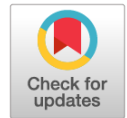


DOI: <https://doi.org/10.17816/fm16317>

EDN: FHQQBF



От ручного поиска к машинному интеллекту: применение нейронных сетей для анализа публикаций по конечно-элементному анализу переломов костной ткани (технический отчёт)

К.Н. Крупин, М.А. Кислов, Е.М. Кильдюшов, Н.В. Игнаткин, А.И. Донькина

Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. При проведении любой научной работы исследователи осуществляют научный поиск опубликованных работ. Для ускорения работы и увеличения объёма поиска подобных источников мы применили нейросетевые технологии.

Цель работы. Определить практическую применимость нейронных сетей для решения задач информационного поиска и анализа данных в научных исследованиях переломов костей с использованием метода конечных элементов.

Методы. В настоящей работе мы использовали нейросетевые платформы Perplexity, Ai2 ScholarQA, Elicit и Consensus.

Результаты. Использование нейросетевых моделей позволило сэкономить около 40% времени для проведения анализа по переводу статей с английского и китайского языков, а также написания коротких аннотаций к каждой публикации. По сравнению с традиционным поиском в PubMed удаётся выявлять в 16 раз больше релевантных публикаций и расширять аналитический корпус в 8,5 раза. Тем не менее недостатком поиска в нейросетевых моделях явилось наличие «галлюцинаций». Так, в большинстве случаев все нейросетевые платформы выдавали различные ошибки в ссылках на публикации, что требовало дополнительной верификации результатов выдачи.

Заключение. В результате анализа публикаций, посвящённых применению конечно-элементного анализа в судебной медицине для установления механизма перелома костей человека, установлены закономерности, касающиеся исследуемых анатомических областей, тенденции к индивидуализации математических моделей, а также акцент на прогнозировании места перелома. Предложен алгоритм использования нейросетевых моделей при написании обзорных публикаций, позволяющий повысить полноту и скорость проведения обзора.

Ключевые слова: нейронные сети; информационный поиск; конечно-элементный анализ; переломы костей; судебная медицина; технический отчёт.

Как цитировать:

Крупин К.Н., Кислов М.А., Кильдюшов Е.М., Игнаткин Н.В., Донькина А.И. От ручного поиска к машинному интеллекту: применение нейронных сетей для анализа публикаций по конечно-элементному анализу переломов костной ткани (технический отчёт) // Судебная медицина. 2025. Т. 11, № 4. С. 357–375. DOI: 10.17816/fm16317 EDN: FHQQBF

DOI: <https://doi.org/10.17816/fm16317>

EDN: FHQQBF

From Manual Search to Machine Intelligence: Using Neural Networks to Analyze Publications on the Finite Element Analysis of Bone Fractures: A Technical Report

Konstantin N. Krupin, Maksim A. Kislov, Evgeniy M. Kildyushov, Nikita V. Ignatkin, Alexandra I. Donkina

The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Every scientific research involves searching for relevant sources. We used neural network technology to accelerate and broaden the search.

AIM: The study aimed to determine the feasibility of using neural networks to retrieve and analyze research information on bone fractures using finite element analysis.

METHODS: We used the following neural network platforms: Perplexity, Ai2 ScholarQA, Elicit, and Consensus.

RESULTS: Using neural network models reduced the time spent translating English and Chinese articles and writing summaries for each publication by approximately 40%. Neural network-enhanced searching identified 16 times more relevant papers and expanded the analytical corpus 8.5-fold compared to standard PubMed queries. However, the use of neural network models was limited by their hallucinations; in most cases, the platforms produced erroneous citations, requiring additional verification of the generated results.

CONCLUSION: A review of publications on the use of finite element analysis in forensic medicine revealed fracture patterns in various parts of the human body, as well as a trend toward creating personalized mathematical models to predict fracture location. We propose an algorithm that uses neural network models to deliver faster and more complete reviews.

Keywords: neural networks; information search; finite element analysis; fractures; forensic medicine; technical report.

