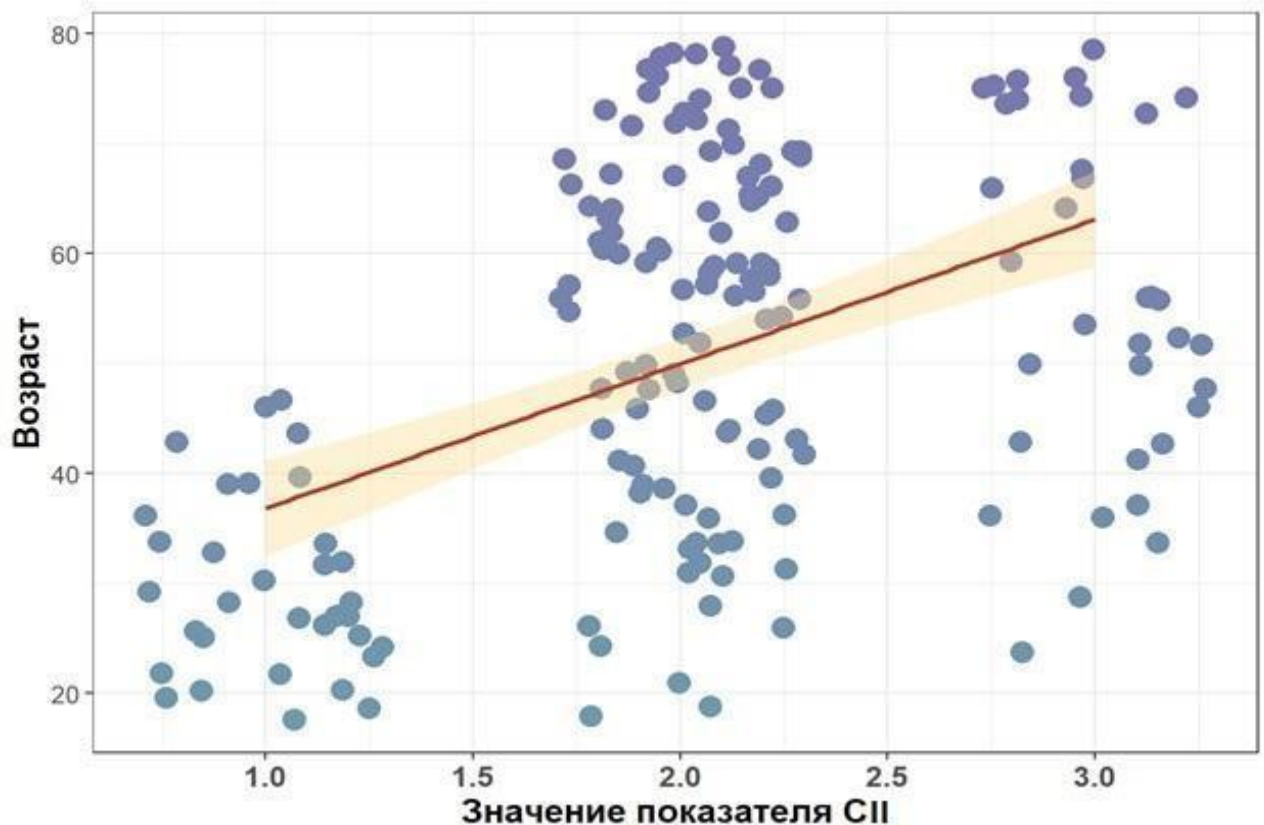


Рисунок 23 – Распределение стадий признака СII по возрастным группам [42]

Наряду с этим, стадия 2 имеет широкую вариабельность с тенденцией к сосредоточению в возрасте 50 и более лет. Полная оссификация манубриостернального сочленения (стадия 3) в нашей выборке наиболее часто встречается в возрастном диапазоне 40-80 лет.

Анализ распределения стадий признака СIII по возрастным группам показал следующее (Рисунок 24). 1 стадия встречается преимущественно в возрасте 20-35 лет, в то время как 2 стадия – практически равномерно распределена по всем возрастным группам. Наличие 3 стадии данного признака наиболее характерно для

40 лет и более, причем в группе 60 и более лет – частота его встречаемости наибольшая.

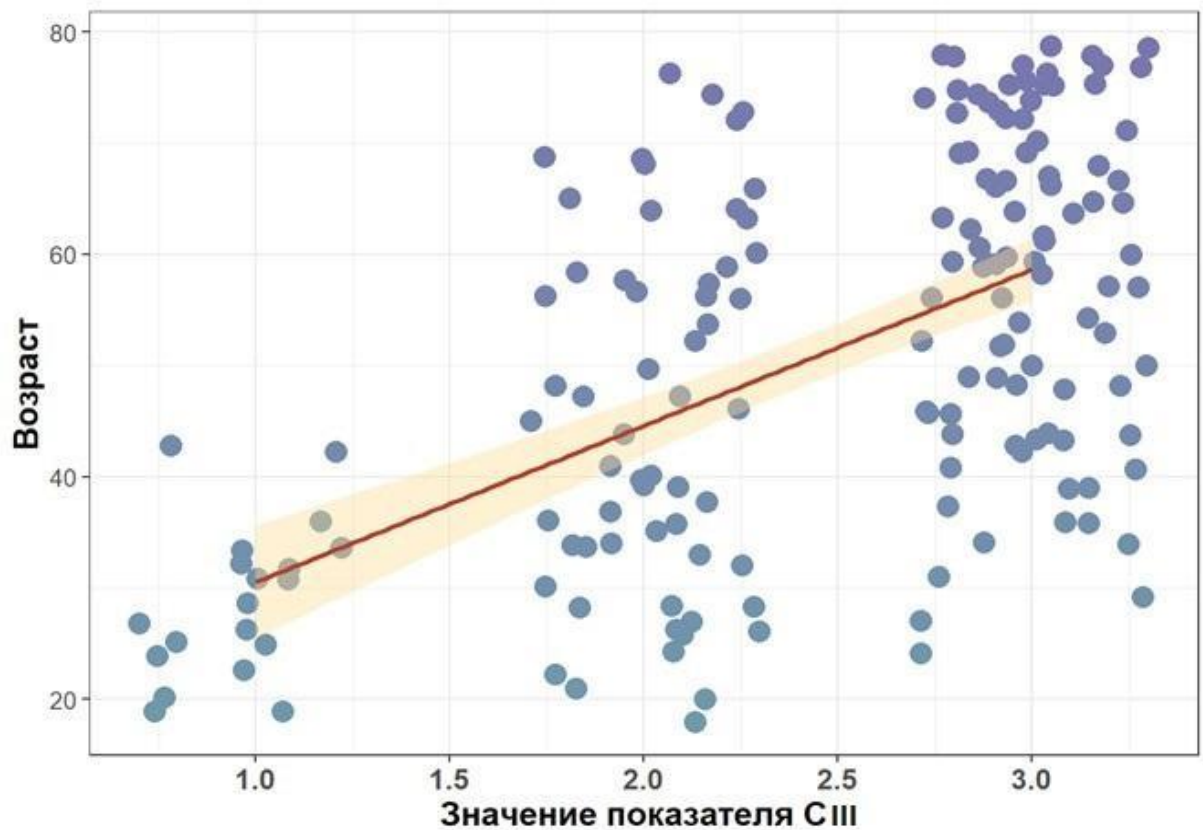


Рисунок 24 – Распределение стадий признака CIV по возрастным группам [42]

Возрастная группа, для которой характерно наличие 1 стадии признака CIV – до 25 лет, для 4 стадии – 70 лет и более. Вместе с этим, встречаемость 2 стадии сильно варьирует и находится в возрастном диапазоне 25-60 лет, тогда как встречаемость 3 стадии наиболее сосредоточена в группе 60-70 лет (Рисунок 25).

Разброс в отношении промежуточных стадий (стадия 2 и стадия 3) обусловлен тем, что в средних возрастных группах (30-50 лет) процессы оссификации происходят более плавно, без выраженных изменений.

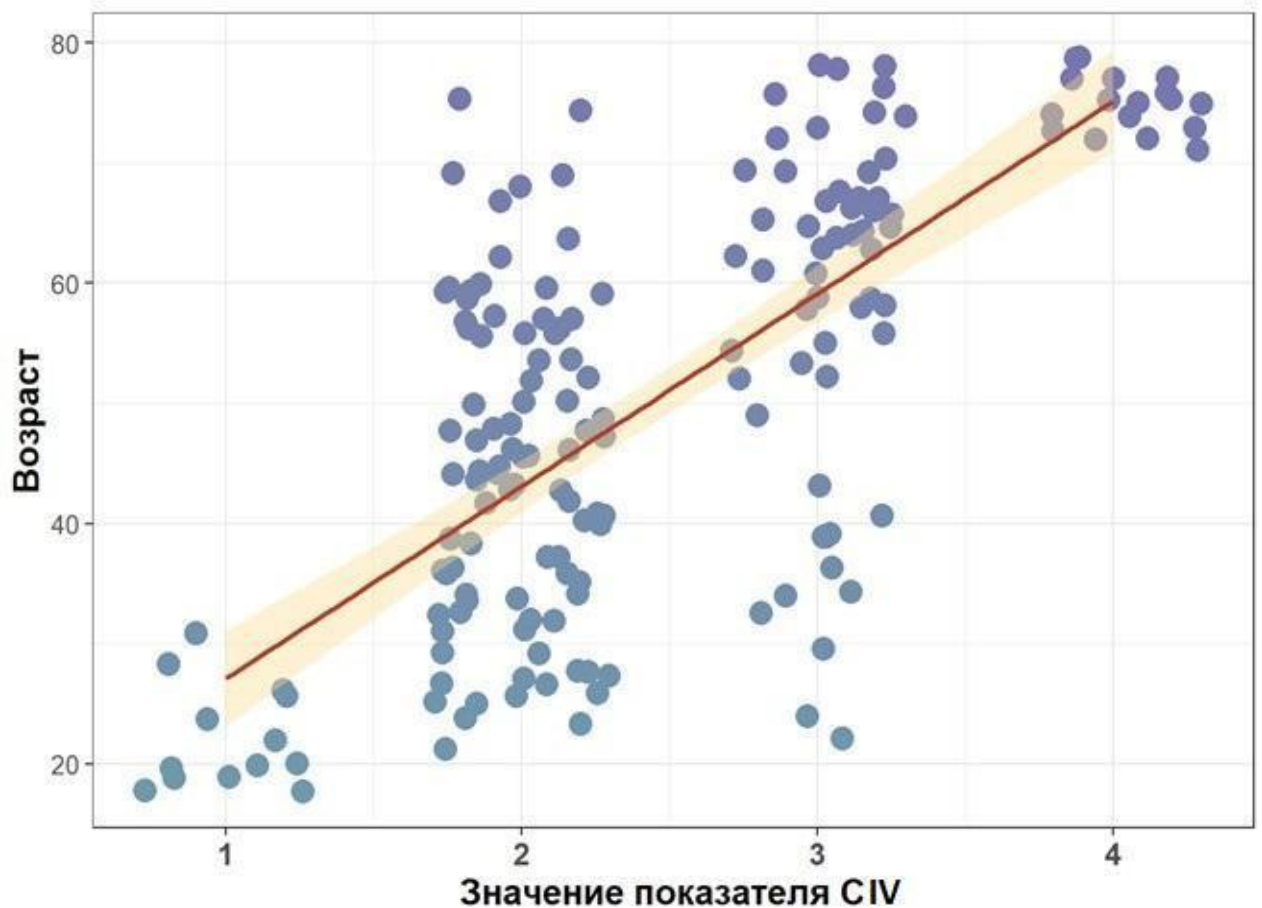


Рисунок 25 – Распределение стадий признака CIV по возрастным группам [42]

Помимо этого, имеет место влияние средовых факторов, сферы профессиональной деятельности и наличие заболеваний, напрямую не связанных с костно-хрящевой системой (дефицитные состояния, эндокринные патологии и другие), а также агрессивные методы воздействия при заболеваниях других систем органов (лучевая, иммуносупрессивная терапия).

Несмотря на разброс стадий некоторых признаков по возрастным группам, при создании предиктивной модели задействованы все признаки, так как их комплексное применение оказывает синергетический эффект.

Последующее формирование модели прогнозирования возраста выполнено по методу линейной регрессии с расчетом следующих характеристик. Коэффициент детерминации (R^2) составил 0,7345, свидетельствующий о том, что полученная модель демонстрирует хорошую объяснительную способность, то есть 73,45% дисперсий в конечном итоге будут предсказаны верно, однако оставшиеся

26,55% вариаций модель не объясняет. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) равна 0,1572 или 15,72% (то есть в среднем предсказанные значения возраста отклоняются от фактических на 15,72%). Средняя абсолютная ошибка (MAE) в нашей работе имела значение 7,28, означающее, что в среднем ошибка прогнозирования составляет 7,28 лет. Графически интерпретация работы математической модели представлена на Рисунке 26 [42, 44].



Рисунок 26 – Распределение предсказанных и истинных значений возраста [42]

Помимо этого, прогностическая способность модели была рассчитана отдельно для объектов мужского и женского пола (Рисунок 27).

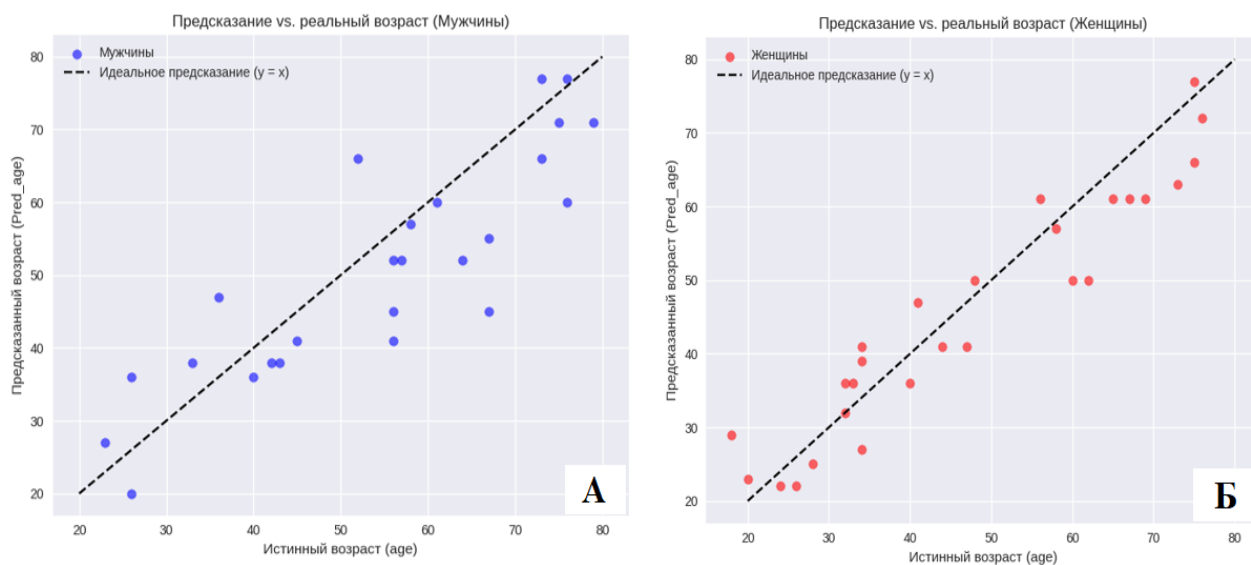


Рисунок 27 – Распределение предсказанных и истинных значений возраста у мужчин (а) и женщин (б) [44]

При этом получено, что модель верно предсказывает возраст у мужчин в 73,47% случаев ($R^2=0,7347$) (Рисунок 27, а), женский – в 73,42% случаев ($R^2=0,7342$) (Рисунок 27, б).

Сформированный по методу линейной регрессии набор коэффициентов представлен в Таблице 20.

Таблица 20 – Регрессионные коэффициенты

Признак	Коэффициент
constant	-7,51
CI	5,25
СII	5,71
СIII	3,42
CIV	10,59
Ж	-1,01
М	-6,5
Примечание: constant – константа, Ж – женский пол, М – мужской пол	

В соответствии с расчетными коэффициентами, предполагаемый возраст рассчитывается по формуле:

$$\text{ExpAGE}_1 = -7,51 + 5,25 \times \text{CI} + 5,71 \times \text{CII} + 3,42 \times \text{CIII} + 10,59 \times \text{CIV} + \text{P},$$

где ExpAGE_1 (expected age₁) – предполагаемый возраст; CI, CII, CIII, CIV – балльная интерпретация признаков (соответственно – 1, 2, 3, 4), P – регрессионный коэффициент соответствующего пола [42, 44].

