На правах рукописи



Тареева Татьяна Алексеевна

Судебно-медицинская оценка возраста по морфологическим параметрам грудины

3.3.5. Судебная медицина

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)

Научный руководитель:
Доктор медицинских наук, доцент **Золотенкова Галина Вячеславовна**

Официальные оппоненты:

Божченко Александр Петрович – доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации, кафедра судебной медицины и медицинского права, профессор кафедры
Пинчук Павел Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Бюро судебно-медицинской экспертизы Департамента здравоохранения города Москвы», организационно-методический отдел по судебно-медицинской экспертизе, врач – судебно-медицинский эксперт отдела

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Дальневосточный государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации

Защита диссертации состоится «05» ноября 2026 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета 208.001.32 при ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет) по адресу: 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, д.8, стр.2

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной учебной библиотеке ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет) (119034, г. Москва, Зубовский бульвар, д.37/1) и на сайте организации: https://www.sechenov.ru.

Автореферат разослан «___» _____2026г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор медицинских наук, профессор  **Конева Елизавета Сергеевна**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Экспертная оценка общегрупповых признаков является важнейшим этапом при проведении судебно-медицинской идентификации личности (ИЛ) (Ю. И. Пиголкин и соавт., 2020). Первостепенной значимостью обладают такие признаки, как пол и возраст, благодаря которым представляется возможность воссоздать наиболее точный биологический профиль неопознанных личностей для последующей идентификации (G. Soni et al., 2010).

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 и др.), 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 (Г. В. Золотенкова и соавт., 2023). 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 (А. П. Божченко и соавт., 2017).

Современный этап развития судебно-медицинской экспертизы (СМЭ) характеризуется сменой методологических парадигм: установление биологического возраста перестает быть сугубо морфологической процедурой. Прогресс в области информационных технологий и математического моделирования обусловливает необходимость интеграции точных и естественнонаучных дисциплин (Р. Альпуче и соавт., 2024). 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. 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 (Ю. И. Пиголкин и соавт., 2020).

Проведение идентификационных мероприятий, как правило, базируется на исследовании и анализе костных структур ввиду того, что костная ткань наиболее устойчива к действию средовых факторов. С этой целью наиболее часто используются длинные трубчатые кости, череп, кости кисти и др. Наряду с вышеуказанными костными образованиями, объектом судебно-медицинской идентификации личности, в ряде исследований, рассматривалась и грудина (R. Shedge et al., 2024). Некоторые авторы отмечают, что степень оссификации манубриостернального и мечевидного сочленений заметно коррелирует с возрастом (V. Kumar et al., 2012, C. Manoharan et al., 2016, R. Jaiswal, 2018, T. Monum et al., 2020), а линейные размеры грудины – с полом (S. Myint tun et al., 2015, H. Kalbouneh et al., 2021, M. I. Koşar et al., 2022). Однако результаты подобных исследований имеют явные межпопуляционные различия, нечеткие схемы описания динамики возрастных изменений, что, в конечном итоге, снижает значимость предлагаемых алгоритмов.

Анализ отечественной литературы показал, что единственной методикой, доступной на сегодняшний день в Российской Федерации, является методика З. Л. Лаптева (1971). 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. В этой связи необходим пересмотр и усовершенствование алгоритма, согласно современным популяционным особенностям, в том числе с использованием современных методов медицинской визуализации.

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 манубриостернального, ксифостернального и костостернальных 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 обсервационного 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).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы исследования

Материалом для исследования послужили 374 трупа лиц мужского (254) и женского (120) пола, погибших в результате различных причин, в катамнезе которых отсутствовали какие-либо задокументированные патологии и аномалии развития опорно-двигательной системы, а также травматические изменения грудной клетки. Средний возраст выборки составил 49,56±1,01 года для мужчин и 57,57±1,96 для женщин. На последующих этапах материал исследования представлен: 369 обезличенными рентгенографическими изображениями грудин с фрагментами

хрящевых частей ребер от трупов лиц мужского (251) и женского (118) пола, а также 175 МСКТ-изображениями грудной клетки от пациентов в возрасте от 18 до 79 лет, не имеющих диагностированных патологических и травматических изменений костно-хрящевой системы, среди которых 50,86% составили мужчины (89), а 49,14 % – женщины (86) (средний возраст объектов мужского пола составил 50,2±17,8 года, женского – 49,9±17,5 года).