To cite this article:

Krupin KN, Kislov MA, Kildyushov EM, Ignatkin NV, Donkina AI. From Manual Search to Machine Intelligence: Using Neural Networks to Analyze Publications on the Finite Element Analysis of Bone Fractures: A Technical Report. *Russian Journal of Forensic Medicine*. 2025;11(4):357–375. DOI: 10.17816/fm16317 EDN: FHQQBF

DOI: <https://doi.org/10.17816/fm16317>

EDN: FHQQBF

从人工检索到机器智能：神经网络在骨折有限元分析文献挖掘中的应用（技术报告）

Konstantin N. Krupin, Maksim A. Kislov, Evgeniy M. Kildyushov, Nikita V. Ignatkin, Alexandra I. Donkina

The Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow, Russia

摘要

论证：开展任何科研工作时，研究人员都需要开展文献检索。为加速工作进程并扩大文献检索范围，我们应用了神经网络技术。

目的：评估神经网络在基于有限元法的骨折研究中进行信息检索与分析的实际适用性。

方法：本研究采用了 Perplexity、Ai2 ScholarQA、Elicit 和 Consensus 等神经网络平台。

结果：使用神经网络模型节省了约40%用于翻译中英文文献及撰写简短摘要的时间。与传统 PubMed检索相比，检出的相关出版物数量是传统检索的16倍，并使分析数据集的规模扩大至8.5倍。然而，神经网络检索的缺陷在于存在“幻觉”，绝大多数情况下，所有平台提供的文献引用信息均存在各类错误，需要对输出结果进行额外验证。

结论：通过对法医学中应用有限元分析法推断人体骨折机制的相关文献进行分析，本研究明确了人体各研究部位的规律性、模型个性化的发展趋势以及对骨折部位预测的侧重。提出了一种在撰写综述性研究时利用神经网络的流程算法，该算法有助于提升综述的完整性与撰写速度。

关键词：神经网络；文献检索；有限元分析；骨折；法医学；技术报告

引用本文：

Krupin KN, Kislov MA, Kildyushov EM, Ignatkin NV, Donkina AI. 从人工检索到机器智能：神经网络在骨折有限元分析文献挖掘中的应用（技术报告）. *Russian Journal of Forensic Medicine*. 2025;11(4):357–375. DOI: 10.17816/fm16317 EDN: FHQQBF

收到: 18.09.2025

接受: 28.11.2025

发布日期: 31.12.2025

ОБОСНОВАНИЕ

В связи с большой распространённостью механической травмы [1] актуальным вопросом является объективизация установления механизма образования травмы. В настоящее время широко распространён подход к установлению механизма образования переломов с использованием метода нестройной аналогии, который при анализе конкретного экспертного случая, особенно при сложнопряжнённых переломах, не всегда является научно обоснованным и не позволяет учесть все особенности взаимодействия травмирующего предмета с анатомическими характеристиками костей [2]. Конечно-элементный анализ (КЭА) стал краеугольным камнем судебной медицины для понимания, прогнозирования и реконструкции переломов костей у человека. В последние несколько лет исследования сосредоточены на использовании КЭА для улучшения прогнозирования риска переломов [3], оптимизации стратегий фиксации и повышения эффективности судебно-медицинских исследований механизмов травм [4]. Для оценки возможностей современного применения КЭА в судебной медицине и судебно-медицинской экспертизе мы решили провести оценку состояния научных данных по этой проблеме.

В связи с тем, что при подготовке научной работы значительное время требуется для литературного обзора с изучением уже проведённых исследований, мы решили применить нейросетевые технологии для поиска и систематизации этих данных с целью ускорения и увеличения объёма поиска таких публикаций.

При работе с нейросетевыми технологиями стоит помнить об этических нормах написания научных публикаций при их использовании. Эта проблема особенно актуальна, поскольку, несмотря на возможность написания нейросетями академического связного текста, учёные сталкиваются с вопросами необъективности материалов, предлагаемых нейросетями, нарушения конфиденциальности, а также отсутствия права у нейросетей на авторство и несения ответственности за проделанную работу.

В настоящее время приняты основные этические принципы использования нейросетей в написании научных публикаций, которые мы использовали в настоящей работе [5]:

- искусственный интеллект не может быть автором;
- прозрачность исследований (обязательно раскрытие применения искусственного интеллекта в исследовании);
- проверка достоверности источников и отсутствие плагиата;
- конфиденциальность (крайне не рекомендуется вносить в нейросеть неопубликованные исследования).

ЦЕЛЬ

Определить практическую применимость нейронных сетей для решения задач информационного поиска и анализа данных в научных исследованиях переломов костей с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

МЕТОДЫ

После предварительной оценки для достижения цели выбраны следующие нейросетевые модели:

- Perplexity;
- Ai2 ScholarQA;
- Elicit;
- Consensus.

Другие нейросетевые модели исключены ввиду неудовлетворительных результатов, проявляющихся в недостаточной точности и ограниченной выборке публикаций, выдаваемых по тематическому запросу.