Резюме

Результаты исследования возрастной морфологии грудины и грудино-реберных сочленений по результатам МСКТ грудной клетки показали, что они могут использоваться качестве диагностических критериев при определении возрастных групп. Используемый комплекс МСКТ-признаков (CI – стадии оссификации костостернальных сочленений между рукояткой грудины и первыми ребрами, CII – стадии оссификации манубриостернального сочленения, CIII – стадии оссификации ксифостернального сочленения, CIV – стадии оссификации костостернальных сочленений между телом грудины и 2-7 парами ребер), показал значимую корреляцию с возрастом. Установлено, что первые признаки оссификации признака CI в используемой выборке наблюдались при среднем возрасте объектов 37,72 года, а полное окостенение – в 66,19 года; начало окостенения манубриостернального сочленения встречалось в среднем в 54,32 года с завершением в 55,43 года, ксифостернального сочленения – в 44,12 года и завершением в 57,92 года; начальные признаки сращения CIV проявлялись в среднем возрасте 43,61 года, а завершались полным окостенением или окостенением центральной части сочленения в 74,82 года. У женщин, при этом, процессы оссификации происходят быстрее по сравнению с мужчинами. Статистическая обработка полученных данных, в конечном итоге, позволила сформировать прогностическую модель с точностью 73,45% верного установления возраста для общей выборки и с точностью в 73,47% и 73,42% для мужской и женской выборок соответственно.

Полученные в ходе данного этапа работы результаты во многом схожи с работами на японской и китайской выборках. Так, в исследовании T. Monum et al.

(2020) разработана предиктивная модель с предсказательной способностью в 57,69% для лиц мужского пола и 70,83% для лиц женского [64]. А в работе X. Tang et al. (2024) [56], помимо общепринятых статистических методов обработки информации, авторы использовали алгоритмы интеллектуального анализа данных. При этом наилучшие результаты MAE установления возраста оставили 9,08 года для мужчин и 10,41 года для женщин.

Несмотря на некоторые различия, в целом методики, базирующиеся на томографическом исследовании грудной клетки, демонстрируют высокую воспроизводимость, что делает МСКТ предпочтительным методом исследования по сравнению с традиционными. Помимо этого, достаточно перспективным направлением видится внедрение нейросетевого подхода в нашей работе, посредством которого повышается возможность для поиска скрытых корреляционных связей с возрастом, а также автоматизации оценки возрастных изменений грудины [44].

3.3. Воспроизводимость методов судебно-медицинского установления возраста по результатам радиологических исследований грудины и грудино-реберных сочленений

Учитывая, что одним из существенных этапов проведения биомедицинских исследований является расчет межэкспертной согласованности, промежуточным звеном при оценке валидности разработанных нами методик было вычисление коэффициента каппа-Коэна (k) [7]. Расчет k -коэффициента проводился в два шага. На первом дана оценка межэкспертной согласованности при установлении возраста по результатам традиционной рентгенографии грудины. Для достижения этой цели были задействованы три специалиста: врач-рентгенолог (Rg – radiologist) со стажем работы по специальности «Рентгенология» более 10 лет, врач – судебно-медицинский эксперт, имеющий стаж работы по специальности «Судебно-медицинская экспертиза» более 20 лет (LE – long experience) и врач – судебно-

медицинский эксперт со стажем работы по специальности «Судебно-медицинская экспертиза» менее 5 лет (SE – short experience).

Анализ Rg-изображений на предмет оценки рентгенологических признаков возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений выполнялся специалистами независимо друг от друга, для этого, случайным образом, было отобрано 50 рентгенограмм с последующей оценкой комплекса рентгенологических признаков, интерпретируемых как «наличие/отсутствие»: A1 – полный синостоз рукоятки и тела грудины; A2 – частичный синостоз рукоятки и тела грудины; A3 – уплотнение по ходу синостоза между рукояткой и телом грудины; A4 – полный синостоз сегментов тела грудины; A5 – частичный синостоз сегментов тела грудины; A6 – следы сращения сегментов тела грудины; A7 – полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка; A8 – частичный синостоз тела грудины и мечевидного отростка; A9 – уплотнение по ходу синостоза между телом грудины и мечевидным отростком; A13 – глубина вырезок тела грудины более 5 мм; A15 – наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений. Далее было выполнено попеременное определение согласованности врачей друг с другом со следующими результатами (Таблица 21) [7, 44].

Расчетные значения межэкспертной согласованности находятся в диапазоне от 0 до 1, соответствующие конкретной степени согласия: 0 – согласие отсутствует; 0,1-0,2 – незначительное согласие; 0,21-0,4 – удовлетворительное согласие; 0,41-0,6 – умеренное согласие; 0,61-0,8 – значительное согласие; 0,81-0,99 – почти идеальное согласие; 1 – идеальное согласие (Таблица 22).

Таким образом, в группе специалистов Rg+LE значения k-коэффициента находились в пределах от 0,61 до 1 (от значительного до идеального), в группе LE+SE – от 0,1 до 1 (от незначительного до идеального), в группе Rg+SE – от 0,1 до 1 (от незначительного до идеального).

Таблица 21 – Согласованность по оцениваемым признакам, в зависимости от сформированных пар исследователей [7]

Рентгенологический признак возрастных изменений грудины		Значение k		
		Rg+LE	LE+SE	Rg+SE
A1	Полный синостоз рукоятки и тела грудины	0,8	0,4	0,4
A2	Частичный синостоз рукоятки и тела грудины	0,9	0,3	0,2
A3	Уплотнение по ходу синостоза между рукояткой и телом грудины	0,61	0,1	0,1
A4	Полный синостоз сегментов тела грудины	1	1	1
A5	Частичный синостоз сегментов тела грудины	1	1	1
A6	Следы сращения сегментов тела грудины	0,8	0,4	0,3
A7	Полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка	0,8	0,7	0,6
A8	Частичный синостоз тела грудины и мечевидного отростка	0,7	0,2	0,1
A9	Уплотнение по ходу синостоза между телом грудины и мечевидным отростком	0,61	0,3	0,2
A13	Глубина вырезок тела грудины более 5 мм	0,8	0,4	0,2
A15	Наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений	1	0,8	0,6

Таблица 22 – Интерпретация значений коэффициента каппа-Коэна [7]

Значения k	Интерпретация
0	Согласие отсутствует
0,1-0,2	Незначительное согласие
0,21-0,4	Удовлетворительное согласие
0,41-0,6	Умеренное согласие
0,61-0,8	Значительное согласие
0,81-0,99	Почти идеальное согласие
1	Идеальное согласие

Рассматривая полученные значения k -коэффициента в разных парах исследователей, наблюдается следующее. В группе Rg+LE показатели межэкспертной согласованности относительно однородные (2 значения $k=0,61$, 1 значение $k=0,7$, 4 значения $k=0,8$ и 3 значения $k=1$). В группах LE+SE и Rg+SE картина иная – значения k -коэффициента более вариабельны: 2 значения $k=0,1$, 4 значения $k=0,2$, 3 значения $k=0,3$, 4 значения $k=0,4$, 2 значения $k=0,6$, 1 значение $k=0,7$, 1 значение $k=0,8$ и 4 значения $k=1$. Причем результаты оценки признаков A4, A5, A7, A15 продемонстрировали наилучшие значения согласованности (для A4 и A5 идеальное согласие, для A7 – значительное согласие, A15 – от значительного до идеального согласия), тогда как признаки A3, A8, A8, A13 – наихудшие. Неоднозначная интерпретация признаков A8 и A9 (частичный синостоз тела грудины и мечевидного отростка и уплотнение по ходу синостоза между телом грудины и мечевидным отростком соответственно) обусловлена вариативностью анатомического строения мечевидного отростка (расщепление, утолщение, отклонение в сторону). Необходимо отметить и то, что отсутствует унифицированная рентгенологическая классификация возрастных изменений грудины, которая позволила бы провести дифференциацию степеней оссификации манубриостернального и ксифостернального сочленений, а также отличительные признаки между полным синостозом и уплотнением по ходу синостоза (A3, A9). Вместе с этим, верное определение глубины вырезок тела грудины (A13) ограничивается вариантами рентгенанатомического строения вырезок и визуализирующей способностью рентгенографического изображения, что также приводит к двоякому толкованию при оценке данного признака разными специалистами.

Полученные результаты свидетельствует о том, что для рентгенологической оценки возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений требуется наличие профессиональных компетенций в сфере лучевой диагностики во избежание двусмысленной трактовки исследуемых признаков, что повышает трудоемкость выполняемых судебно-медицинских экспертиз по установлению возраста [7].

Второй шаг включал оценку воспроизводимости разработанного алгоритма прогнозирования возраста, по результатам МСКТ грудной клетки. Группа специалистов, оценивающая МСКТ-признаки (CI – сочленения между рукояткой грудины и первыми ребрами, CII – сочленение между рукояткой и телом грудины, CIII – сочленение между телом грудины и мечевидным отростком, CIV – сочленения между телом грудины и 2-7 ребрами), состояла из врача – судебно-медицинского эксперта со стажем работы по специальности «Судебно-медицинская экспертиза» менее одного года (Fpat – forensic pathologist), врача-онколога, имеющего стаж работы по специальности «Онкология» более 10 лет (Onc – oncologist) и врача-ординатора 2-го года обучения, проходящего подготовку по специальности «Радиология» (Rad – radiologist). Интерпретацию возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по МСКТ-изображениям каждый из специалистов оценивал отдельно друг от друга, ориентируясь на эталонные изображения стадий каждого признака. С этой целью было отобрано 30 случайных томограмм грудной клетки, затем проведено попеременное определение уровня согласованности специалистов друг с другом (Таблица 23) [44].

Таблица 23 – Значения каппы-Коэна по оцениваемым признакам, в зависимости от сформированных пар исследователей.

Томографический признак возрастных изменений грудины		Значение k		
		Fpat+Rad	Fpat+Onc	Onc+Rad
CI	Сочленения между рукояткой грудины и первыми ребрами	1	0,9	0,9
CII	Сочленения между рукояткой и телом грудины	1	1	1
CIII	Сочленения между телом грудины и мечевидным отростком	1	1	1
CIV	Сочленения между телом грудины и 2-7 ребрами	0,9	0,8	0,9

Значения межэкспертной согласованности, по результатам оценки томограмм специалистами, в паре Fpat+Rad находятся в пределах от 0,9 до 1, соответствующие интервалу от почти идеального до идеального согласия; в паре Fpat+Onc – от 0,8 до 1 (от значительного до идеального согласия), Onc+Rad – от 0,9 до 1 (от почти идеального до идеального согласия). Исходя из этого можно сделать вывод, что, использование мультиспиральной компьютерной томографии в качестве метода исследования позволяет существенно снизить субъективный фактор при оценке возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по сравнению с традиционной рентгенографией.

Резюме

Надежность и достоверность являются неотъемлемыми критериями при внедрении разработанных методик в практическую деятельность [7]. Проведенные расчеты межэкспертной согласованности для двух наиболее распространенных методов медицинской визуализации позволили не только оценить валидность предиктивных моделей, но и выявить нюансы, снижающие достоверность итоговых результатов. Установлено, что наибольшее значение на воспроизводимость алгоритмов оценки возраста имеет однозначность формулировок диагностических критериев, сопровождаемых, помимо словесных описаний, иллюстративным материалом. Немаловажным является и выбор конкретного метода исследования (в нашем случае – мультиспиральная компьютерная томография), который обеспечит более высокую визуализирующую способность (тем самым снижая процент ошибок), а также позволит внедрить предлагаемую методику установления возраста с использованием МСКТ грудной клетки, как метод экспресс-диагностики, доступный широкому кругу специалистов.

ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ AI-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ВОЗРАСТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МУЛЬТИСПИРАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ

4.1. Использование методов машинного обучения для установления возраста человека по результатам мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки

Первым шагом для использования машинного обучения являлась предобработка исходных МСКТ-изображений, а также сегментарная разметка зон интереса (Рисунок 28).

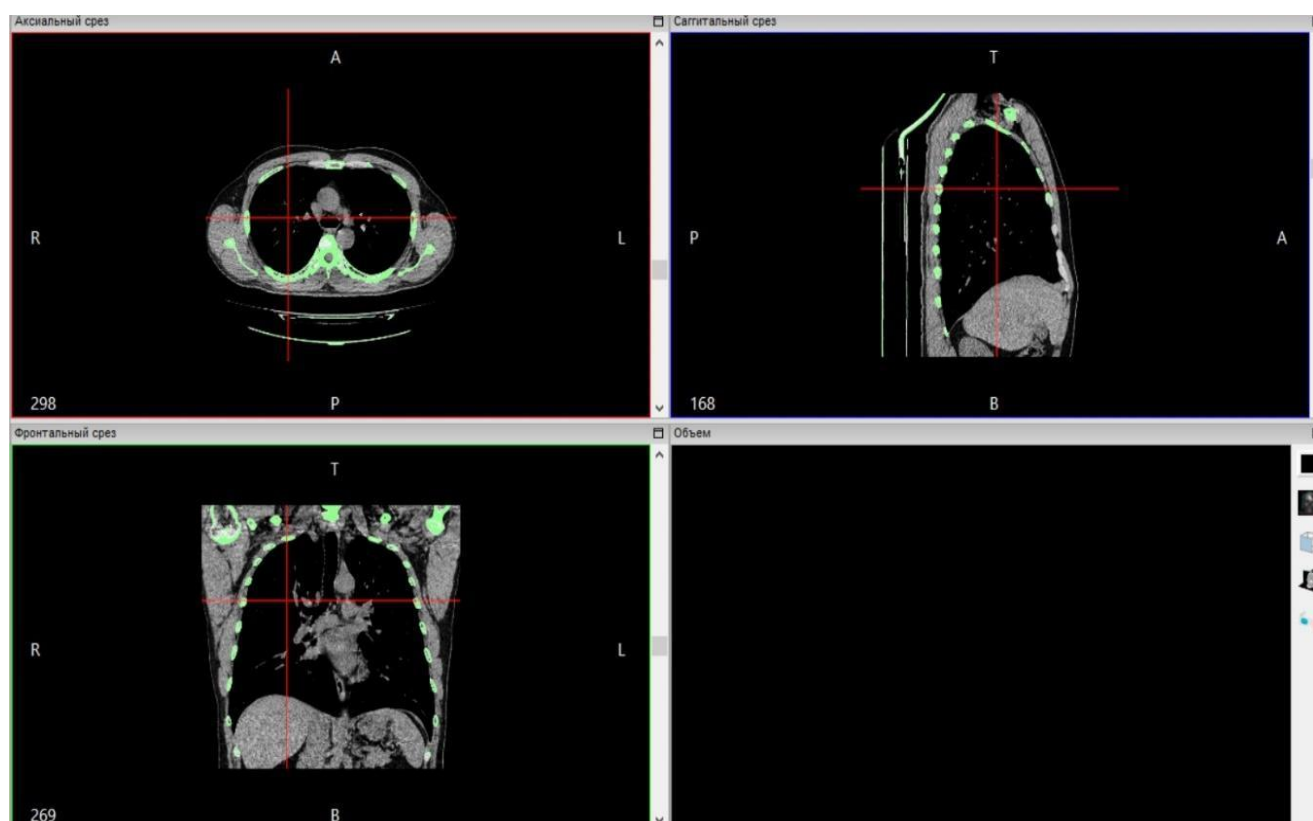


Рисунок 28 – Интерфейс программного обеспечения InVesalius при проведении разметки признаков

С этой целью проводилась реконструкция исходных DICOM-файлов в 3D-объекты с последующей фрагментацией и «вырезкой» анализируемых признаков

(CI, CII, CIII, CIV) и сохранением их в NifTI-формат (.nii) с условными обозначениями по типу: Ж20_I.nii, Ж20_II.nii, Ж20_III.nii, Ж20_IV_1.nii, Ж20_IV_2.nii и M20_I.nii, M20_II.nii, M20_III.nii, M20_IV_1.nii, M20_IV_2.nii, где М/Ж – пол пациента, которому была выполнена МСКТ грудной клетки, 20 – возраст пациента, I-IV – числовое обозначение признака.

Дополнительные числовые обозначения признака CIV (IV_1, IV_2) обусловлены дополнительной сегментацией признака на две составные части в целях сохранения качества зоны интереса для последующего обучения предиктивной модели.

Размеченные области подвергались ручному предпросмотру (Рисунки 29-33) и впоследствии сохранялись в виде базы данных (условное обозначение пациента → набор фрагментированных признаков).