Методы исследования

Секционный метод. Судебно-медицинские вскрытия трупов проводились в соответствии с положениями действовавшего на момент проведения исследования 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» на базе ГБУЗ Бюро СМЭ ДЗМ Москвы. Внутренние органы извлекались единым органокомплексом по методу Г. В. Шора, с последующим раздельным исследованием по модификации М. Лютеля. Каждое исследование включало обязательный осмотр и изучение трех полостей тела – грудной, брюшной и полости черепа с фиксацией правильности анатомического расположения органов в полостях, их макроскопические характеристики; при исследовании полых органов – свойства содержимого, а также вид слизистых оболочек. Осматривалась грудина и прилежащие к ней ребра, грудино-ключичные сочленения на предмет их целостности и аномалий развития грудины, а также оценивался общий вид грудной клетки на наличие деформаций. 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).

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. Rg-изображения исследовали с помощью негатоскопа «Нега-Н-РМ-03» при помощи лупы с увеличением до ×6. Все изображения просматривались на предмет травматических изменений, не попавших в поле зрения на этапе секционного исследования, затем сканировались на устройстве XEROX CopyCentre C118 с разрешением 600×600 dpi и шагом масштабирования в 1%. Полученные обзорные рентгенографические снимки 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». Анонимизация DICOM-файлов для последующей 3D реконструкции проводилась с помощью библиотеки PyDicom. Мультипланарная реконструкция МСКТ-изображений выполнялась в программе InVesalius (версия 3.1.1). Реконструированные изображения осматривались на наличие травматических, патологических и послеоперационных изменений, а также инородных тел в проекции грудины и прилежащих к ней реберных сочленений.

Оценка возрастных изменений грудины и грудино-реберных сочленений по результатам традиционной рентгенографии. Структурные изменения грудины, протекающие с возрастом, оценивалась по комплексу признаков, включающему: А1 – полный синостоз рукоятки и тела грудины; А2 – частичный синостоз рукоятки и тела грудины; А3 – уплотнение по ходу синостоза (или на сочленяющихся краях тела и рукоятки грудины); А4 – полный синостоз сегментов тела грудины; А5 – частичный синостоз сегментов тела грудины; А6 – следы сращения сегментов тела грудины; А7 – полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка; А8 – частичный синостоз тела грудины и мечевидного отростка; А9 – уплотнение по ходу синостоза (или на сочленяющихся краях тела и мечевидного отростка); А10 – форма реберных вырезок тела грудины; А11 – наличие уплотнений суставных краев тела грудины; А12 – наличие очагов обызвествления в грудинном конце хрящей 2-7-го ребер; А13 – глубина вырезок тела грудины более 5 мм; А14 – наросты на суставных краях тела грудины; А15 – наличие рентгенологических признаков дегенеративно-дистрофических изменений (обызвествлений) грудино-реберных сочленений.

Интерпретация признаков А1-А9, А13 и А15 осуществлялась по принципу «наличие/отсутствие», с присвоением, соответственно, 1 или 0 балла; признака А10 – по четырем формам реберных вырезок (фигурная скобка – 0 баллов, треугольная – 1 балл, полулунная – 2 балла, треугольная и полулунная – 3 балла); уплотнение суставных краев тела (А11) – в зависимости от вида уплотнения (очаговое – 1 балл, линейное – 2 балла, полосовидное – 3 балла и отсутствие уплотнений – 0 баллов); А12 – 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); А14 – в зависимости от типа наростов (хрящевые – 1 балл, экзостозы – 2 балла или отсутствие уплотнения – 0 баллов).

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.

CI – динамика возрастных изменений костостернальных сочленений (между рукояткой грудины и первыми ребрами) оценивалась по четырем последовательным стадиям (1, 2, 3, 4) с присвоением соответствующего балла (1-4). Стадия 1: оссификация отсутствует, оба сочленения полностью представлены хрящевым компонентом (1 балл) (Рисунок 1, а); стадия 2: частичная оссификация, затрагивающая менее 50% площади хотя бы одного из сочленений (2 балла) (Рисунок 1, б); стадия 3: частичная оссификация, затрагивающая 50% и более площади хотя бы одного сочленения (3 балла) (Рисунок 1, в); стадия 4: полное окостенение хотя бы одного сочленения (4 балла) (Рисунок 1, г).