Методология поиска данных

Для стандартизации поиска по всем научным базам в нейросетевой модели Perplexity задан запрос (промт): «Создай поисковую фразу для поиска статей в PubMed по теме «Применение конечно-элементного анализа в судебной медицине для установления механизма перелома костей человека» за период с 2019 по 2025 год». Получена оптимальная поисковая фраза: ("Finite Element Analysis"[MeSH Terms] OR "finite element analysis"[tiab] OR "finite element method"[tiab] OR "FEA"[tiab] OR "FEM"[tiab]) AND ("Forensic Medicine"[MeSH Terms] OR "forensic medicine"[tiab] OR "forensic pathology"[tiab] OR "forensic biomechanics"[tiab] OR "legal medicine"[tiab]) AND ("Fractures, Bone"[MeSH Terms] OR "bone fracture"[tiab] OR "bone fractures"[tiab] OR "skull fracture"[tiab] OR "fracture mechanism"[tiab] OR "trauma mechanism"[tiab]) AND ("Humans"[MeSH Terms]) AND ("2019/01/01"[Date - Publication] : "2025/12/31"[Date - Publication]).

В платформе Perplexity¹ [гибридно использующей несколько нейросетевых моделей, таких как Sonar Models® (Perplexity AI, США), OpenAI's GPT-series® (OpenAI, США), Anthropic's Claude® (Anthropic PBC, США), Meta's Llama® (Meta AI², США)] проведён поиск по вышеуказанной поисковой фразе. Получено 103 источника, в свою очередь, нейросеть отобрала 30 наиболее релевантных. После ручной обработки выбрано 10 публикаций.

Проведён поиск по вышеуказанной поисковой фразе в платформе Consensus³, которая комбинирует несколько языковых моделей с собственной технологией семантического поиска по научной базе данных Semantic Scholar. Получено 1000 статей, в свою очередь, нейросеть отобрала

¹ Perplexity [Internet]. Режим доступа: <https://www.perplexity.ai/> Дата обращения: 31.12.2025.

² Данная организация признана экстремистской и запрещена на территории Российской Федерации.

³ Consensus [Internet]. Режим доступа: <https://consensus.app/> Дата обращения: 31.12.2025.

50 наиболее релевантных. После ручной обработки выбрано 12 источников.

Кроме того, с использованием вышеописанной фразы проведён поиск в поисковой системе PubMed⁴. Получено 11 статей, вручную отобрано 4 публикации.

Проведён также поиск с использованием вышеуказанной фразы в платформе Elicit⁵, комбинирующей несколько языковых моделей с собственной технологией семантического поиска по научной базе. Так, из 126 млн академических работ из базы Semantic Scholar получено 500 статей, в свою очередь, нейросетью отобрано 38 наиболее релевантных. После ручной обработки выбрано 6 публикаций.

С той же поисковой фразой проведён поиск в платформе Ai2 ScholarQA⁶, использующей нейросетевую модель Claude Sonnet[®] (Anthropic, США) для поиска в открытых научных источниках. Получено 250 публикаций, нейросетью отобрано 59 наиболее релевантных. После ручной обработки выбрано 8 источников.

Критерии отбора

Критерии включения:

- оригинальные полнотекстовые публикации, посвящённые применению КЭА в судебной медицине;
- изучение механизмов образования переломов костей у людей;
- публикации за период 2019–2025 гг.

Критерии не включения:

- другая область применения КЭА;
- обзорные статьи или тезисы;
- отсутствие доступа к полнотекстовой работе;
- отсутствие описания применения КЭА;
- статьи, опубликованные до 2019 года;
- «галлюцинация» нейросети (выдуманные, несуществующие статьи).

Критерии исключения:

- собственные печатные работы;
- дублирующиеся статьи.

Таким образом, для анализа выбрано 40 публикаций. Каждая из отобранных для исследования статей загружена в формате PDF и проанализирована на платформе Perplexity¹ с использованием промта: «Сделай полный технический перевод статьи на русский язык. Отдельно сделай резюме статьи с указанием метода и объекта исследования, размер выборки, методы валидации, результаты исследования, научной новизны». После ручного отбора и изучения публикаций их краткий обзор и оформление ссылок по требованию журнала оформлены с использованием платформы Perplexity¹.