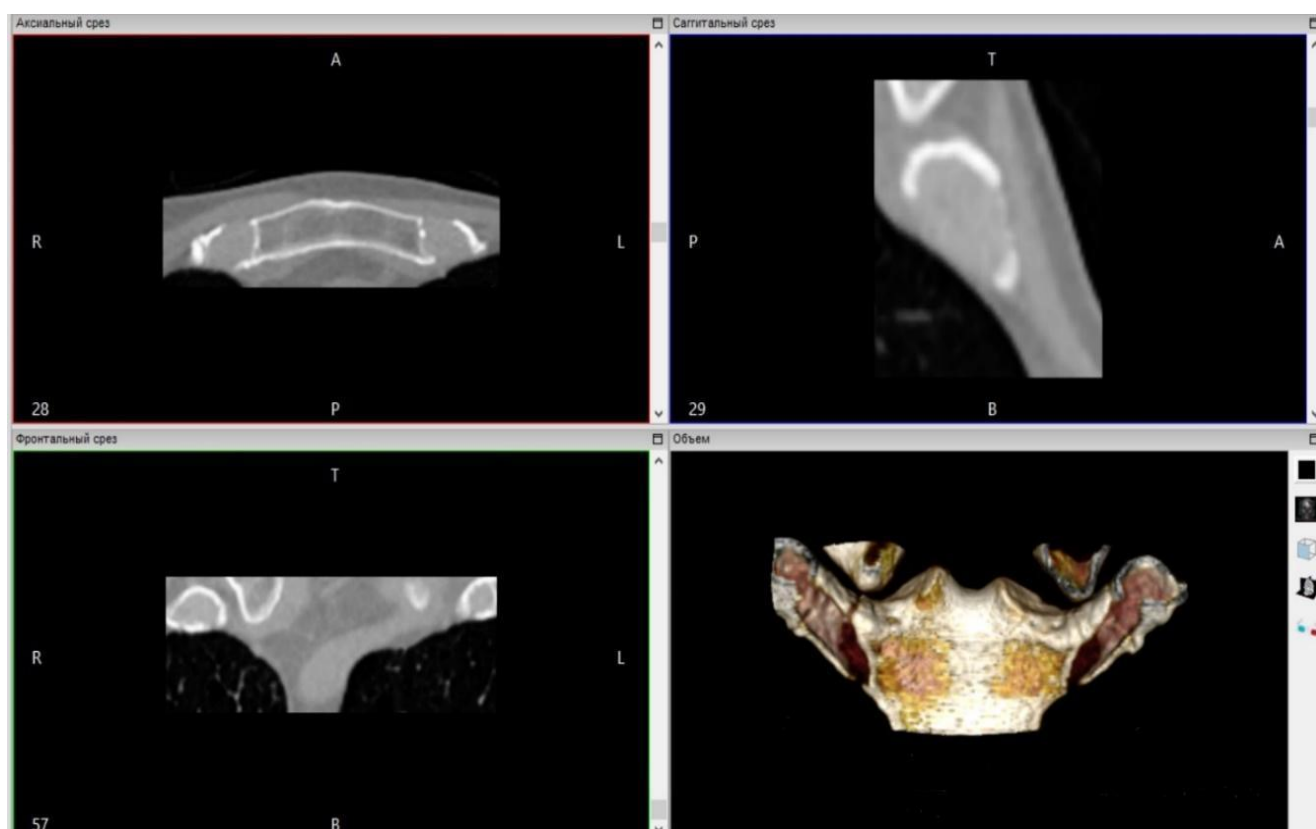


Рисунок 29 – Предпросмотр признака CI

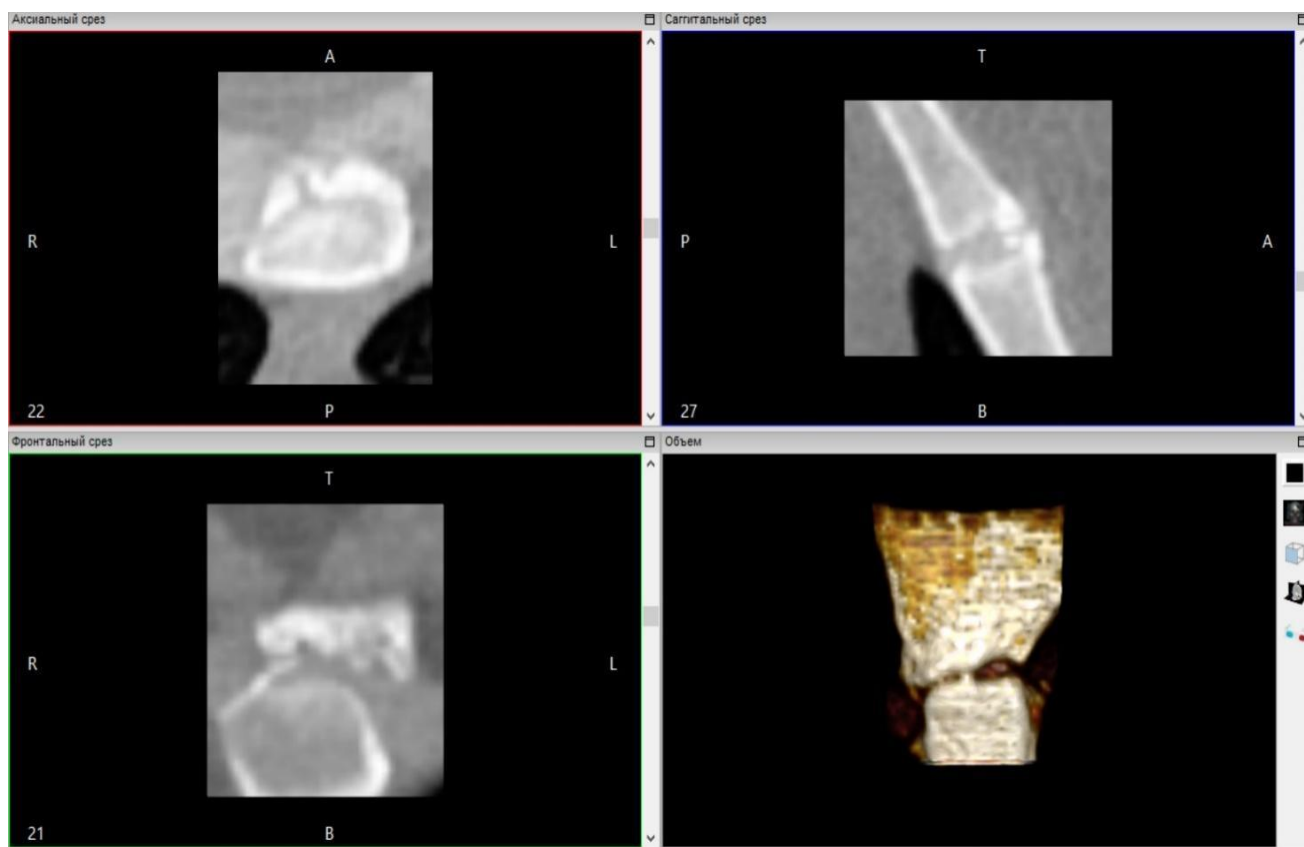


Рисунок 30 – Предпросмотр признака СП

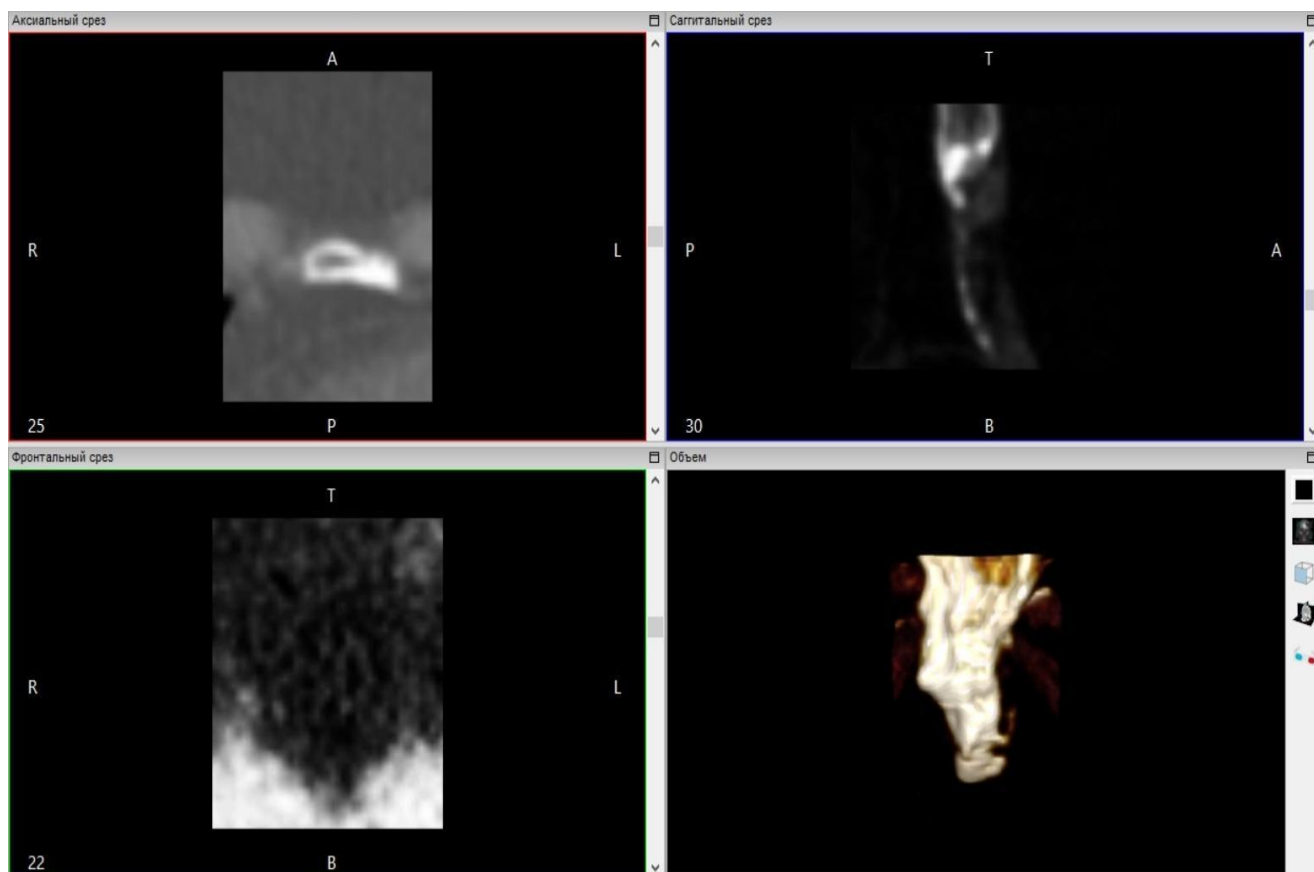


Рисунок 31 – Предпросмотр признака СШ

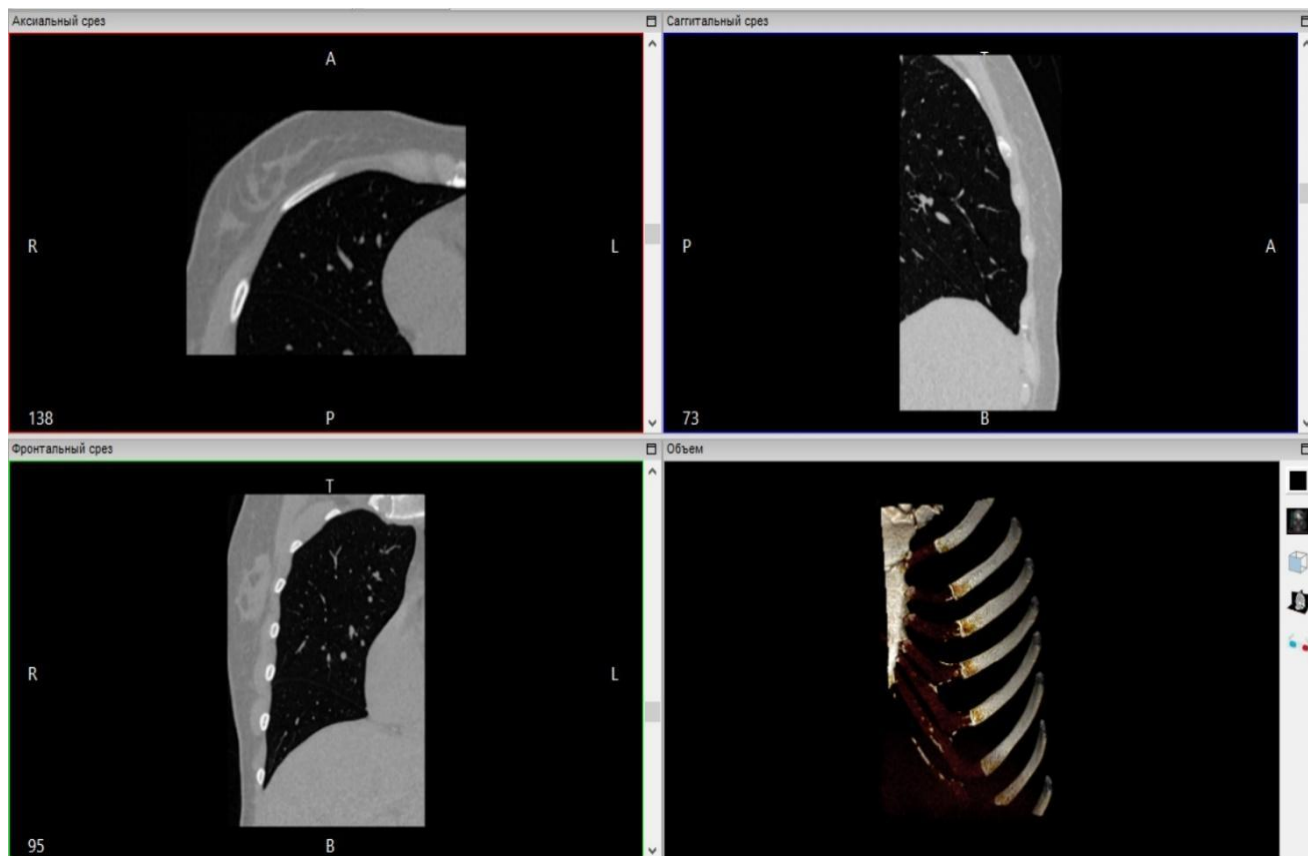


Рисунок 32 – Предпросмотр признака CIV (1 фрагмент)

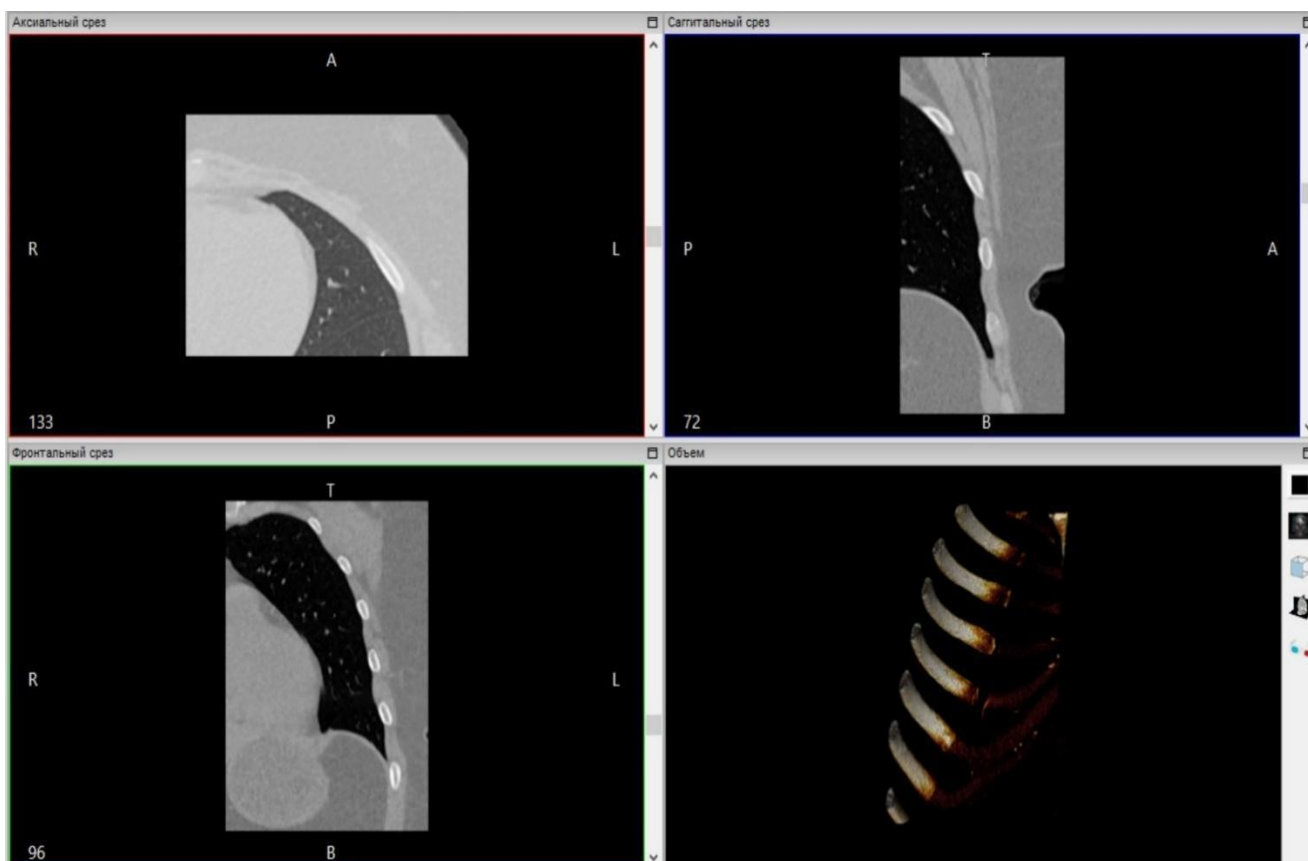


Рисунок 33 – Предпросмотр признака CIV (2 фрагмент)

Перед непосредственно обучением модели проводилась стандартизация исследований: выравнивание ориентации изображений, нормализация размера вокселя, диапазон плотностей приводился к единому виду, чтобы нейросеть сравнивала интересующие анатомические признаки, а не различия между МСКТ-аппаратами, толщиной среза или положениями пациентов при проведении томографии.