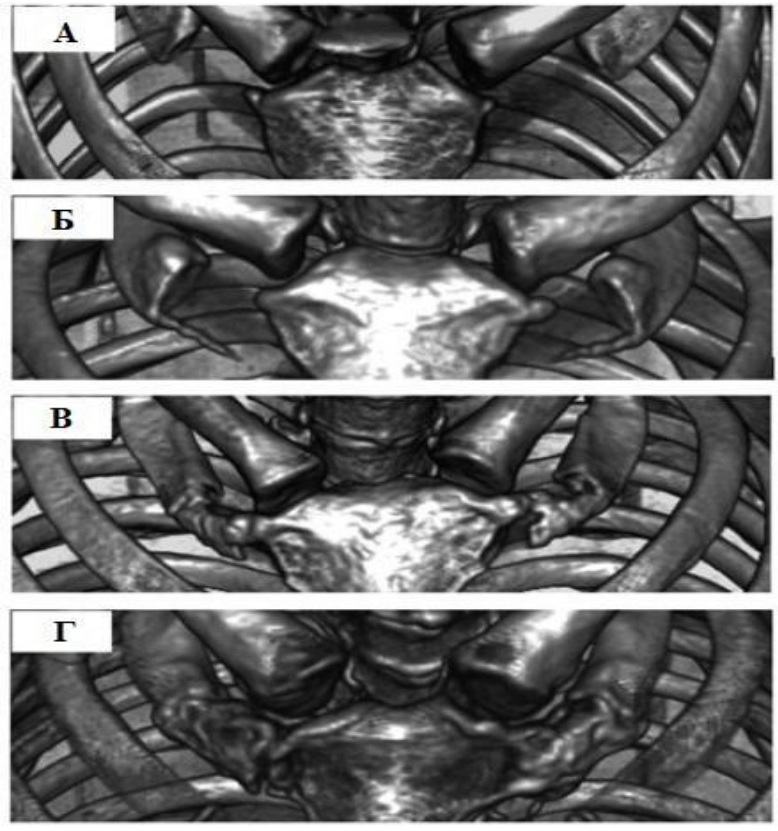


Рисунок 1 – Динамика возрастных изменений костостернальных сочленений (CI): а) 1 стадия, б) 2 стадия, в) 3 стадия, г) 4 стадия

CII – стадии оссификации манубриостернального сочленения (между рукояткой грудины и ее телом). Стадия 1: оссификация отсутствует, сочленение полностью представлено хрящевым компонентом (1 балл) (Рисунок 2, а); стадия 2: частичная оссификация сочленения (2 балла) (Рисунок 2, б); стадия 3: полная оссификация, сочленение полностью представлено костным компонентом (3 балла) (Рисунок 2, в).

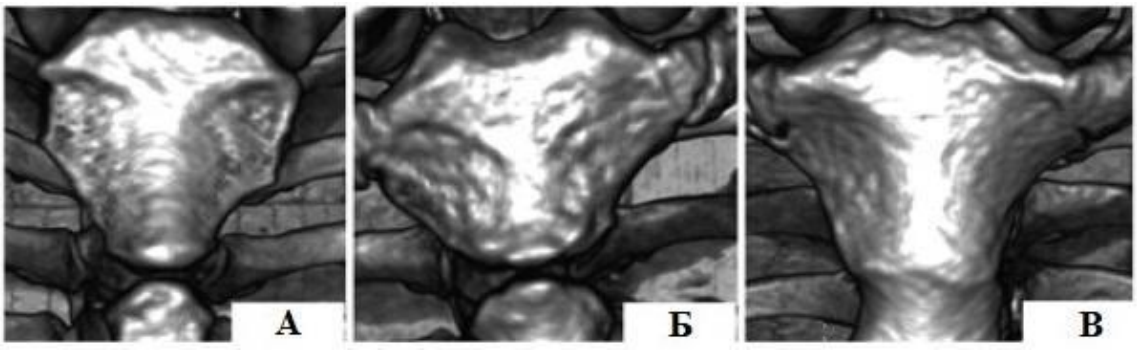


Рисунок 2 – Стадии оссификации манубриостернального сочленения (CII): а) 1 стадия, б) 2 стадия, в) 3 стадия

CIII – стадии оссификации ксифостернального сочленения (между телом грудины и мечевидным отростком). Стадия 1: оссификация отсутствует, сочленение представлено хрящевым компонентом (1 балл) (Рисунок 3, а); стадия 2: частичная оссификация сочленения (2 балла) (Рисунок 3, б); стадия 3: полная оссификация (3 балла) (Рисунок 3, в).