В разделе «Результаты» публикации приведены в порядке поиска их в базах данных реферативной и аналитической информации о научных исследованиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты поиска в Perplexity

М. J. Henningsen и соавт. [2] впервые разработали индивидуальные конечно-элементные модели (КЭ-модели) головы на основе посмертной компьютерной томографии (КТ) для анализа переломов черепа в судебной медицине. Ключевым новшеством является интеграция исключительно рутинной судебно-медицинской информации (результаты посмертной КТ, отчёты вскрытия, полицейские протоколы) для создания КЭ-моделей. Использование высокодетализированной модели ADAPT (A Detailed and Personalizable Head Model With Axons for Injury Prediction) с приблизительно 4 950 000 элементами обеспечило детальное предсказание распространения переломов, превосходящее по точности предыдущие КЭ-модели головы. Разработанный полуавтоматический подход, сочетающий сегментацию изображений посмертной КТ с морфингом к модели ADAPT, значительно сократил время работы при сохранении высокой точности геометрического представления черепа. Таким образом, данная работа представляет первое применение индивидуальных КЭ-моделей головы взрослых для анализа переломов черепа от тупой силы в судебной патологии. Технология позволяет объективно оценивать вероятность предполагаемых травматических событий и может стать важным инструментом для судебных патологоанатомов при определении механизмов получения смертельных травм головы. В первом и во втором случаях смоделированные линии переломов были практически идентичны наблюдаемым при вскрытии по локализации и характеру распространения. Анализ каждого случая требовал около 6 ч вычислений на суперкластере со 128 ядрами.

М. Terzini и соавт. [4] впервые в мировой практике применили КЭА для судебно-медицинской экспертизы реального случая разрушения ортопедического имплантата, что открывает новые возможности для количественной оценки причин отказа медицинских устройств для остеосинтеза. Разработанная методология позволяет различать их техническую неисправность от нестандартных условий эксплуатации, что имеет критическое значение при судебных разбирательствах между пациентами, больницами, хирургами и производителями медицинских изделий. Комплексный подход к моделированию различных стадий заживления костной ткани посредством вариации механических свойств костной мозоли в диапазоне от 2 до 50% значений здоровой кости представляет инновационную методику оценки биомеханического поведения остеосинтеза. Исследование впервые продемонстрировало практическое применение численного моделирования

⁴ PubMed [Internet]. Режим доступа: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov> Дата обращения: 31.12.2025.

⁵ Elicit [Internet]. Режим доступа: <https://elicit.com> Дата обращения: 31.12.2025.

⁶ Ai2 ScholarQA [Internet]. Режим доступа: <https://scholarqa.allen.ai/chat> Дата обращения: 31.12.2025.

для валидации поведения ортопедических пластин при экстремальных нагрузочных условиях, включая спотыкание и падения. Результаты подтвердили, что разрушение пластины в 11-м отверстии могло произойти при нагрузке свыше 6000 Н с преобладающим вертикальным компонентом в сочетании с неполным заживлением кости. Модель включала все ключевые компоненты:

- сломанную бедренную кость;
- протезный стержень;
- головку;
- дистальную бедренную пластину с упрощённой геометрией винтов и втулок.

Трёхмерную геометрическую модель создали в программном обеспечении Solidworks® (Dassault Systemes, Франция) с использованием стандартной модели взрослой правой бедренной кости. Численную модель обработали в препроцессоре Hypermesh® (Altair Engineering, США) с созданием тетраэдральной сетки из 388 652 элементов со средней длиной ребра 2 мм [4].

Китайские учёные с использованием комплексной модели безопасности для всего тела (Total Human Model for Safety, THUMS) продемонстрировали возможность создания «биомеханических отпечатков пальцев» для точной идентификации способов получения травм таза — удара или переезда в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) [6]. Нормализованный эксцентриситет таза стал ключевым критерием для различения способов травмирования: при нагрузке 90° данный показатель статистически значимо позволяет различать удар и переезд ($p=0,003$). Логистическая регрессия девяти главных компонентов из 48 биомеханических переменных создаёт «биомеханические отпечатки пальцев» с площадью под ROC-кривой (Area Under the Curve, AUC) 0,941 для дифференцирования способов травмирования. Эффективная деформация показала наилучшую предсказательную способность (AUC=0,939), превосходя напряжение по Мизесу (AUC=0,713). Валидацию производительности модели THUMS проводили путём воссоздания реального эксперимента бокового удара по посмертному человеческому тазу: предсказанные моделью кривые показали высокую согласованность с экспериментальными данными. Зависимость между скоростью и тяжестью переломов носит нелинейный характер: при скорости 20 км/ч и менее переломы отсутствуют, однако при превышении этого порога количество удалённых элементов быстро возрастает. Контактная сила между травмирующим объектом и тазом показала прямую корреляцию с риском перелома: 10 и 50% вероятность возникновения при силе 7650 и 16 625 Н соответственно. Исследование обеспечивает количественную альтернативу субъективной экспертной оценке в судебно-медицинской практике.