Во время обучения модель анализирует предварительно сегментированные ROI-фрагменты, соответствующие признакам CI–CIV, и предсказывает стадии оссификации. Предсказанные стадии сравниваются с экспертными оценками, после чего параметры модели корректируются для минимизации ошибки классификации («обучение с учителем»). После того как модель определила стадии оссификации, их балльные значения интегрируются в ранее сформированное регрессионное уравнение и производится расчет возраста.

Итоговая модель учится оценивать стадию оссификации в предварительно выделенных зонах интереса (Рисунок 34).

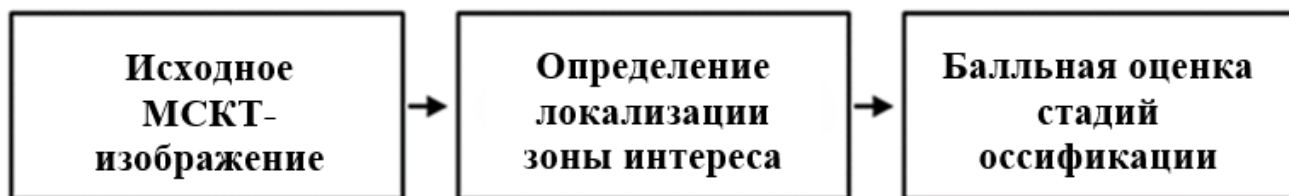


Рисунок 34 – Архитектура модели прогнозирования возраста

4.2. Разработка алгоритма установления возраста человека по результатам мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки с использованием методов машинного обучения

На основе предварительного математического анализа и результатов исследования разработан алгоритм установления возраста человека, базирующийся на анализе реконструированных МСКТ-изображений грудной клетки методами глубокого обучения и состоящий из нескольких этапов. Вначале

исходное МСКТ-изображение анонимизируется, переводится в формат NIfTI, проходит процесс стандартизации. Далее формируются зоны интереса, соответствующие стернальным и грудино-реберным сочленениям (признаки CI-CIV). По набору фрагментов одного пациента многозадачная 3D-сверточная сеть предсказывает стадии оссификации каждого из четырех признаков и, при помощи регрессионного уравнения, производит подсчет возраста (Рисунок 35).

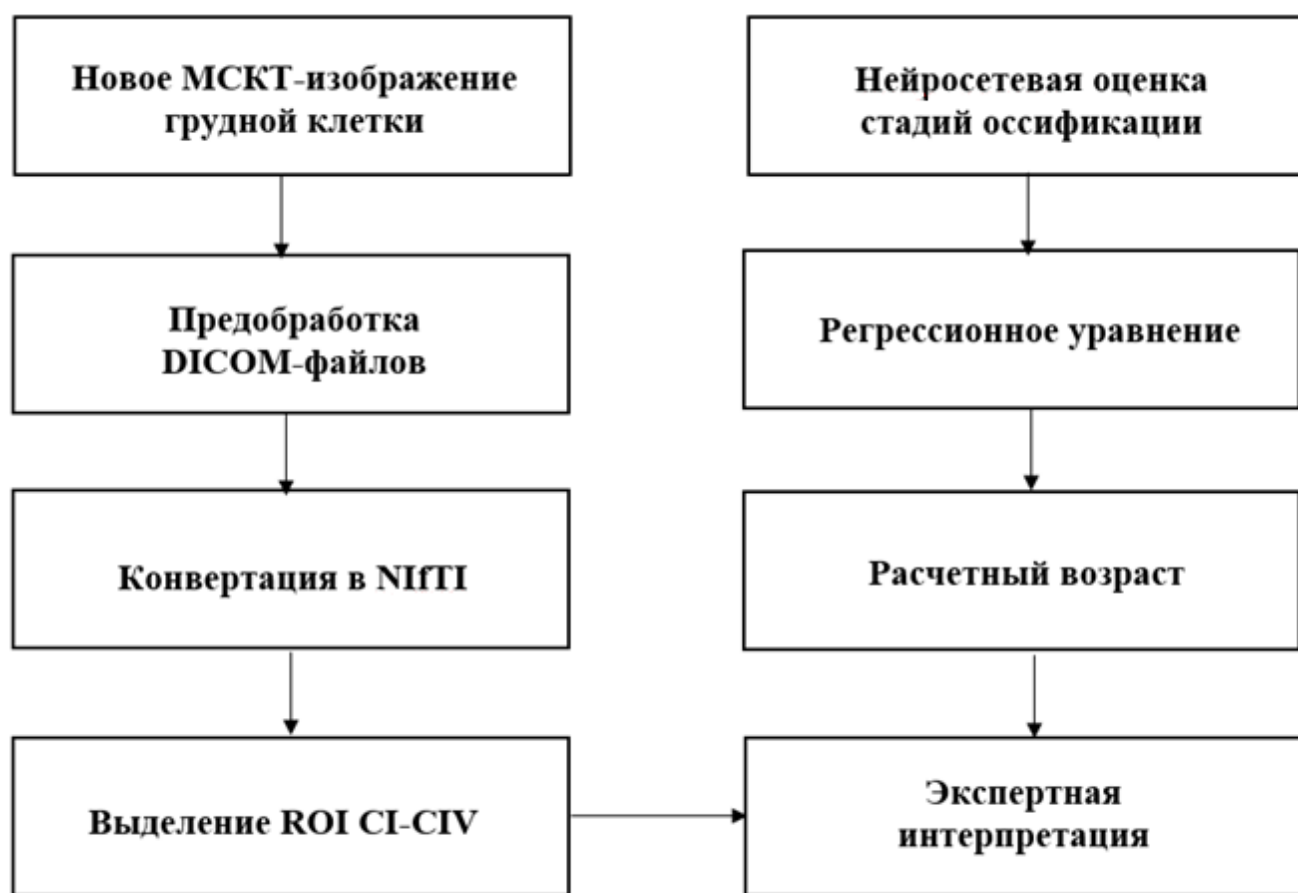


Рисунок 35 — Алгоритм установления возраста человека по результатам МСКТ грудной клетки с использованием методов машинного обучения

Единая многозадачная архитектура используется для анализа набора фрагментов каждого пациента в рамках одной нейросети. Каждый фрагмент обрабатывается собственной 3D-сверточной ветвью, затем извлеченные признаки объединяются. Такая архитектура позволяет учитывать сразу и индивидуальные

особенности каждого сочленения, и их совместную связь с процессами оссификации.

Контроль качества обучения выполнялся с использованием стандартных метрик классификации: accuracy, macro F1-score и матриц ошибок по каждому признаку. Ниже приведены результаты пилотного обучения модели.

Train loss: 4,4590; Val loss: 4,3197; CI acc=0,4412, f1=0,1531; CII acc=0,7353, f1=0,2825; CIII acc=0,5294, f1=0,2308; CIV acc=0,5294, f1=0,1731.

На текущей выборке модель склоняется к доминирующим классам (старается угадывать самый частый класс). Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования предложенного алгоритма при установлении возраста человека и подтверждают обучаемость модели.

Для повышения точности работы алгоритма изменена целевая задача: установление возрастной группы, то есть – классификация целевой группы (Рисунок 36).

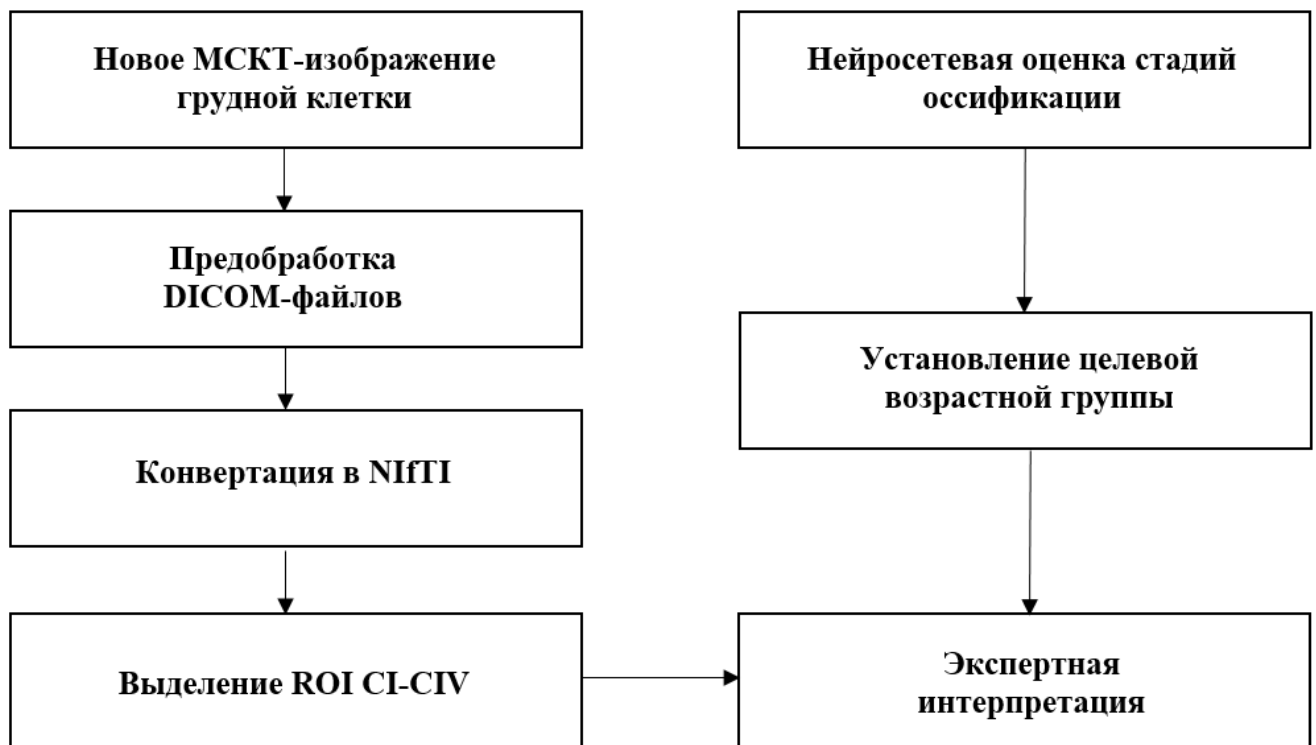


Рисунок 36 – Алгоритм установления целевой возрастной группы по результатам МСКТ грудной клетки с использованием методов машинного обучения

В анализируемой выборке установлены следующие возрастные группы: до 30 лет, 30-50 лет и старше 50 лет. При этом получены новые значения метрик классификации: CI acc=0,742, f1=0,613; CII acc=0,821, f1=0,699; CIII acc=0,749, f1=0,698; CIV acc=0,731, f1=0,682.

Проведенное обучение на базе из 175 подготовленных наблюдений показало, что выбранная архитектура действительно может использоваться для решения поставленной задачи. В ходе проверки данные корректно загружались, модель проходила полный цикл обучения, функция потерь на обучающей выборке снижалась. Полученный результат показывает, что предложенный путь технически выполним: данные можно подготовить в едином формате, нейросеть способна работать с трехмерными ROI-фрагментами, а обучение запускается на сформированной выборке. При увеличении числа МСКТ-исследований, использовании графических вычислителей и проведении полноценной перекрестной проверки возможно обучение более устойчивой модели для автоматизированного определения стадий оссификации и последующего расчета возраста человека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В случаях отсутствия или фальсификации документов, удостоверяющих личность, наиболее важной задачей, реализуемой при выполнении медико-криминалистических исследований в экспертной практике, является установление возраста [16, 17, 18, 21, 28, 30, 31, 41, 42, 44].

За последние годы отмечается рост количества противоправных деяний, совершаемых несовершеннолетними, нарушений миграционного законодательства, преступлений против половой неприкосновенности и, наряду с ними, локальные вооруженные конфликты [16, 30, 31, 44]. Ключевой необходимостью в подобных ситуациях становится установление возраста потерпевших и/или обвиняемых [28, 41, 42, 44]. В этой связи возникает необходимость в разработке методов судебно-медицинской оценки возраста (в том числе экспресс-методов) с приемлемым уровнем точности [4, 7, 28, 42, 44].

В ходе изучения отечественных и зарубежных исследований, посвященных вопросам установления возраста, проанализированы и систематизированы методики, различающиеся как по объектам, так и по методам исследования [17, 18]. В ряде из них отмечены ключевые проблемы внедрения и всеобщего использования (межпопуляционные различия и воздействие средовых факторов) одного и того же метода в различных группах населения. Особенностью последних исследований является переход от остеометрии и традиционной рентгенографии к наиболее современным методам (КТ и МРТ), обеспечивающим наилучшую визуализацию «зон интереса» и снижение субъективного фактора, а также применение компьютерного зрения [28, 42, 44, 61, 64, 65, 67, 70, 74, 85, 86, 90, 91, 97, 102, 115, 116, 117, 118, 125, 130, 140, 181, 187, 188, 191, 198, 211, 213, 214, 215, 219, 231]. Поиск лучших биомаркеров, разработка новых и модернизация уже имеющихся методик определения возраста человека подчеркивают актуальность проблемы идентификации личности и данной работы в целом.

В части исследований, в качестве объекта предикции возраста, рассматривалась грудина [17, 18, 64, 65, 66, 70, 108, 113, 114, 121, 153, 157, 165,

172, 182, 184]. Отмечается, что морфологические признаки грудины, а именно – динамика сращения стернальных и грудино-реберных сочленений, заметно коррелируют с возрастом и могут быть использованы при формировании алгоритма установления возраста.

На основании вышенаписанного были сформированы цель и задачи настоящей работы.

В работе проведена оценка возрастной морфологии грудины и грудино-реберных сочленений по результатам традиционной рентгенографии и мультиспиральной компьютерной томографии [44]. Вначале возрастные изменения оценивались по комплексу, состоящему из 15 рентгенологических признаков, среди которых: полный и частичный синостозы рукоятки и тела грудины (признаки A1 и A2), тела грудины и мечевидного отростка (A7, A8), наличие уплотнения по ходу синостоза между телом и рукояткой грудины (A3) и между телом грудины и мечевидным отростком (A9), наличие уплотнений суставных краев тела грудины (A11), очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер (A12), наросты на суставных краях тела грудины (A14), наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений (A15) и другие. По результатам статистического анализа установлено, что наибольшую диагностическую значимость имеют признаки A12 (коэффициент корреляции (r) равен 0,6), A14 ($r=0,6$), A11 ($r=0,5$), A15 ($r=0,5$), A7 ($r=0,4$). Основываясь на полученных данных, разработана предиктивная модель со средней величиной ошибки прогнозирования возраста 11,77 лет. Также отмечено, что установление возраста посредством разработанной модели позволяет верно отнести индивида только к двум возрастным группам: до и после 30 лет, однако при их конкретизации наблюдается существенное расхождение между прогнозируемым и реальным возрастом [41, 44]. Полученные различия, вероятно, связаны с отсутствием четких критериев возрастных изменений и сложностями трактовки рентгенографических изображений без соответствующих компетенций у оценивающих специалистов [7].

Второй этап работы заключался в оценке возрастной морфологии грудины и грудино-реберных сочленений по результатам МСКТ грудной клетки пациентов мужского и женского пола в возрасте от 18 до 79 лет [42, 44]. Комплекс оцениваемых признаков на данном этапе включал: CI – динамика возрастных изменений костостернальных сочленений (между рукояткой грудины и первыми ребрами), CII – стадии оссификации манубриостернального сочленения, CIII – стадии оссификации ксифостернального сочленения, CIV – возрастные изменения костостернальных сочленений (между реберными вырезками тела грудины и 2-7 парами ребер). Отмечено, что в исследуемой выборке начальные признаки окостенения костостернальных сочленений (признак CI) наблюдались в возрасте $37,72 \pm 2,24$ года, а завершались в $66,19 \pm 2,12$ года. Оссификация манубриостернального сочленения отмечалась, начиная с $54,34 \pm 1,64$ года и завершалась в $55,43 \pm 2,5$ года. Первые признаки окостенения ксифостернального сочленения наблюдались в $44,12 \pm 2,16$ года, а его полное окостенение – в $57,92 \pm 1,46$ года. Частичная оссификация костостернальных сочленений впервые выявлялась в возрасте $43,61 \pm 1,36$ года, а завершалась конечной стадией в $74,82 \pm 0,56$ года. Также установлено, что первые признаки окостенения костостернального сочленения (1 стадия признака CI) характерны для возрастных групп <25 лет, 2 стадия CI – для групп 20-40 лет, 4 стадия CI – для групп >50 лет, а 3 стадия имеет широкую вариабельность с наибольшей аккумуляцией в группах 40-70 лет. 1 стадия CII в используемой выборке наиболее характерна для возрастных групп 20-40 лет, 2 стадия CII – для групп >50 лет, 3 стадия – для групп 40-80 лет. При распределении стадий признака CIII отмечено, что 1 стадия наблюдается преимущественно в группах 20-35 лет, 3 стадия – в группе >60 лет, в то время как 2 стадия равномерно распределена по всем возрастным группам. В отношении признака CIV получено следующее: 1 стадия характерна для групп <25 лет, 2 стадия – 25-60 лет, 3 стадия – 60-70 лет и 4 стадия – для возрастных групп >70 лет [42, 44].