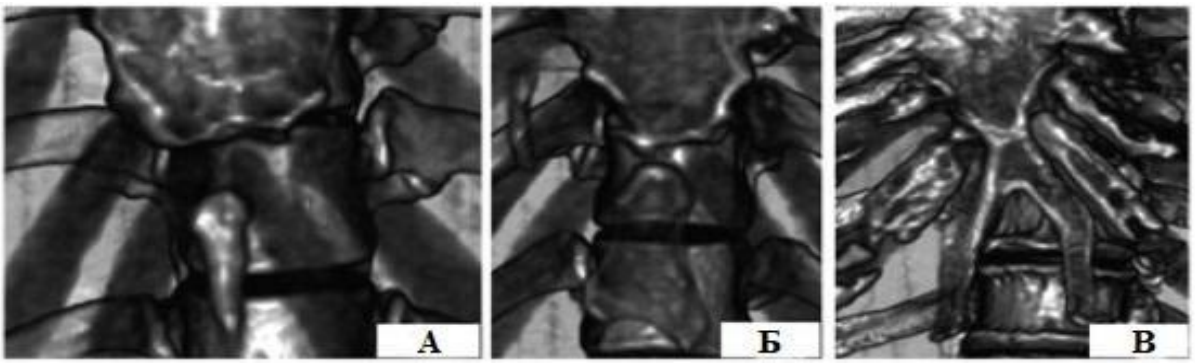


Рисунок 3 – Стадии оссификации ксифостернального сочленения (CIII): а) 1 стадия, б) 2 стадия, в) 3 стадия

CIV – стадийность возрастных изменений костостернальных сочленений (между реберными вырезками тела грудины и 2-7 парами ребер) (Рисунок 4). Стадия 1: оссификация отсутствует во всех 6 парах грудино-реберных сочленений (1 балл) (Рисунок 4, а); стадия 2: частичная оссификация, затрагивающая не более 50% хотя бы одного из сочленений (2 балла)

(Рисунок 4, б); стадия 3: частичная оссификация, затрагивающая 50% и более площади хотя бы одного сочленения, но не достигающая его центральной части (3 балла) (Рисунок 4, 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 4, г).

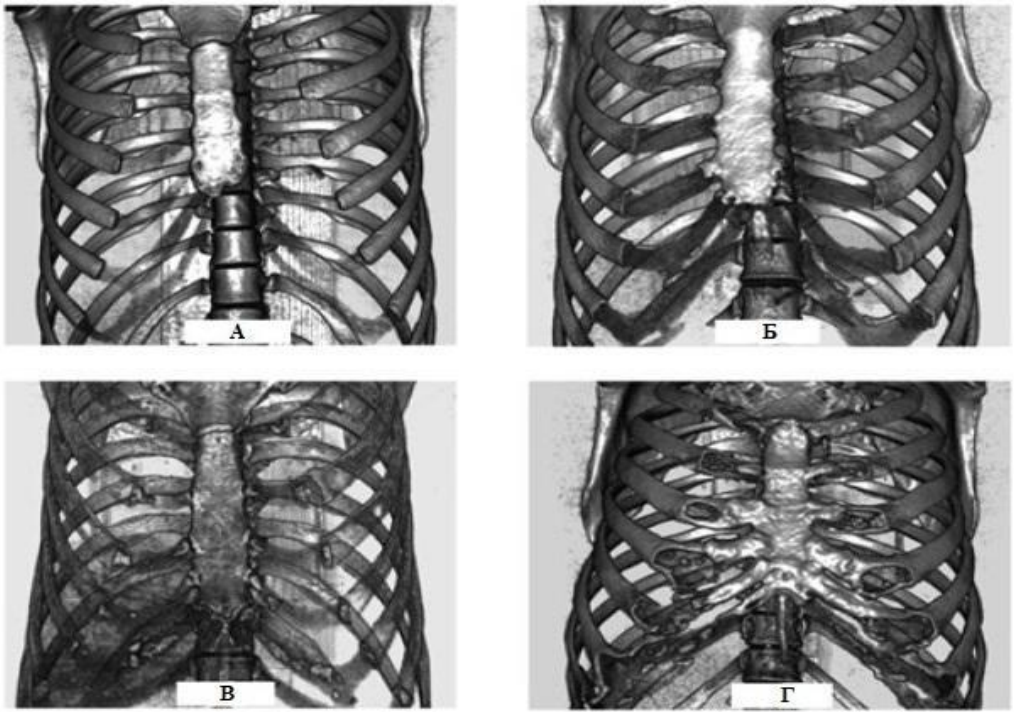


Рисунок 4 – Возрастные изменения костостернальных сочленений (CIV): а) 1 стадия, б) 2 стадия, в) 3 стадия, г) 4 стадия

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 и Microsoft Excel 2016 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 (КС), 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; Numbers Apple; библиотеке Scikit-learn. 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).