Полученные сведения, а также проведенный статистический анализ выявили значительную связь признаков с возрастом и, в конечном итоге, позволили сформировать предиктивную модель. Для общей выборки коэффициент

детерминации составил 0,7345, для мужской – 0,7347, для женской – 0,7342. В соответствии с этим величина ошибки прогнозирования возраста человека составила 15,72%.

Отдельным этапом работы стала сравнительная характеристика воспроизводимости разработанных методик судебно-медицинского установления возраста [7, 44]. Установлено, что методика определения возраста, основанная на результатах МСКТ-исследования грудной клетки, более воспроизводимая (коэффициент межэкспертной согласованности варьировался от 0,8 до 1 (от значительного до идеального согласия)). Напротив, при оценке Rg-признаков возрастных изменений грудины, коэффициент межэкспертной согласованности находился в пределах от 0,1 до 1 (от незначительного до идеального согласия) в зависимости от оцениваемых признаков.

Помимо визуальной оценки стадий оссификации стернальных и грудино-реберных сочленений по результатам МСКТ грудной клетки, в ходе работы использовались алгоритмы машинного обучения. С целью автоматизации распознавания зоны интереса и интерпретации стадий оссификации признаков CI-CIV построена многовходовая 3D-сверточная модель. Сформированная модель, обученная на основе экспертной оценки возрастных изменений стернальных и грудино-реберных сочленений, интегрирует балльную оценку признаков CI-CIV в ранее разработанное регрессионное уравнение и производит итоговый подсчет возраста человека.

Исследование, проведенное на выборке из 175 МСКТ-изображений грудной клетки, показало, что используемая архитектура модели может применяться при определении возраста или возрастной группы. А при увеличении исследовательской выборки повышается возможность получения более устойчивой модели, что может лечь в основу будущих исследований.

Сформированный в ходе диссертационного исследования комплексный алгоритм оценки возраста является уникальным, благодаря которому представляется возможность установить возраста неизвестного индивида в

условиях дефицита временного ресурса (экспресс-метод) и минимального объема исходных объектов исследования.

Положенные в основу проведенного исследования данные о динамике синостозирования стернальных и грудино-реберных сочленений по результатам МСКТ грудной клетки могут послужить фундаментом для последующих работ, например, – создания алгоритмов установления возраста для более ограниченных социальных групп или же для детального исследования возрастной морфологии иных костных структур.

Полученные результаты могут быть использованы при определении порядка проведения судебно-медицинских экспертиз по установлению возраста неизвестных умерших и живых лиц, а также для формирования дополнительных профессиональных компетенций в виде программ дополнительного профессионального образования. Данная работа является не только условием для повышения качества экспертиз и экспертных выводов, но и отвечает общегосударственным трендам персонализированной и предиктивной медицины, за счет внедрения цифровых технологий и мультидисциплинарного подхода [25, 28].

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что грудина и грудино-реберные сочленения характеризуются определенной последовательностью возрастных изменений. Наибольшая корреляция с возрастом определена для следующих рентгенологических признаков: наличие очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер ($r=0,6$); наросты на суставных краях тела грудины ($r=0,6$); уплотнение суставных краев тела грудины ($r=0,5$); наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений ($r=0,5$); синостоз тела грудины и мечевидного отростка ($r=0,4$). Сила корреляционной связи недостаточна для приемлемого уровня точности при судебно-медицинском установлении возраста.

2. Стадии окостенения стернальных сочленений по результатам МСКТ грудной клетки (костостернальных, манубриостернального и ксифостернального) характеризуются увеличением корреляционной связи при их совокупной оценке – за счет синергетического эффекта. Процессы синостозирования протекают быстрее у лиц женского пола. Начальные и конечные стадии оссификации (1-я и 4-я стадии) МСКТ-признаков характеризуются кумуляцией в узких возрастных группах, в то время как промежуточные стадии (2-я и 3-я) отличаются значительным разбросом между различными возрастными группами. Установленные закономерности возрастных изменений стернальных и грудино-реберных сочленений по результатам МСКТ грудной клетки позволяют использовать их в качестве диагностических критериев при судебно-медицинском установлении возраста.

3. Разработанный метод полуколичественной оценки возрастных изменений стернальных и грудино-реберных сочленений по данным мультиспиральной компьютерной томографии грудной клетки обладает высокой прогностической точностью (73,45% для общей выборки, 73,47% – для мужской выборки, 73,42% – для женской выборки).

4. Метод судебно-медицинского установления возраста, базирующийся на оценке возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по данным

МСКТ грудной клетки, обладает большей воспроизводимостью (коэффициент межэкспертной вариабельности – 0,8-1) по сравнению с методом, в основе которого лежит оценка динамики возрастных изменений грудины по результатам проведения традиционной рентгенографии (коэффициент межэкспертной вариабельности – 0,1-1).

5. Алгоритм установления возраста, в основе которого – анализ инволютивных изменений стернальных и грудино-реберных сочленений с применением методов машинного обучения, может использоваться при комплексной судебно-медицинской оценке возраста человека в качестве дополнительного метода, существенно повышающего объективность конечных результатов.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведение МСКТ грудной клетки с сохранением итоговых файлов изображений в общепринятом международном формате DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine).

2. Исследование первичных срезов анатомических образований грудной клетки – DICOM-изображений (2D), их мультипланарная и 3D-реконструкция с использованием общепринятого лицензионного программного обеспечения, например, InVesalius (импорт и исследование всех DICOM-файлов, стандартный режим просмотра – 2D, режимы просмотра 2D MPR, 3D MPR, Volume Rendering – 3D-реконструкция).

3. Исследование полученных МСКТ-изображений анатомических образований грудной клетки (грудины и грудино-реберных сочленений) на предмет наличия или отсутствия их патологических и/или травматических изменений, в том числе послеоперационных, а также электродов от имплантируемых устройств управления сердечным ритмом. При наличии хотя бы одного из перечисленных выше изменений и устройств не рекомендуется применять предлагаемый метод установления возраста.

4. Проведение балльной экспертной интерпретации возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений в соответствии с методикой, описанной в главе 2.

5. Расчет возраста при помощи регрессионного уравнения:

$$\text{ExpAGE}_1 = -7,51 + 5,25 \times \text{CI} + 5,71 \times \text{CII} + 3,42 \times \text{CIII} + 10,59 \times \text{CIV} + \text{P},$$
 где ExpAGE_1 (expected age_1) – предполагаемый возраст; CI, CII, CIII, CIV – балльная интерпретация признаков возрастных инволютивных изменений (соответственно – 1, 2, 3, 4), P – регрессионный коэффициент для соответствующего пола.

Рекомендуемый порядок действий при установлении возраста человека графически представлен на Рисунке 37.



Рисунок 37 – Пошаговый порядок действий при установлении возраста человека

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Асп. – аспарагиновая кислота

ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота

ИКД – имплантируемый кардиовертер-дефибриллятор

ИКС – имплантируемый кардиостимулятор

ИЛ – идентификация личности

КТ – компьютерная томография

МСКТ – мультиспиральная компьютерная томография

СМЭ – судебно-медицинская экспертиза

AI – искусственный интеллект

Rg – рентгенография

S – площадь

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабенко, В. П. Судебно-медицинская экспертиза костных останков по определению длины тела человека на основе математического моделирования морфологических признаков малоберцовых костей и их фрагментов / В. П. Бабенко, В. И. Бахметьев // Законность и правопорядок в современном обществе. – 2013. – Т. 15. – С. 161-165.
2. Бацевич, В. А. Методические аспекты возрастной оссеографии взрослого населения / В. А. Бацевич, О. М. Павловский, Б. А. Никитюк // Российские морфологические ведомости. – 1998. – № 1-2. – С. 105-111.
3. Бикбаева, Т. С. Изменчивость и половой диморфизм фаланг II-V пальцев кисти взрослых людей : специальность 14.00.02 «Анатомия человека» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Бикбаева Татьяна Сергеевна ; ГОУ ВПО «Саратовский государственный медицинский университет Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию». – Саратов, 2009. – 28 с.
4. Божченко, А. П. Идентификация личности погибших в условиях локального вооруженного конфликта на Северном Кавказе / А. П. Божченко, К. В. Теплов // Медицинские аспекты безопасности полетов : материалы всеармейской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 19-20.
5. Возможности установления видовой принадлежности костных останков методом атомно-силовой микроскопии / В. П. Конев, Ю. О. Шишкина, С. Н. Московский, А. С. Коршунов, И. Л. Шестель, В. В. Голошубина // Вестник судебной медицины. – 2018. – № 4. – С. 25-29.
6. Воронцова, Е. Л. Морфологическая изменчивость костей плечевого пояса и грудины человека : специальность 03.00.14 «Антропология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Воронцова Елена Леонидовна ; МГУ имени М. В. Ломоносова. – Москва, 2005. – 32 с.

7. Воспроизводимость результатов судебно-медицинской оценки возраста с использованием рентгенологического метода / Т. А. Тареева, Н. В. Нарина, Н. О. Нарина, Г. В. Золотенкова // Судебно-медицинская экспертиза. – 2026. – Т. 69. – № 1. – С. 35–39.
8. Ефимов, А. А. Пути оптимизации судебно-медицинских методов определения возраста / А. А. Ефимов, Е. Н. Савенкова, Ю. Д. Алексеев // Судебно-медицинская экспертиза. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 20-22.
9. Звягин, В. Н. Определение возраста взрослого человека по микроструктуре периостального отдела V плюсневой кости / В. Н. Звягин, О. И. Галицкая, Е. С. Анушкина // Судебно-медицинская экспертиза. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 42-46.
10. Звягин, В. Н. Определение половой принадлежности по остеометрическим признакам верхней и нижней конечностей с использованием дискриминантного анализа / В. Н. Звягин, И. М. Синева // Судебно-медицинская экспертиза. – 2007. – Т. 50. – № 5. – С. 18-21.
11. Звягин, В. Н. Остеометрическая диагностика порядковой локализации, пола и длины тела человека по скелетированным поясничным позвонкам / В. Н. Звягин, М. К. Карапетян // Судебно-медицинская экспертиза. – 2010. – № 3. – С. 20-24.
12. Звягин, В. Н. Остеометрическая методика определения порядковой локализации и половой принадлежности ребер с использованием дискриминантного анализа / В. Н. Звягин, Е. Ю. Пермякова, О. И. Галицкая // Судебно-медицинская экспертиза. – 2009. – № 1. – С. 43-44.
13. Звягин, В. Н. Прогнозирование основных соматических характеристик человека при экспертизе отдельных расчлененных частей тела / В. Н. Звягин, М. А. Григорьева // Судебно-медицинская экспертиза. – 2006. – № 2. – С. 20-24.
14. Звягин, В. Н. Экспертное значение ребер взрослого человека при судебно-медицинской экспертизе скелетированных останков : методические рекомендации / В. Н. Звягин, О. И. Галицкая, Е. Ю. Пермякова. – Москва, 2016. – 64 с.
15. Золотаренко, А. Д. Современные молекулярно-генетические методы оценки возраста в криминалистике / А. Д. Золотаренко, Е. В. Чекалин, С. А. Брускин // Российский генетический журнал. – 2019. – Т. 55. – № 5. – С. 1460-1471.

16. Золотенков, Д. Д. Установление возраста индивидуума на основе анализа компьютерной томографии коленного сустава с применением искусственных нейронных сетей и компьютерного зрения. Предварительные результаты / Д. Д. Золотенков, М. И. Труфанов, В. И. Солодовников // Судебная медицина. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 397-407.
17. Золотенкова, Г. В. Использование морфометрических параметров грудной кости для установления общегрупповых признаков неопознанных личностей. Обзор литературы / Г. В. Золотенкова, Т. А. Тареева // Актуальные вопросы судебной медицины и экспертной практики – 2024: тезисы XI Международного конгресса, посвященного памяти профессора Владимира Александровича Клевно / под ред. проф. А. В. Максимова. – М. : Ассоциация СМЭ, 2024. – С. 225-227.
18. Золотенкова, Г. В. Морфология грудины для формирования биологического профиля неопознанного индивида. Обзор литературы / Г. В. Золотенкова, Т. А. Тареева // Судебно-медицинская экспертиза. – 2024. – Т. 67. – № 3. – С. 60-66.
19. Использование колебательной спектроскопии в сочетании с машинным обучением для задач судебной медицины / Р. Альпуче, Ю. И. Пиголкин, С. Н. Захаров, И. К. Леднев // Судебно-медицинская экспертиза. – 2024. – Т. 67. – № 4. – С. 69-72.
20. Исследование аминокислотного состава зуба в целях судебно-медицинской идентификации личности / Ю. И. Пиголкин, Г. В. Золотенкова, П. С. Веленко, Б. Н. Изотов // Судебно-медицинская экспертиза. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 42-45.
21. Исследование закономерностей научно-практического развития судебно-медицинской идентификации личности с использованием элементов наукометрического анализа / Г. В. Золотенкова, М. П. Полетаева, Ю. В. Ломакин, О. О. Мехоношина // Судебно-медицинская экспертиза. – 2023. – Т. 66. – № 6. – С. 49-54.
22. Комолкин, И. А. Клинические варианты деформаций грудной клетки (обзор литературы) / И. А. Комолкин, О. Е. Агранович // Журнал клинической и экспериментальной ортопедии им. Г. А. Илизарова. – 2017. – Т. 23. – № 2. – С. 241-247.

23. Лаптев, З. Л. Возрастные особенности грудины в судебно-медицинском отношении : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. – Москва, 1971. – 32 с.
24. Мальцева, Н. Л. Вариантная анатомия подъязычной кости и возможности ее применения в идентификации личности: специальность 14.00.02 «Анатомия человека», 14.00.24 «Судебная медицина» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Мальцева Надежда Леонидовна ; ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова» Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию и в отделе идентификации личности РЦСМЭ Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию. – Санкт-Петербург, 2006. – 21с.
25. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации : Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490 (ред. от 15.02.2024). – URL: <https://base.garant.ru/72838946/> (дата обращения: 12.03.2026). – Текст : электронный.
26. Определение биологического профиля по морфологическим признакам ребер / А. А. Долгов, А. С. Абрамов, Д. В. Веселкова, Н. А. Романько // Судебная медицина. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 21-25.
27. Оценка биологического возраста человека по рентгенологическим признакам костей кисти / Ю. И. Пиголкин, М. А. Юрченко, Г. В. Золотенкова, Н. Н. Гончарова, А. С. Мосоян // Вестник судебной медицины. – 2015. – № 2. – С. 27-30.
28. Оценка возраста с использованием КТ коленного сустава и нейросетевых технологий / Д. Д. Золотенков, Е. В. Огарев, Д. К. Валетов, С. М. Нефедова, Г. В. Золотенкова, Ю. И. Пиголкин // Судебно-медицинская экспертиза. – 2023. – Т. 66. – № 4. – С. 34-40.
29. Пашкова, В. И. Судебно-медицинское отождествление личности по костным останкам // В. И. Пашкова, Б. Д. Резников. — Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1978. — 320 с.

30. Пиголкин, Ю. И. Методологические основы определения возраста человека / Ю. И. Пиголкин, Г. В. Золотенкова, Д. П. Березовский // Судебно-медицинская экспертиза. – 2020. – Т. 63. – № 3. – С. 45-50.
31. Пиголкин, Ю. И. Определение возраста человека по костной ткани / Ю. И. Пиголкин, М. В. Федулова, Г. В. Золотенкова // Судебно-медицинская экспертиза. – 2012. – Т. 55. – № 1. – С. 49-51.
32. Планиметрический и планиграфический методы для определения возраста человека по рентгенограммам костей кисти / Ю. И. Пиголкин, М. А. Юрченко, Г. В. Золотенкова, А. Г. Ластовицкий // Вестник Авиценны. – 2012. – № 3. – С. 115-122.
33. Прогнозирование возраста на основании изучения элементного состава костной ткани с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии / С. М. Нефедова, И. А. Новиков, М. В. Кравчик, Д. Д. Золотенков, А. М. Суббот, Ю. И. Пиголкин // Судебно-медицинская экспертиза. – 2023. – Т. 66. – № 4. – С. 52-57.
34. Реальные возможности посмертной лучевой диагностики в практике судебно-медицинского эксперта / А. В. Ковалев, А. Ф. Кинле, Л. С. Коков, В. А. Сеницын, В. А. Фетисов, Б. А. Филимонов // Consilium Medicum. – 2016. – Т. 18. – № 13. – С. 9-25.
35. Российская Федерация. Министерство здравоохранения и социального развития. Об утверждении Порядка организации и производства судебно-медицинских экспертиз в государственных судебно-экспертных учреждениях Российской Федерации : приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 12 мая 2010 г. № 346н // КонсультантПлюс : офиц. сайт. – URL: <https://demo.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=103821&dst=1000000001&cacheid=42F0889245969DE52050A90660C2B290&mode=splus&rnd=IqT9Gw#Uh2XEOVIEIRihW97> (дата обращения: 02.07.2025). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
36. Российская Федерация. Министерство здравоохранения. Об утверждении порядка проведения судебно-медицинской экспертизы : Приказ Министерства здравоохранения от 25 сентября 2023 г. № 491н // КонсультантПлюс : офиц. сайт. –

URL: <https://demo.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=460465&dst=1000000001&cacheid=4A4DF091F01B84279CE4B79673FD66E7&mode=splus&rnd=IqT9Gw#eVKbEOVqYj8mh12G> (дата обращения: 02.07.2025). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

37. Сальманов, А. А. Оценка возраста плода человека по антропометрическим параметрам скелета нижней конечности / А. А. Сальманов, А. Е. Стрижаков // Ученые записки СПбГМУ им. академика И. П. Павлова. – 2011. – Т. 18. – № 2. – С. 135-136.

38. Смирнов, А. В. Определение половой принадлежности по остеометрическим признакам скелетированных ключиц / А. В. Смирнов // Здоровье и образование в XXI веке. – 2017. – Т. 19. – № 12. – С. 272-276.

39. Становление и начальный этап развития судебно-медицинской антропологии в Московском университете / Ю. В. Ломакин, Г. В. Золотенкова, А. В. Ходулапов, Д. Д. Золотенков // Судебно-медицинская экспертиза. – 2023. – Т. 66. – № 4. – С. 73-76.

40. Судебно-медицинская диагностика возраста : монография / П. В. Глыбочко, Ю. И. Пиголкин, В. Н. Николенко [и др.] ; под редакцией П. В. Глыбочко, Ю. И. Пиголкина, В. Н. Николенко. – Москва: Издательство Первого МГМУ имени И. М. Сеченова, 2016. – 317 с.

41. Судебно-медицинская диагностика возраста, посредством оценки процессов оссификации грудины / Г.В. Золотенкова, С.В. Шигеев, Т.А. Тареева, Е.К. Вершинина // Судебно-медицинская экспертиза. – 2024. – Т. 67. – № 4. – С. 47-53.

42. Судебно-медицинская оценка возраста с использованием трехмерных КТ-изображений грудной клетки / Т. А. Тареева, Л. А. Акулкина, Д. А. Долганов, М. М. Меркулова, Г. В. Золотенкова // Судебно-медицинская экспертиза. – 2026. – Т. 69. – № 2. – С. 10–16.

43. Судебно-медицинская экспертиза по установлению возраста живых лиц в России: проблемные аспекты и пути решения / Г. В. Золотенкова, И. Ю. Макаров, П. В. Минаева П. В., Д. Д. Золотенков, М. П. Полетаева // Судебно-медицинская экспертиза. – 2023. – Т. 66. – № 5. – С. 11-17.

44. Тареева, Т. А. Рентгенологическое исследование грудины для оценки общегрупповых признаков / Т. А. Тареева // Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 220-летию образования кафедры судебной медицины Сеченовского Университета «Актуальные вопросы судебной медицины» (Москва, 26-27 сентября 2024 года) : сборник тезисов / отв. ред. Ю. И. Пиголкин ; ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет). – М. : Издательство Сеченовского Университета, 2024. – С. 178-180.
45. Тареева, Т. А. Судебно-медицинская оценка возраста по морфологическим параметрам грудины / Т. А. Тареева, Д. А. Долганов, Г. В. Золотенкова // Актуальные вопросы судебной медицины и экспертной практики – 2026: тезисы XIII Международного конгресса / под ред. проф. А. А. Халикова. – М. : Ассоциация СМЭ, 2026. – С. 156-159.
46. Титаренко, Е. Н. Определение возраста по морфологическим признакам лонного сочленения / Е. Н. Титаренко, А. А. Девятериков // Избранные вопросы судебно-медицинской экспертизы. – 2008. – № 9. – С. 111-114.
47. Чертовских, А. А. Возрастные изменения суставной впадины лопатки / А. А. Чертовских, Е. С. Тучик // Судебно-медицинская экспертиза. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 31-33.
48. Шалина, Т. И. Особенности роста костей кисти как критерий определения биологического возраста детей в различных экологических условиях проживания / Т. И. Шалина, Л. С. Васильева, Ю. С. Исаев // Судебно-медицинская экспертиза. – 2009. – Т. 52. – № 4. – С. 20-24.
49. Эделев, Н. С. Об определении возраста неопознанных трупов / Н. С. Эделев, В. Г. Воробьев // Судебно-медицинская экспертиза. – 2014. – Т. 57. – № 6. – С. 27-28.
50. A method sex estimation using the proximal femur / F. Curate, J. Coelho, D. Gonçalves, [et al.] // Forensic Science International. – 2016. – Vol. 266. – P. 579.e1-579.e7.
51. A method to establish the relationship between chronological age and stage of union from radiographic assessment of epiphyseal fusion at the knee: an Irish population

- study / J. E. O'Connor, C. Bogue, L. D. Spence, [et al.] // *Journal of Anatomy*. – 2008. – Vol. 212(2). – P. 198-209.
52. A study of sexual dimorphism of the human sternum in the southern Nigerian population / E. A. Osunwoke, I. U. Gwunireama, C. N. Orish, [et al.] // *Journal of Applied Biosciences*. – 2010. – Vol. 26. – P. 1636-1639.
53. Abdulai, AR. Models for estimating age and sex from variables of the proximal femur in a Ghanaian population / AR. Abdulai, M. Banyeh, Y. Adams // *Forensic Science International: Reports*. – 2022. – Vol. 5. – P. 100270.
54. Accuracy and self-validation of automated bone age determination / D. D. Martin, A. D. Calder, M. B. Ranke, [et al.] // *Scientific reports*. – 2022. – Vol. 12. – P. 6388.
55. Ackert-Bicknell, CL. Impact of the Environment on the Skeleton: Is it Modulated by Genetic Factors? / CL. Ackert-Bicknell, D. Karasik // *Current Osteoporosis Reports*. – 2013. – Vol. 11. – P. 219-228.
56. Adult age estimation from the sternum using maximum intensity projection images of CT and data mining in a Chinese population / X. Tang, T. Lu, Y. Zhou, M. Zhan, W. Chen, J. Liu, Y. Gui, Z. Peng, Z. Deng, F. Fan // *International Journal of Legal Medicine*. - 2024. - Vol. 138. – P. 961–970.
57. Advancing our understanding of the inheritance and transmission of pectus excavatum / L. Horth, M. W. Stacy, V. K. Proud, [et al.] // *Journal of pediatric genetics*. – 2012. – Vol. 1(3). – P. 161-173.
58. After the initial fracture in postmenopausal women, where do subsequent fractures occur? / C. J. Crandall, R. P. Hunt, A. Z. LaCroix, [et al.] // *eClinical Medicine*. – 2021. – Vol. 35. – P. 100826.
59. Age assessment of youth and young adults using magnetic resonance imaging of the knee: a deep learning approach / A. L. Dallora, J. S. Berglund, M. Brogren, [et al.] // *JMIR Medical Informatics*. – 2019. – Vol. 7. – No 4. – P. e16291.
60. Age estimation / A. Schmeling, G. Geserick, W. Reisinger, [et al.] // *Forensic Science International*. – 2007. – Vol. 165(2-3). – P. 178-181.

61. Age estimation based on computed tomography analysis of the scapula / G. Karaman, I. O. Can, Y. E. Cekdemir, [et al.] // *Medicina (Kaunas)*. – 2024. – Vol. 60(4). – P. 581-593.
62. Age estimation based on CT chest analysis of ossification of the Xiphisternal joint in a living population aged 35-50 in a tertiary setup / P. V. Badhe, A. D. Shukla, P. Mhatre, [et al.] // *Cureus*. – 2023; – Vol. 15(4). – P. e38160.
63. Age estimation for two Mediterranean populations: rib histomorphometry applied to forensic identification and bone remodelling research / J. G. García-Donas, R. R. Paine, A. Bonicelli, [et al.] // *International Journal of Legal Medicine*. – 2022. – Vol. 136. – P. 1469-1481.
64. Age estimation from ossification of sternum and true ribs using 3D post-mortem CT images in a Japanese population / T. Monum, Y. Makino, S. Prasitwattanaseree, [et al.] // *Legal Medicine*. – 2020. – Vol. 43. – P. 101663.
65. Age estimation from sternbral fusion in an Indian population – A computed tomographic evaluation / R. Shedge, T. Kanchan, P. K. Garg, [et al.] // *Legal Medicine (Tokyo, Japan)*. – 2021. – Vol. 53. – P. 101951.
66. Age estimation from sternum of eastern Indian population: Autopsy based study / M. R. Sahu, P. R. Tripathy, M. K. Mohanty, [et al.] // *Indian Journal of Forensic and Community Medicine*. – 2022. – Vol. 9(2). – P. 59-64.
67. Age estimation in children and young adolescent for forensic purposes using fourth cervical vertebra (C4) / R. Cameriere, A. Giuliodori, M. Zampi, [et al.] // *International Journal of Legal Medicine*. – 2015. – Vol. 129. – P. 347-355.
68. Age estimation in Forensic Sciences Application of combined aspartic acid racemization and radiocarbon analysis / K. Alkass, B. A. Buchholz, S. Ohtani, [et al.] // *Molecular & cellular proteomics: MCP*. – 2010. – Vol. 9(5). – P. 1022-1030.
69. Age estimation in humans through the analysis of aspartic acid racemization from teeth: A scoping review of methods, outcomes, and open research questions / G. T. Matteussi, V. Jacometti, A. Franco, [et al.] // *Forensic Science International*. – 2022. – Vol. 331. – P. 111154.

70. Age estimation of a Thai population based on maturation of the medial clavicular epiphysis using computed tomography / N. Pattamapaspong, C. Madla, K. Mekjaidee, [et al.] // *Forensic Science International*. – 2015. – Vol. 246. – P. 123.e1-123.e5.
71. Age of fusion of Manubrium-sternum in Delhi City of India – A digital Radiographic study / P. Jain, V. Singh, K. K. Banerjee, [et al.] // *Journal of Medical Science and Clinical Research*. – 2018. – Vol. 6(8). – P. 870-875.
72. Age prediction formulae from radiographic assessment of skeletal maturation at the knee in an Irish population / J. E. O'Connor, J. Coyle, C. Bogue, [et al.] // *Forensic Science International*. – 2014. – Vol. 234. – P. 188.e1-188.e8.
73. Age prediction using a large chest X-ray dataset: [Proceedings of SPIE «Medical Imaging 2019 : Computer-Aided Diagnosis», San Diego, 16-21 February 2019] / A. Karargyris, S. Kashyap, J. T. Wu, [et al.]. – Text : electronic // SPIE. Digital Library. – URL <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/>. – Date of publish : 13.03.2019.
74. Ahmed, A. A. Multi-detector computed tomography for the estimation of the sex from sternal medullary cavity measurements in Sudanese individuals / A. A. Ahmed, A. O. Koko, M. M. Elsayed // *Forensic Science International: Reports*. – 2021. – Vol. 4. – P. 100244.
75. Albanese, J. A metric method for sex determination using the proximal femur and fragmentary hipbone / J. Albanese, G. Eklics, A. Tuck // *Journal of Forensic Sciences*. – 2008. – Vol. 53(6). – P. 1283-1288.
76. Alcohol Consumption, Bone Mineral Density, and Risk of Osteoporotic Fractures: A Dose-Response Meta-Analysis / J. Godos, F. Giampieri, E. Chisari, [et al.] // *International Journal of Environmental research and public health*. – 2022. – Vol. 19(3). – P. 1515-1526.
77. Amiri, Y. Investigation of the relationship between corpse age and microscopic morphometric indices of the fourth and sixth rib bones / Y. Amiri, J. Rezaian, M. S. Taheri // *Biodemography and social biology*. – 2022. – Vol. 67(2). – P. 164-173.

78. Anatomical features of the sternum in a Kenyan population / H. El-Busaidy, W. Kaisha, J. Hassanali, [et al.] // *Anatomy Journal of Africa*. – 2014. – Vol. 3. – No 1. – P. 255-259.
79. Anatomical, histologic, and genetic characteristics of congenital chest wall deformities / A. A. Fokin, N. M. Steuerwald, W. A. Ahreus, [et al.] // *Seminars in thoracic cardiovascular surgery*. – 2009. – Vol. 21(1). – P. 44-57.
80. Anterior chest wall non-traumatic diseases: a road map for the radiologist / S. Guerrini, G. Bagnacci, A. Barile, [et al.] // *Acta bio-medica: Atenei Parmensis*. – 2020. – Vol. 91(S8). – P. 43-50.
81. Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 Method) / J. M. Tanner, R. H. Whitehouse, W. A. Marshall, M. J. R. Healy, H. Goldstein. – 2nd edn. – London: Academic Press, 1975.
82. Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW3 Method) / J. M. Tanner, M. J. R. Healy, H. Goldstein, N. Cameron. – London : W.B. Saunders, 2001.
83. Ateşoğlu, S. Evaluation of the morphological characteristic and sex differences of sternum by multi-detector computed tomography / S. Ateşoğlu, M. Deniz, A. I. Uslu // *Folia morphologica*. – 2018. – Vol. 77(3). – P. 489-497.
84. Bacci, N. Forensic age-at-death estimation from the sternum in a black South African population / N. Bacci, E. K. Nchabeleng, B. K. Billings // *Forensic Science International*. – 2018. – Vol. 282. – P. 233.e1-233.e7.
85. Badr El Dine, F. M. M. Sex determination using anthropometric measurements from multi-slice computed tomography of the 12th thoracic and first lumbar vertebrae among adult Egyptians / F. M. M. Badr El Dine, M. M. El Shafei // *Egyptian Journal of Forensic Sciences*. – 2015. – Vol. 5(3). – P. 82-89.
86. Barszcz, M. A review of methods of age estimation based on postmortem computed tomography / M. Barszcz, K. J. Woźniak // *Forensic Sciences Research*. – 2025. – Vol. 10(1). – owae036.
87. Bifid intrathoracic rib: a case report and classification of intrathoracic ribs / H. Kamano, T. Ishihama, H. Ishihama, [et al.] // *Internal medicine (Tokyo, Japan)*. – 2006. – Vol. 45(9). – P. 627-630.

88. Boat, T. Kendig's Disorders of the Respiratory Tract in Children : book / T. Boat, R Wilmatt, A. Bush; edited by V. Chernick, T. Boat, E. Kendig, R. Wilmatt. – 7th edition. – Philadelphia : Saunders/Elsevier, 2006. – 1111 p. – ISBN 978-0-721-63695-5.
89. Bone age assessment and sex determination using transfer learning / N. H. Nguyen, B. P. Nguyen, M. T. Nguyen, [et al.] // Expert system with applications. – 2022. – Vol. 200. – P. 116926.
90. Bone age assessment using various medical imaging techniques enhanced by artificial intelligence / W. Yuan, P. Fan, L. Zhang, [et al.] // Diagnostics. – 2025. – Vol. 15(3). – P. 257-274.
91. Bone age estimation based on multislice computed tomography study of the scapula / F. Nougariolis, FZ. Mokrane, N. Sans, [et al.] // International Journal of Legal Medicine. – 2017. – Vol. 131. – P. 547-558.
92. Bongiovanni, R. Estimating sex of the human skeleton based on metrics of the sternum / R. Bongiovanni, M. K. Spradley // Forensic Science International. – 2012. – Vol. 219(1-3). – P. 290.e1-290.e7.
93. Buckwalter, J. A. Presentation and Treatment of Poland Anomaly / J. A. Buckwalter, A. S. Shah // Hand (New York, N.Y.). – 2016. – Vol. 11(4). – P. 389-395.
94. Carvallo, D. Sex estimation using the proximal end of the femur on a modern Chilean sample / D. Carvallo, R. Retamal // Forensic Science International: Reports. – 2020. – Vol. 2. – P. 100077.
95. Chan, A. H. W. Variation in cortical bone histology within the human femur and its impact estimating age at death / A. H. W. Chan, C. M. Crowder, T. L. Rogers // American Journal of Biological Anthropology. – 2007. – Vol. 132(1). – P. 80-88.
96. Chest wall anomalies: pectus excavatum and pectus carinatum / M. J. Goretsky, R. E. Kelly Jr, D. Croitoru, [et al.] // Adolescent medicine clinics. – 2004. – Vol. 15(3). – P. 455-471.
97. Chronological age estimation for medico-legal expertise-based on sternoclavicular joint CT images using a deep neural network / C. Sun, Y. Salimi, I. Shiri, [et al.] // Forensic Imaging. – 2025. – Vol. 40. – P. 200619.