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.

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. 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.

Предобработка данных выполнялась на языке программирования Python с использованием библиотек PyDicom, SimpleITK и др.

Результаты исследования

Проведение корреляционного анализа позволило выделить рентгенографические признаки, обладающие максимальными значениями коэффициента корреляции: A14 – наросты на суставных краях тела грудины (r = 0,6); A12 – наличие очагов обызвествления в грудинном конце 2-7-го ребер (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 – полный синостоз тела грудины и мечевидного отростка (r = 0,4). Результатом последующего анализа стала возможность разработки экспертной модели линейной регрессии определения биологического возраста в виде математического уравнения:

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

где ExpAGE (expected age) – предполагаемый биологический возраст, 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 ж – 0; если м – 1).

При совместном распределении истинного и прогнозируемого возраста получено, 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 (Рисунок 5). Это связано с тем, что сила корреляционной связи между исследуемыми параметрами грудины и возрастом недостаточна для приемлемого уровня точности при судебно-медицинском установлении биологического возраста.

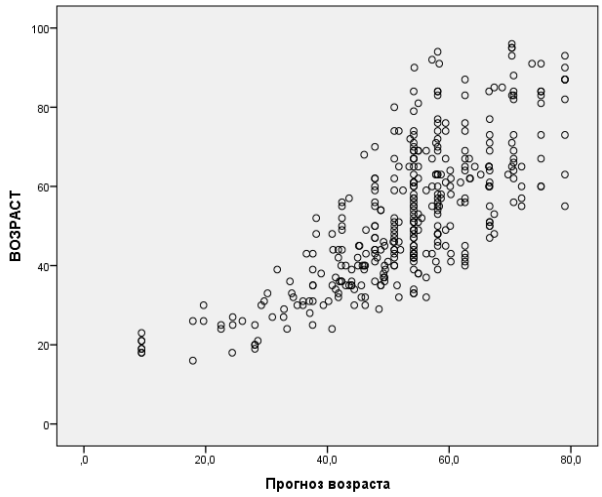


Рисунок 5 – Совместное распределение истинного и прогнозируемого возраста