98. Chronological age prediction based on DNA methylation: massive parallel sequencing and random forest regression / J. Naue, H. C. J. Hoefsloot, O. R. F. Mook, [et al.] // *Forensic science international. Genetics*. – 2017. – Vol. 31. – P. 19-28.
99. Chumela, Wm. C. The FELS method of assessing the skeletal maturity of the hand-wrist / Wm. C. Chumela, A. F. Roche, D. Thissen // *American Journal of human biology: the official journal of the Human Biology Council*. – 1989; – Vol. 1(2). – P. 175-183.
100. Classification of the dysmorphology of pectus excavatum / M. J. Cartoski, D. Nuss, M. J. Goretsky, [et al.] // *Journal of pediatric surgery*. – 2006. – Vol. 41(9). – P. 1573-1581.
101. Complete Ectopia Cordis: A Case Report and Literature Review / S. Pius, H. A. Ibrahim, M. Bello, [et al.] // *Case reports in pediatrics*. – Vol. 2017(1). – P. 1858621.
102. Computed tomographic evaluation of the acetabulum for age estimation in an Indian population using principal component analysis and regression models / V. Warriar, R. Shedje, P. K. Garg, [et al.] // *International Journal of Legal Medicine*. – 2022; – Vol. 136. – P. 1637-1653.
103. Congenital high Scapula (Sprengel's deformity): Four cases / R. Guillaume, E. Nectoux, J. Bigot, [et al.] // *Diagnostic and International Imaging*. – 2012. – Vol. 93(11). – P. 878-883.
104. Demographic characteristics of pectus deformities across Turkey / H. Işık, H. Çaylak, E. Sapmaz, [et al.] // *Turkish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. – 2020. – Vol. 28(2). – P. 322-330.
105. Determinación antropológica del sexo a través del esternón / E. D. Fernández, A. S. Sáez, J. I. de Miguel Moro, [et al.] // *Revista de la Escuela de Medicina Legal*. – 2007. – Vol. 6. – P. 27-42.
106. Determination of sex from morphometry of sternum using multidetector computed tomography in Central Indian population / J. S. Sravan, A. Arneet, Y. Jayanthi, [et al.] // *International Journal of applied & Basic medical research*. – 2025. – Vol. 15(1). – P. 32-37.

107. Determination of sex from the metacarpals in a Thai population / P. Khanpetch, S. Prasitwattanseree, D. T. Case, [et al.] // *Forensic Science International*. – 2012. – Vol. 217(1-3). – P. 229.e1-229.e8.
108. Determination of the age with the help of ossification of the sternum / V. Kumar, R. Waghmare, R. B. Gaikwad, [et al.] // *International Journal Pharmaceutical and Biomedical Research*. – 2012. – Vol. 3(1). – P. 5-6.
109. Determining gender by taking measurements from magnetic resonance images of the patella / H. Y. Teke, Ö. Ünlütürk, E. Günaydin, [et al.] // *Journal of forensic and legal medicine*. – 2018. – Vol. 58. – P. 87-92.
110. Discrete traits of the sternum and ribs: a useful contribution to identification in forensic anthropology and medicine / E. Verna, MD. Piercecchi-Marti, K. Chaumoitre, [et al.] // *Journal of Forensic Science*. – 2013. – Vol. 58(3). – P. 571-577.
111. Does static precede dynamic osteogenesis in endochondral ossification as occurs in intramembranous ossification / M. Ferretti, C. Palumbo, L. Bertoni, [et al.] // *The anatomical record. Part A, Discoveries in molecular, cellular, and evolutionary biology*. – 2006. – Vol. 288A. – P. 1158-1162.
112. Enhanced possibilities to make statements on the ossification status of the medial clavicular epiphysis using an amplified staging scheme in evaluating thin-slice CT scans / M. Kellinghaus, R. Schulz, V. Vieth, [et al.] // *International journal of legal medicine*. – 2010. – Vol. 124. – P. 321-325.
113. Estimation of age from human sternum – an autopsy study / C. Manoharan, V. Dhanalakshmi, D. Thangam, [et al.] // *Indian Journal of Forensic and Community Medicine*. – 2016. – Vol. 3(2). – P. 128-132.
114. Estimation of age from human sternum: an autopsy study on a sample from South India / H. V. Chandrakanth, T. Kanchan, K. Krishan, [et al.] // *International journal of legal medicine*. – 2012. – Vol. 126. – P. 863-868.
115. Estimation of sex based on metrics of the sternum in a contemporary Jordanian population A computed tomographic study / H. Kalbounneh, N. Mubarak, S. Daradken, [et al.] // *Medicine (Baltimore)*. – 2021. – Vol. 100(49). – P. e28169.

116. Estimation of sex from sternal measurements in a Western Australian population / D. Franklin, A. Flavel, A. Kuliukas, [et al.] // *Forensic science international*. – 2012. – Vol. 217(1-3). – P. 230.e1-230.e5.
117. Estimation of sex in Japanese cadavers based on sternal measurements using multidetector computed tomography / S. Torimitsu, Y. Makino, H. Saitoh, [et al.] // *Legal medicine (Tokyo, Japan)*. – 2015. – Vol. 17(4.) – P. 226-231.
118. Estimation of stature and sex from sternal lengths: an autopsy / G. N. Yonguc, A. Kurtulus, O. Bayazit, [et al.] // *Anatomical science international*. – 2015. – Vol. 90. – P. 89-96.
119. Estimation of stature from the length of the sternum in South Indian females / R. G. Menezes, K. R. Nagesh, F. N. P. Monteiro, [et al.] // *Journal of forensic and legal medicine*. – 2011. – Vol. 18(6). – P. 242-245.
120. Estimation of the sex in a contemporary Saudi population based on sternal measurements using multidetector computed tomography / A. A. Ahmed, F. O. Alshammari, A. S. Alrafiah, [et al.] // *HOMO*. – 2017. – Vol. 68(6). – P. 411-421.
121. Evaluation of sternal morphology according to age and sex with multidetector computerized tomography / G. Bolatlı, N. U. Doğan, M. Koplay, [et al.] // *Anatomy (International Journal of Experimental and Clinical Anatomy)*. – 2020. – Vol. 14(1). – P. 29-38.
122. Evaluation of the postnatal development of the sternum and sternal variations using multidetector CT / H. Bayaroğulları, E. Yengil, R. Darvan, [et al.] // *Diagnostic and interventional radiology (Ankara, Turkey)*. – 2014. – Vol. 20(1). – P. 82-89.
123. Feng, X. Chemical and Biochemical Basis of Cell-Bone Matrix Interaction in Health and Disease / X. Feng // *Current chemical biology*. – 2009. – Vol. 3(2). – P. 189-196.
124. Forensic age estimation by MRI of the knee – comparison of two classification stages in a German population / V. Malokaj, M. F. Wernsing, S. N. Kunz, [et al.] // *International Journal of Legal Medicine*. – 2024. – Vol. 138. – P. 2387-2400.

125. Forensic age estimation by the Schmeling method: computed tomography analysis of the medial clavicular epiphysis / O. Ekizoglu, E. Hocaoglu, E. Inci, [et al.] // International journal of legal medicine. – 2015. – Vol. 129. – P. 203-210.
126. Forensic age estimation in males by MRI based on the medial epiphysis of the clavicle / T. Widek, J. De Tobel, T. Ehammer, [et al.] // International Journal of Legal Medicine. – 2023. – Vol. 137. – P. 679-689.
127. Forensic age estimation on digital X-ray images: medial epiphyses of the clavicle and first rib ossification in Relation to chronological age / P. M. Garamendi, M. I. Landa, M. C. Botella, [et al.] // Journal of Forensic Sciences. – 2011. – Vol. 56(s1). – P. s3-s12.
128. Forensic age estimation using computed tomography of the medial clavicular epiphysis: a systematic review / C. Hermetet, P. Saint-Martin, A. Gambier, [et al.] // International Journal of Legal Medicine. – 2018. – Vol. 132. – P. 1415-1425.
129. Forensic sex estimation using the vertebrae: an evaluation on two European population / N. Garoufi, A. Bertsatos, M. E. Chovalopoulou, [et al.] // International Journal of Legal Medicine. – 2020. – Vol. 134. – P. 2307-2318.
130. Franklin, D. CT evaluation of timing for ossification of the medial clavicular epiphysis in a contemporary Western Australian population / D. Franklin, A. Flavel // International Journal of Legal Medicine. – 2015. – Vol. 129. – P. 583-594.
131. Frequency of sternal variations and anomalies evaluated by MDCT / E. Yekeler, M. Tunaci, A. Tunaci, [et al.] // American Journal of Roentgenology. – 2006. – Vol. 186(4). – P. 956-960.
132. Frequency of sternal variations in living individuals / R. Turkay, E. Inci, S. Ors, [et al.] // Surgical and Radiological Anatomy. – 2017. – Vol. 39. – P. 1273-1278.
133. Gender differentiation from sternum a postmortem metric study / D. K. Atal, A. Murari, Y. Rani, [et al.] // International Journal of Medical Toxicology & Legal Medicine. – 2008. – Vol. 11(2). – P. 53-58.
134. Ghorbanlou, M. Morphometric study of sternum by computed tomography in Iranian population: a method to discriminate between male and female / M. Ghorbanlou, F. Moradi, Hr. Asgari // Forensic Imaging. – 2022. – Vol. 28. – P. 200501.

135. Gilsanz, V. Hand bone age: a digital Atlas of skeletal maturity / V. Gilsanz, O. Ratib. – Berlin : Springer, 2005.
136. Godde, K. The use of informative priors in Bayesian modeling age-at-death; a quick look at chronological and biological age changes in the sacroiliac joint in American males / K. Godde // AIMS Public Health. – 2017. – Vol. 4(3). – P. 278-288.
137. Goliath, J. R. Variation in osteon histomorphometrics and their impact on age-at-death estimation in older individuals / J. R. Goliath, M. C. Stewart, S. D. Stout // Forensic Science International. – 2016. – Vol. 262. – P. 282.e1-282.e6.
138. Greulich, W. Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist / W. Greulich, S. Pyle. – Stanford : Stanford University Press, 1959. – 272 p. – ISBN 978-0-804-70398-7.
139. Gumpangseth, T. Age estimation in the combined long bones and ribs by histomorphometry: Past, present, and future / T. Gumpangseth, P. Mahakkanukrauh // Medicine, Science and the Law. – 2023. – Vol. 64(1). – P. 52-71.
140. Gümüş, B. Can forensic radiological skeletal age estimation be performed by examining ischiopubic-ilioischial-iliopubic synchondrosis in computed tomography images? / B. Gümüş, E. Karavaş, O. Taydaş // PloS ONE. – 2022. – Vol. 17(4). – P. e0266682.
141. Habib, S. R. Stature estimation from hand and phalanges lengths of Egyptians / S. R. Habib, N. N. Kamal // Journal of Forensic and Legal Medicine. – 2010. – Vol. 17(3). – P. 156-160.
142. Hackman, L. Age estimation using foot radiographs from a modern Scottish population / L. Hackman, C. M. Davies, S. Black // Journal of Forensic Sciences. – 2013. – Vol. 58(s1). – P. s146-s150.
143. Histological estimation of age at death from the compact bone of burned and unburned human ribs / K. Absolonova, P. Veleminsky, M. Dobisikova, [et al.] // Journal of Forensic Science. – 2013. – Vol. 58(s1). – P. s135-s145.
144. Huang, Z. Sternal insufficiency fractures of post-menopausal women: retrospective analysis of 17 cases / Z. Huang, B. Yi, H. Liu // Chinese medical sciences journal. – 2012. – Vol. 27(2). – P. 101-105.

145. Identification of age and sex based on knee radiography / S. M. Aly, B. Shrestha, D. J. Hong, [et al.] // *Forensic Science International*. – 2016. – Vol. 267. – P. 231.e1-231.e7.
146. Identification of sex depending on radiological examination of foot and patella / W. M. Abdel Moneim, R. H. Abdel Hady, R. M. Abdel Maaboud, [et al.] // *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*. – 2008. – Vol. 29(2). – P. 136-140.
147. Identification of sex in Iranian population using patella dimensions / M. Akhlaghi, A. Sheikhezadi, A. Naghsh, [et al.] // *Journal of Forensic and Legal Medicine*. – 2010. – Vol. 17(3). – P. 150-155.
148. Intrathoracic rib: rare rib anomaly, review of the literature and proposal for classification / X. Xue, S. Zhao, K. Li, [et al.] // *International Journal of Medical Sciences*. – 2021. – Vol. 18(16). – P. 3800-3807.
149. Is the length of the sternum reliable for estimating adult stature? A pilot study using fresh sterna and a test of two methods using dry sterna / L. Marinho, D. Almeida, A. Santos, [et al.] // *Forensic Science International*. – 2012. – Vol. 220(1-3). – P. 292.e1-292.e4.
150. Işcan, M. Y. Age estimation from the rib by phase analysis: white females / M. Y. Işcan, S. R. Loth, R. K. Wright // *Journal of Forensic Science*. – 1985. – Vol. 30(3). – P. 853-863.
151. Işcan, M. Y. Age Estimation from the rib by phase analysis: white males / M. Y. Işcan, S. R. Loth, R. K. Wright // *Journal of Forensic Science*. – 1984. – Vol. 29(4). – P. 1094-1104.
152. Işcan, M. Y. Metamorphosis at the sternal rib end: a new method to estimate age at death in white males / M. Y. Işcan, S. R. Loth, R. K. Wright // *American Journal of Physical Anthropology*. – 1984. – Vol. 65(2). – P. 147-156.
153. Jaiswal, R. Determination of age by human sternum / R. Jaiswal // *International Journal of Anatomy and Research*. – 2018. – Vol. 6(3.2). – P. 5525-5530.
154. Keller, N. B. Prediction of adolescent pelvis development using femoral head and acetabulum growth in a longitudinal radiographic study / N. B. Keller, R. W. Liu // *J of Clinical Anatomy*. – 2021. – Vol. 34(5). – P. 726-735.

155. Kotzot, D. Etiology of Chest Wall deformities – a genetic review for the treating physician / D. Kotzot, A. H. Schwabegger // *Journal of Pediatric Surgery*. – 2009. – Vol. 44(10). – P. 2004-2011.
156. Krishan, K. Estimation of stature from dimensions of hands and feet in a North Indian population / K. Krishan A. Sharma, // *Journal of Forensic and Legal Medicine*. – 2007. – Vol. 14(6). – P. 327-332.
157. Kuatrakul, A. Forensic age-at-death estimation using the sternal junction in Thai adults: an autopsy study / A. Kuatrakul, V. Vachirawongsakorn // *Anatomy & Cell Biology*. – 2023. – Vol. 56(3). – P. 367-373.
158. Macaluso Jr, P. J. The efficacy of sternal measurements for sex estimation in South African blacks / P. J. Macaluso Jr // *Forensic Science International*. – 2010. – Vol. 202(1-3). – P. 111.e1-111.e7.
159. Magnetic resonance imaging of the iliac crest: age estimation in under-20 soccer players / D. Wittschieber, V. Vieth, M. Timme, [et al] // *Forensic Science, Medicine, and Pathology*. – 2014. – Vol. 10. – P. 198-202.
160. Management of nutritional rickets in Indian children: a randomized controlled trial / V. Aggarwal, A. Seth, R. K. Marwaha, [et al.] // *Journal of Tropical Pediatrics*. – 2013. – Vol. 59(2). – P. 127-133.
161. Manaster, B. J. *Musculoskeletal Imaging : The Requisites* / B. J. Manaster, D. A. May, D. G. Disler. – Philadelphia : Saunders/Elsevier, 2013. – 600 p. – ISBN 978-0-323-08177-1. – Текст : непосредственный.
162. Mannatrizio, D. Upper thoracic keel deformity (Currario-Silverman syndrome): A case report / D. Mannatrizio, G. Fascia, G. Guglielmi // *Digital Diagnostics*. – 2022. – Vol. 3. – No 2. – P. 141-148.
163. Manson, F. Sternum / F. Manson, P. Jeanty // *TheFetus* : науч.-образоват. Веб-сайт. 2007. – URL : <https://thefetus.net/content/sternum>. Дата публикации : 31.10.2007. Режим доступа : свободный.
164. Mavroudas, S. High-resolution computed tomography to visualize human rib microstructure and explore age-related trabecular change for forensic contexts / S. Mavroudas, V. M. Dominguez // *Forensic Imaging*. – 2022. – Vol. 30. – P. 200509.

165. Micro-CT evaluation of morphological degenerative features of sterno-clavicular joint for age-at-death estimation in Forensic anthropology – a qualitative analysis / L. Secco, P. Padalino, L. Franceschetto, [et al.] // *Legal Medicine*. – 2024. – Vol. 67. – P. 102374.
166. Morphological approach of the sternal foramen: an anatomic study and a short review of the literature / N. Gkantsinikoudis, C. Chaniotakis, G. Gkasdaris, [et al.] // *Folia morphologica (Warsz)*. – 2017. – Vol. 76(3) – P. 484-490.
167. Morphological parameters of the hip joint and its relation to gender, joint side and age – a CT-based study / T. Hawellek, M. P. Meier, M. T. Seitz, [et al] // *Diagnostics*. – 2022. – Vol. 12(8). – P. 1774-1784.
168. Morphometric Analysis of the sternum / R. Selthofer, V. Nikolić, T. Mrčela, [et al.] // *Collegium Antropologicum*. – 2006. – Vol. 30(1). – P. 43-47.
169. Morphometric analysis of variation in the sternum with sex and age / A. A. Weaver, S. L. Schoell, C. M. Nguyen, [et al.] // *Journal of Morphology*. – 2014. – Vol. 275(11) – P. 1284-1299.
170. Morphometrical analysis of sternum bone for sexual dimorphism estimation – an autopsy based study / A. Tyagi, D. K. Atal, S. Naik Kumar, [et al.] // *Journal of Forensic Medicine and Toxicology*. – 2020. – Vol. 37(1). – P. 38-45.
171. Mughal, A. M. Bone age assessment methods: a critical review / A. M. Mughal, N. Hassan, A. Ahmed // *Pakistan journal of medical sciences*. – 2014. – Vol. 30(1). – P. 211-215.
172. Navadijo, M. P. Utility of the sternal synostosis for age-at-death estimation in a Mediterranean population / M. P. Navadijo, I. A. Aguilera // *Forensic science, medicine, and Pathology*. – 2022. – Vol. 18. – P. 423-428.
173. Ontogeny of the female femur: geometric morphometric analysis applied on current living individuals of a Spanish population / A. Pujol, C. Rissech, J. Ventura, [et al] // *Journal of Anatomy*. – 2014. – Vol. 225(3). – P. 346-357.
174. Paz, A. R. Validity of the probabilistic sex diagnosis method (DSP) on 3D CT-scans from modern Danish population (Validité de la méthode de diagnose sexuelle

- probabiliste (DSP) sur des scanners CT d'une population danoise actuelle) / A. R. Paz, J. Banner, C. Villa // *La Revue de Médecine Légale*. – 2019. – Vol. 10(2). – P. 43-49.
175. Peckmann, T. R. Sex estimation from the scapula in a contemporary Chilean population / T. R. Peckmann, C. Logar, S. Meek // *Science & Justice*. – 2016. – Vol. 56(5). – P. 357-363.
176. Pediatric age estimation from radiographs of the knee using deep learning / A. Demircioğlu, A. S. Quinsten, M. Forsting, [et al.] // *European Radiology*. – 2022. – Vol. 32. – P. 4813-4822.
177. Phenotypic spectrum and management of sternal cleft: literature review and presentation of a new series / M. Torre, G. Rapuzzi, M. Carlucci, [et al.] // *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. – 2012. – Vol. 41(1). – P. 4-9.
178. Prasad, P. L. Jeune Syndrome / P. L. Prasad, A. N. Prasad // *Medical Journal Armed Forces India*. – 2006. – Vol. 62(3). – P. 293-294.
179. Prevalence of chest wall deformities in a large sample of Iranian children Aged 7-14 Years / M. T. Rajabi-Mashhadi, M. Ebrahimi, M. G. Mobarhan, [et al.] // *Iranian journal of pediatrics*. – 2010. – Vol. 20(2). – P. 221-224.
180. Prevalence of pectus carinatum and pectus excavatum in students in the city of Manaus, Brazil / F. L. Westphal, L. C. De Lima, J. C. Neto, [et al.] // *Journal brasileiro de pneumologia*. – 2009; – Vol. 35(3). – P. 221-226.
181. Quirmbach, F. Evaluation of the ossification of the medial clavicular epiphysis with a digital ultrasonic system to determine the age threshold of 21 years / F. Quirmbach, F. Ramsthaler, M. A. Verhoff // *International Journal of Legal Medicine*. – 2009. – Vol. 123. – P. 241-245.
182. Radiographic analysis of epiphyseal fusion at knee joint to assess likelihood of having attained 18 years of age / R. Cameriere, M. Cingolani, A. Giuliodori, [et al.] // *International Journal of Legal Medicine*. – 2012. – Vol. 126. – P. 889-899.
183. Radiological age estimation from manubrio-sternal joint in living population of Punjab / A. Garg, N. Goyal, R. K. Gorea, [et al.] // *Journal of Punjab Academy of Forensic Medicine Toxicology*. – 2011. – Vol. 11(2). – P. 69-71.

184. Radiological age estimation from sternum / D. A. Silajiya, H. T. Khubchandani, S. N. Soni, [et al.] // National Journal of Integrated Research in Medicine. – 2013. – Vol. 4. – No 4. – P. 108-114.
185. Radiology in Forensic Medicine / G. Lo Re, A. Argo, M. Midiri, C. Cattaneo; Switzerland : Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 301 p. – ISBN 978-3-319-96736-3. – Текст : непосредственный.
186. Recognition of a rare intrathoracic rib with computed tomography: a case report / M. A. Abdollahifar, S. Abdi, M. Bayat, [et al.] // Anatomy & Cell Biology. – 2017. – Vol. 50(1). – P. 73-75.
187. Roggio, C. Adult sex estimation based on the 12th thoracic and 1st lumbar vertebrae from a Portuguese contemporary population: Effects of degenerative lesions and comparison of accuracy with other skeletal areas (Estimation du sexe des adultes basée sur la 12ème vertèbre thoracique et la 1ère vertèbre lombaire d’une population portugaise contemporaine: Effets des lésions dégénératives et comparaison de la précision avec d’autres zones du squelette) / C. Roggio, B. M. Magalhães, A. L. Santos // La Revue de Médecine Légale. – 2023. – Vol. 14(4). – P. 100402.
188. San-Millán, M. New approach to age estimation of male and female adult skeletons based on the morphological characteristics of the acetabulum / M. San-Millán, C. Rissech, D. Turbón // International Journal of Legal Medicine. – 2017. – Vol. 131. – P. 501–525.
189. Sehrawat, J. S. Forensic age estimation from aspartic acid racemization (AAR): Scrutiny of multiple source samples / J. S. Sehrawat, B. Ahlawat // Microchemical Journal. – 2024. – Vol. 196. – P. 109644.
190. Sex and age at death estimation from the sternal end of the fourth rib. Does Işcan’s method really work? / A. Muñoz, N. Maestro, M. Benito, [et al.] // Legal medicine (Tokyo, Japan). – 2018. – Vol. 31. – P. 24-29.
191. Sex and stature estimation based on multidetector computed tomography imaging measurements of the sternum in Turkish population / M. İ. Koşar, C. U. Gençer, H. Tetiker, [et al.] // Forensic Imaging. – 2022 – Vol. 28. – P. 200495.
192. Sex determination from chest measurements in a sample of Egyptian adults using Multislice Computed Tomography / R. T. Darwish, M. H. Abdel-Aziz, A. A. M. El

Nekiedy, [et al.] // Journal of Forensic and Legal Medicine. – 2017. – Vol. 52. – P. 154-158.

193. Sex determination from different sternal measurements: A study in a Thai population / S. Myint tun, S. Das, S. Ruengdit, [et al.] // Journal of the Anatomical Society of India. – 2015. – Vol. 64(2). – P. 155-161.

194. Sex determination from measurements of the sternum and fourth rib using multislice computed tomography of the chest / S. U. Ramadan, N. Türkmen, N. A. Dolgun, [et al.] // Forensic Science International. – 2010. – Vol. 197(1-3). – P. 120.e1-120.e5.

195. Sex determination from the femur in Portuguese population with classical and machine-learning classifiers / F. Curate, C. Umbelino, A. Perinha, [et al.] // Journal of Forensic and Legal Medicine. – 2017. – Vol. 52. – P. 75-81.

196. Sex determination using metatarsal osteometrics from the Athens collection / C. Mountrakis, C. Eliopoulos, C. G. Koiliias, [et al.] // Forensic Science International. – 2010. – Vol. 200(1-3). – P. 178.e1-178.e7.

197. Sex estimation from computed tomography of os coxae – validation of the diagnose sexuelle probabiliste (DSP) software in the Romanian population / E. Stan, CO. Muresan, R. Dumache, [et al.] // Applied sciences. – 2024. – Vol. 14(10). – P. 4136.

198. Sex estimation using sternum part lengths by means of artificial neural networks / Z. Oner, M. K. Turan, S. Oner, [et al.] // Forensic Science International. – 2019. – Vol. 301. – P. 6-11.

199. Sexual dimorphism of human sternum in a contemporary Spanish population / P. García-Parra, Á. P. Fernández, M. Djorojevic, [et al.] // Forensic Science International. – 2014. – Vol. 244. – P. 313.e1-313.e9.

200. Sexual dimorphism of the human sternum in a Maharashtrian of India: a morphometric analysis / S. A. Hunnargi, R. G. Menezes, T. Kauchan, [et al.] // Legal Medicine. – 2008. – Vol. 10(1). – P. 6-10.

201. Siddiqi, N. Differences in femoral morphology among the Oriental and Caucasians: a comparative study using plain radiographs / N. Siddiqi, A. Valdevit, E. Y. S. Chao // Anatomical Science International. – 2019. – Vol. 94. – P. 58-66.

202. Singh, J. Morphometric sex determination from various sternal widths of Northwest Indian sternums collected from autopsy cadavers: A comparison of sexing methods / J. Singh, R. K. Pathak, D. Singh // *Egyptian Journal of Forensic Sciences*. – 2012. – Vol. 2(1). – P. 18-28.
203. Singh, J. Morphometric sexual dimorphism of human sternum in a North Indian autopsy sample: Sexing efficacy of different statistical techniques and a comparison with other sexing methods / J. Singh, R. K. Pathak // *Forensic Science International*. – 2013. – Vol. 228(1-3). – P. 174.e1-174.e10.
204. Son, H. Non-Tumorous Diseases of the sternum and Its Articulations: At the Front Gate of the Chest / H. Son, M. Grigovich, B. E. McCabe // *Current Problems in Diagnostic Radiology*. – 2022. – Vol. 51(4). – P. 628-638.
205. Soni, G. Determination of sex from femur: discriminant analysis / G. Soni, U. Dhall, S. Chhabra // *Journal of the Anatomical Society of India*. – 2010. – Vol. 59(2). – P. 216-221.
206. Spradley, M. K. Sex Estimation in Forensic Anthropology: skull Versue Postcranial Elements / M. K. Spradley, R. L. Jantz // *Journal of Forensic Sciences*. – 2011. – Vol. 56(2). – P. 289-296.
207. Stathopoulou, M. G. Calcium and Vitamin D Intake Interactions with Genetic Variants on Bone Phenotype / M. G. Stathopoulou, E. Grigoriou, G. V. Z. Dedoussis // *Current Nutrition Reports*. – 2012. – Vol.1. – P.169-174.
208. Stature estimation from sternum length using computed tomography – volume rendering technique images of western Chinese / K. Zhang, Y. Luo, F. Fan, [et al.] // *Journal of Forensic and Legal Medicine*. – 2015. – Vol. 35. – P. 40-44.
209. Sternal human variability and population affinity: Frequency of discrete traits and their relationship with sex and age / C. V. Rojas, J. I. Olivares, P. M. Tutor, [et al.] // *The Anatomical record (Hoboken, N. J. : 2007)*. – 2022. – Vol. 305(2). – P. 284-296.
210. Sternal index: It is a reliable indicator of sex in the Maharashtrian population of India? / S. A. Hunnargi, R. G. Menezes, T. Kanchan, [et al.] // *Journal of Forensic and Legal Medicine*. – 2009. – Vol. 16(2). – P. 56-58.

211. Sternum age estimation with dual channel fusion CNN model / F. Türk, M. Kaya, B. Akhan, [et al.] // Computer Science and Information Systems. – 2023. – Vol. 20(1). – P. 215-228.
212. Sternum as an indicator for sex and age estimation using multidetector Computed Tomography in an Egyptian population / M. I. Mohammed Ali, W. Mosallam, E. M. A. Mostafa, [et al.] // Forensic Imaging. – 2021. – Vol. 26(1-3). – P. 200457.
213. Studienlage zum zeitlichen Verlauf der Schlüsselbeinossifikation / A. Schmeling, S. Schmidt, R. Schulz, [et al.] // Rechtsmedizin. – 2014. – Vol. 24. – P. 467-474.
214. Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography / A. Schmeling, R. Schultz, W. Reisinger, [et al.] // International Journal of Legal Medicine. – 2004. – Vol. 118. – P. 5-8.
215. Studies on the time frame for ossification of the medial epiphysis of the clavicle as revealed by CT scans / R. Schulz, M. Mühler, S. Mutze, [et al.] // International Journal of Legal Medicine. – 2005. – Vol. 119(3). – P. 142-145.
216. Study of age dependence of epiphyseal ossification of the hand skeleton / S. Schmidt, U. Baumann, R. Schulz, [et al.] // International Journal of Legal Medicine. – 2008. – Vol. 122(1). – P. 51-54.
217. Supernumerary intrathoracic rib, a rare congenital anomaly: Case report and review of the literature / E. D. Muise, E. Y. Lee, H. J. Paltiel, [et al.] // Pediatric Pulmonology. – 2020. – Vol. 55(6). – P. 1487-1489.
218. Swan, K. R. Femoral angle development and locomotor progression in children from 18th and 19th century London / K. R. Swan, R. Ives, L. T. Humphrey // International Journal of Osteoarchaeology. – 2021. – Vol. 31(2). – P. 263-272.
219. Systematic procedure for identifying the five main ossification stages of the medial clavicular epiphysis using computed tomography: a practical proposal for forensic age diagnostics / D. Wittschieber, R. Schulz, H. Pfeiffer, [et al.] // International journal of legal medicine. – 2017. – Vol. 131(1). – P. 217-224.
220. Tanner, J. M. A New System for Estimating Skeletal Maturity from Hand and Wrist Radiographs, with Standards Derived from a Study of 2.600 Healthy British Children / J. M. Tanner, R. H. Whitehouse. – Paris : Centre International de l'Enfance, 1962.

221. Terrado-Ortuño, N. Forensic DNA phenotyping: a review on SNP panels, genotyping techniques, and prediction models / N. Terrado-Ortuño, P. May // *Forensic Sciences Research*. – 2025. – Vol. 10(1). – owa013.
222. Testing the accuracy of a new histomorphometric method for age-at-death estimation / F. Lagacé, E. Verna, P. Adalian, [et al.] // *Forensic science international*. – 2019. – Vol. 296. – P. 48-52.
223. The Accuracy of Sex Estimation on Metatarsal Bones in a Northeastern Thai Population / M. Phatsara, S. Das, S. Laowatthanaphong, [et al.] // *La Clinica Terapeutica* : электрон. двухмесячн. науч. – практ. журн. 2016. Т.167. № 3. URL : http://www.seu-roma.it/riviste/clinica_terapeutica/apps/ (Дата обращения: 17.01.2024) Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
224. The development of the fetal sternum: a cross-sectional sonographic study / Y. Zalel, S. Lipitz, D. Soriano, [et al.] // *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology*. – 1999. – Vol. 13(3). – P. 187-190.
225. The Hip Morphology Changes with Ageing in Asian Population / Y. Yin, R. Zhang, L. Jin, [et al.] // *Biomed Research International*. – 2018. – Vol. 2018. – № 1507979. – 6 p.
226. The sternum as a sex discriminator in a contemporary Spanish population / E. Dorado-Fernández, D. A. Cáceres-Monllor, M. F. Carrillo-Rodríguez, [et al.] // *Romanian Society of Legal Medicine*. – 2021. – Vol. 29(1). – P. 96-104.
227. Torwalt, C. R. M. M. A test of sex determination from measurements of chest radiographs / C. R. M. M. Torwalt, R. D. Hoppa // *Journal of forensic sciences*. – 2005. – Vol. 50(4). – P. 785-790.
228. Traditional and new methods of bone age assessment – an overview / M. Prokop-Piotrkowska, K. Marszałek-Dziuba, E. Moszczyńska, [et al.] // *Journal of clinical research in pediatric endocrinology*. – 2021. – Vol. 13(3). – P. 251-262.
229. Urschel Jr, H. C. Poland Syndrome / H. C. Urschel Jr // *Surgical Repair of Anterior Chest Wall Deformities : The Past, The Present, The Future / Seminars in Thoracic and Cardiovascular Surgery* ; under general editorship J. E. Mayer. – Massachusetts, 2009. – Vol. 21(1). – P. 89-94.

230. Validation of anthropological measures of the human femur for sex estimation in Brazilians / M. C. Cuzzullin, F. Curate, A. R. Freire, [et al.] // Australian Journal of Forensic Sciences. – 2020. – Vol. 54(1). – P. 61-74.
231. Virtual computed tomography morphometry of the patella for estimation of sex using postmortem Japanese adult data in forensic identification / T. Michiue, A. M. Hishmat, S. Oritani, [et al.] // Forensic science international. – 2018. – Vol. 285. – P. 206.e1-206.e6.
232. Vitamin D deficiency causes rickets in an urban informal settlement in Kenya and is associated with malnutrition / K. D. J. Jones, C. U. Hachmeister, M. Khasira, [et al.] // Material & Child Nutrition. – 2018. – Vol. 14(1). – P. e12452.
233. White, T. D. Human Osteology : book / T. D. White, M. T. Black, P. A. Folkens; California : Elsevier Academic Press, 2011. – 688 p. – ISBN 978-0-123-74134-9. – Текст : непосредственный.
234. Williams, A. M. Pectus deformities of the anterior chest wall / A. M. Williams, D. C. G. Crabbe // Paediatric Respiratory Reviews. – 2003. – Vol. 4(3). – P. 237-242.
235. Wong, J. J. Sternal insufficiency fracture related to steroid-induced osteoporosis: A case report / J. J. Wong, B. Drew, P. Stern // The Journal of the Canadian Chiropractic Association. – 2013. – Vol. 57(1). – P. 42-48.
236. Zapico, S. C. Application of Aspartic acid racemization for age estimation in a Spanish sample / S. C. Zapico, D. H. Ubelaker // Biology (Basel). – 2022. – Vol. 11(6). – P. 856.