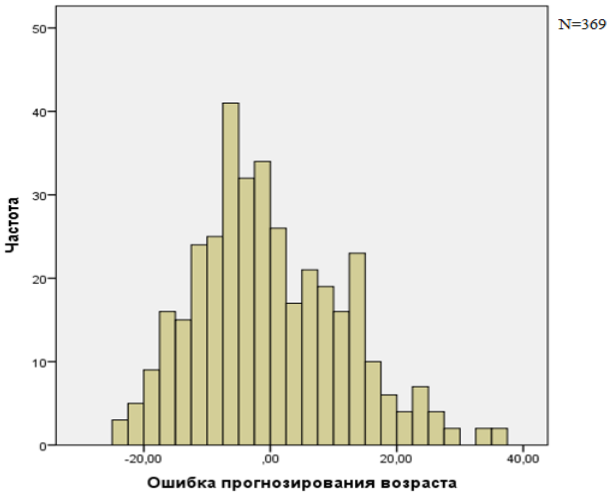
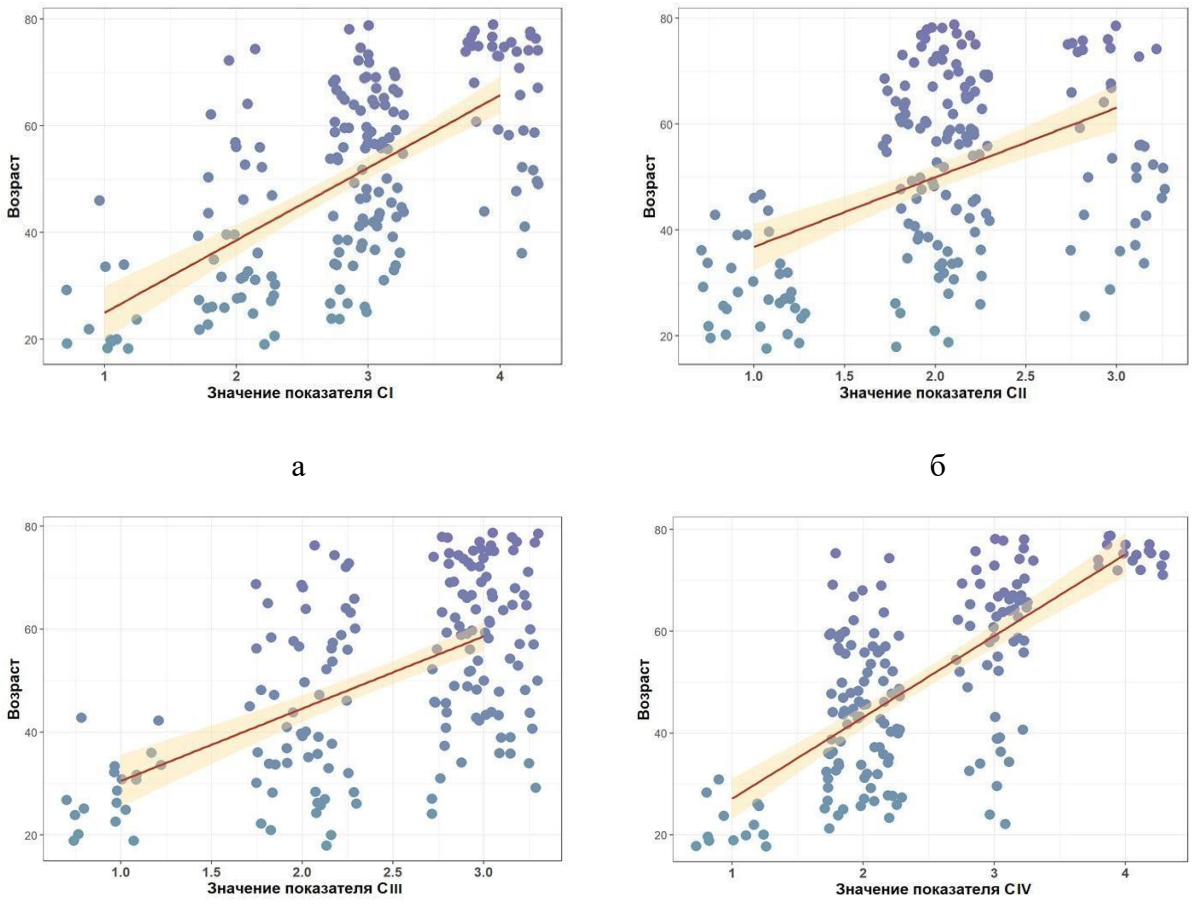


Рисунок 6 – Распределение ошибки прогнозирования возраста

Сопоставив ошибку прогнозирования в различных возрастных группах, средняя ее величина составила 11,77 лет (Рисунок 6). 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.

При оценке возрастной морфологии грудины по результатам МСКТ грудной клетки получено следующее. Средний возраст объектов, у которых была зафиксирована 1 стадия признака CI составил 24,75±2,61 года, 2 стадия – 37,72±2,24 года, 3 стадия – 52,43±1,41 года, 4 стадия – 66,19±2,12 года; средний возраст обнаружения 1 стадии признака CII – 29,44±1,51 года, 2 стадии – 54,34±1,64 года, 3 стадии – 55,43±2,5 года; для 1 стадии признака CIII средний возраст составил 28,89±1,82 года, для 2 стадии – 44,12±2,16 года, для 3 стадии – 57,92±1,46 года; средние значения возраста выявления признака CIV – 22,15±1,17 года для 1 стадии, 43,61±1,36 года для 2 стадии, 57,85±2,07 для 3 стадии и 74,82±0,56 года для 4 стадии. Далее проведено распределение стадийностей признаков CI, CII, CIII, CIV по возрастным группам (Рисунок 7).

Признак CI. Установлено, что 1 стадия признака CI наиболее характерна для возрастных групп до 25 лет, а встречаемость 4 стадии – для 50 и более лет, с максимальным сосредоточением в группе старше 70 лет (Рисунок 7, а). 2 стадия имеет бóльшую плотность встречаемости в возрастном диапазоне 20-40 лет. 3 стадия характеризуется значительной дисперсией по возрастным группам с наибольшей аккумуляцией в интервале 40-70 лет.



а б в г

Рисунок 7 – Распределение стадий признаков по возрастным группам: а) признака CI, б) признака CII, в) признака CIII, г) признака CIV

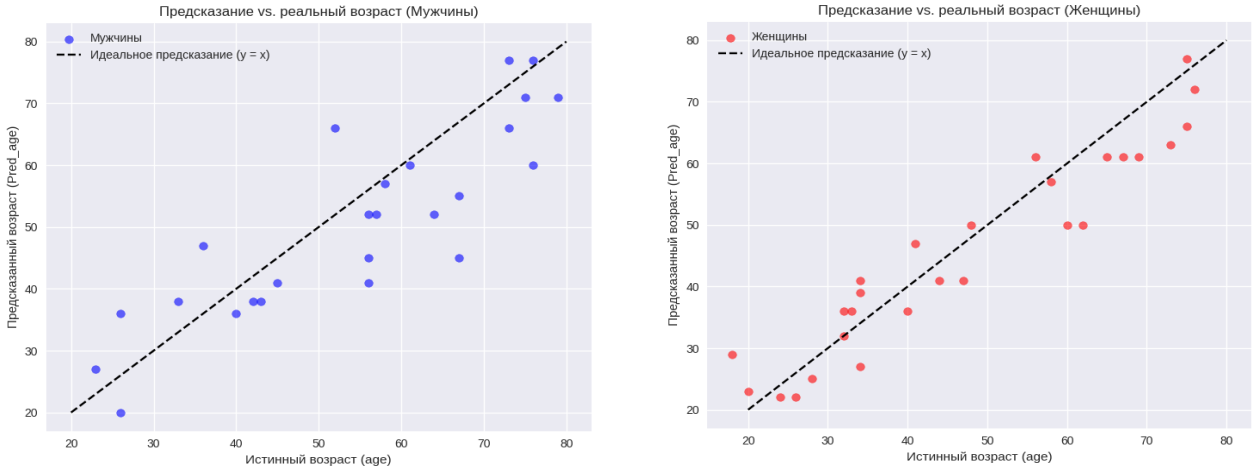
Признак CII. Наибольшая частота встречаемости 1 стадии располагается в промежутке 20-40 лет. Стадия 2 имеет широкую вариабельность с тенденцией к сосредоточению в возрасте 50 и более лет. Полная оссификация манубриостернального сочленения (стадия 3) в нашей выборке наиболее часто встречается в возрастном диапазоне 40-80 лет (Рисунок 7, б).

Признак CIII. 1 стадия встречается преимущественно в возрасте 20-35 лет (Рисунок 7, в). 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.

Признак CIV. Возрастная группа, для которой характерно наличие 1 стадии – до 25 лет, для 4 стадии – 70 лет и более. 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 7, г). 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. Помимо этого, имеет место влияние средовых факторов, сферы профессиональной деятельности и наличие заболеваний, напрямую не связанных с

костно-хрящевой системой (дефицитные состояния, эндокринная патология и другие), а также агрессивные методы воздействия при заболеваниях других систем органов (лучевая, иммунносупрессивная терапия).

Последующее формирование модели прогнозирования возраста выполнено по методу линейной регрессии с расчетом коэффициента детерминации (R^2=0,7345), средней абсолютной процентной ошибки (MAPE=15,72%) и средней абсолютной ошибки (MAE=7,28), означающее, что в среднем ошибка прогнозирования составляет 7,28 лет. Помимо этого, прогностическая способность модели была рассчитана отдельно для объектов мужского и женского пола. При этом получено, что модель верно предсказывает возраст у мужчин в 73,47% случаев (R^2=0,7347), женский – в 73,42% случаев (R^2=0,7342) (Рисунок 8).



а б

Рисунок 8 – Распределение предсказанных и истинных значений возраста: а) у мужчин, б) у женщин

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

$$ExpAGE_1 = -7{,}51+5{,}25\times CI+5{,}71\times CII+3{,}42\times CIII+10{,}59\times CIV+P,$$

где ExpAGE_1 (expected age_1) – предполагаемый биологический возраст; CI, CII, CIII, CIV – балльная интерпретация признаков (соответственно – 1, 2, 3, 4), P – регрессионный коэффициент соответствующего пола.

Оценка валидности разработанных методик посредством вычисления коэффициента каппа-Коэна (k) проводился в два шага. На первом дана оценка межэкспертной согласованности при установлении возраста по результатам традиционной рентгенографии грудины. С этой целью 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». Далее было выполнено попеременное определение согласованности врачей друг с другом со следующими результатами. 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. 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).

Второй шаг включал оценку воспроизводимости разработанного комплекса МСКТ-признаков. Группа специалистов, оценивающая МСКТ-признаки (CI-CIV), 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-снимкам 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. 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).

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. На входе 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. Результаты пилотного обучения модели: Train loss – 4.4590, Val loss – 4.3197, Val mean macro F1 – 0.2098; 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. Для повышения точности работы алгоритма изменена целевая задача: установление возрастной группы, то есть – классификация целевой группы. 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. 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.

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:

ExpAGE_1 = -7,51+5,25×CI+5,71×CII+3,42×CIII+10,59×CIV+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.

Графически предлагаемый алгоритм оценки возраста представлен на Рисунке 9.

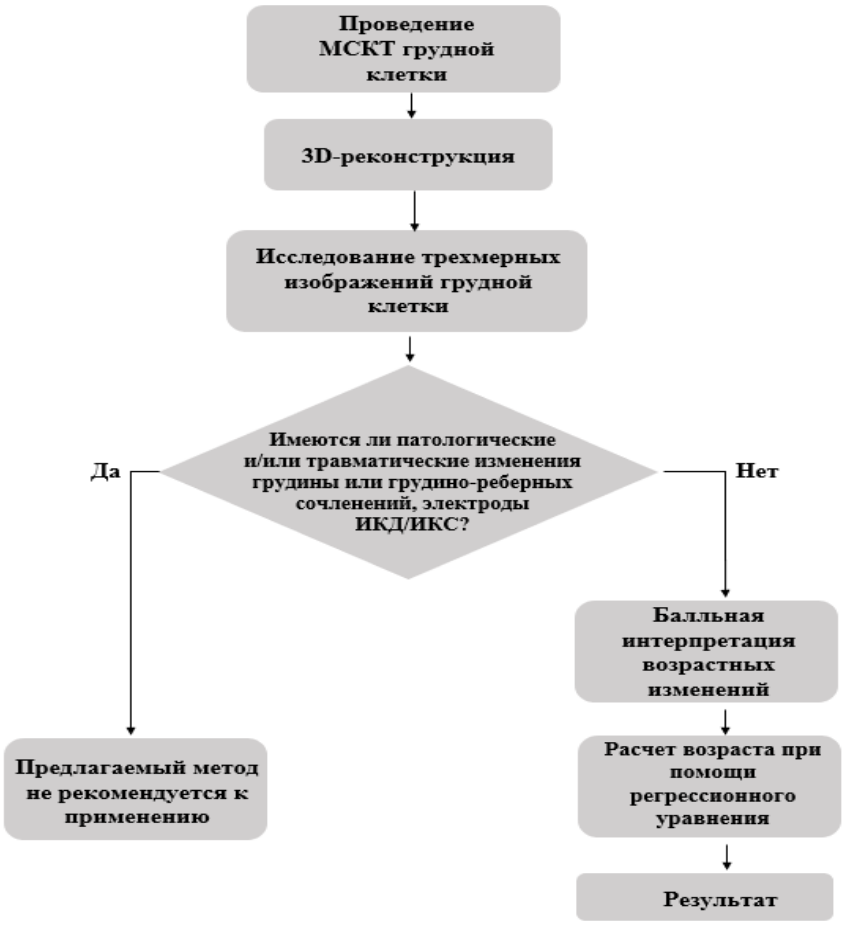


Рисунок 9 – Пошаговый алгоритм установления биологического возраста по результатам МСКТ грудной клетки

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Тареева, Т.А.** Использование морфометрических параметров грудной кости для установления общегрупповых признаков неопознанных личностей. Обзор литературы / Золотенкова Г.В., **Тареева Т.А.** // 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, (26-27 сентября 2024 г.) – С. 225-227.

2. **Тареева, Т.А.** Морфология грудины для формирования биологического профиля неопознанного индивида. Обзор литературы / Г.В. Золотенкова, **Т.А. Тареева** // Судебно-медицинская экспертиза. – 2024. – Т. 67. – No 3. – С. 60-66.

3. **Тареева, Т.А.** 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. – No 4. – С. 47-53. **[Scopus]**

4. **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.

5. **Тареева, Т.А.** 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. – No 1. – С. 35–39. **[Scopus]**

6. **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**, (**15–17 апреля 2026 г.) – С. 156-159.

7. **Тареева, Т. А.** 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. – No 2. – С. 10–16. **[Scopus]**

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИКД – имплантируемый кардиовертер-дефибриллятор

ИКС – имплантируемый кардиостимулятор

ИЛ – идентификация личности

СМЭ – судебно-медицинская экспертиза