N. Lindgren и соавт. [7] разработали первую зависящую от скорости деформации модель материала для прогнозирования переломов костей черепа при тупых травмах головы с использованием конечно-элементного

моделирования. Впервые представлена зависящая от скорости деформации модель материала черепных костей и новая процедура реконструкции переломов черепа с применением вычислительных методов, охватывающая инициацию, распространение и финальный паттерн трещин. Разработанная изотропная упругопластическая модель материала учитывает зависимость механических свойств костной ткани от скорости деформации, что является принципиальным отличием от существующих квазистатических подходов. Персонализированные КЭ-модели головы создавали с использованием алгоритма морфинга на основе регистрации изображений, начиная с базовой модели ADAPT и адаптируя её к геометрии конкретных субъектов по данным посмертной КТ. Валидацию модели проводили на двух масштабных уровнях:

- сначала на образцах кортикальной кости в одноосном растяжении при скоростях деформации 0,1, 10 и 150 с⁻¹;
- затем при экспериментах по вдавливанию свода черепа.

Модель точно предсказала возникновение и масштаб переломов черепа во всех пяти случаях. В четырёх из них предсказанные паттерны переломов соответствовали данным КТ и аутопсии. Модель показала высокую чувствительность к параметрам моделирования, особенно к конститутивным параметрам кортикальных пластин [7].

Q. Huang и соавт. [8] впервые провели комплексный анализ защитных свойств энергопоглощающих полов на уровне тканей головы с использованием валидированной модели головы, созданной в Королевском технологическом институте (KTH модель), что позволило оценить не только традиционные кинематические критерии [критерий травмы головы — Head Injury Criterion (HIC), пиковые ускорения], но и напряжения в черепе и деформации мозговой ткани. Разработанная методология оценки с использованием рейтинга CORA (CORrelation and Analysis) ($\geq 0,9$) для валидации КЭ-моделей энергопоглощающих материалов и применение реальных сценариев пешеходных аварий создаёт новый подход к количественной оценке эффективности защитных напольных покрытий. Кроме того, результаты исследования продемонстрировали различные механизмы энергопоглощения для каждого типа пола:

- продольный изгиб для тонких резиновых шипов (Igelkott Floor);
- латеральное схлопывание полых цилиндров (SmartCells);
- эффект «пробивания» пенных структур (Kradal);
- поведение при высоком модуле Юнга (OmniSports).

В сценарии реконструкции пешеходной аварии SmartCells продемонстрировали наибольшее снижение HIC на 87% и минимальный риск перелома черепа (45,6%), в то время как Igelkott Floor обеспечили максимальное снижение пиковой угловой скорости на 28% и наименьший риск сотрясения головного мозга (37,5%). Валидация КЭ-моделей показала высокую точность с рейтингом CORA $\geq 0,9$ для всех четырёх типов энергопоглощающих полов, при этом максимальное отклонение пикового ускорения составило <3,5%. Все энергопоглощающие полы эффективно снижали

напряжения фон Мизеса в черепе на 10–66% и деформацию мозговой ткани на 11–32% по сравнению с бетонной поверхностью. Установлено, что различные типы полов по-разному влияют на риски переломов черепа и сотрясений головного мозга, что открывает возможности для целенаправленной разработки защитных систем [8].

Впервые разработаны локальные анатомические критерии оценки риска переломов таза на основе поперечных сечений с использованием КЭ-модели человеческого тела [9], что позволяет прогнозировать травмы конкретных регионов таза при боковых ударах с умеренной точностью. Основным достижением работы стала первая реализация локальных поперечно-сечевых критериев оценки риска переломов таза в КЭ-модели человеческого тела, что открывает новые возможности для анализа механизмов травм в конкретных регионах таза при боковых ударах. Сравнительный анализ различных методов нормализации экспериментальных данных показал, что техники равное напряжение равная скорость (Equal Stress Equal Velocity, ESEV) и равное напряжение равная скорость с использованием эффективной массы (ESEV Using Effective Mass, ESEV-EM) продемонстрировали наилучшую корреляцию с симуляционными результатами, достигнув средних показателей CORA $\geq 0,70$. Разработанные региональные кривые риска травм для конкретных анатомических областей таза показали умеренную предсказательную способность с различными оптимальными силовыми компонентами:

- для верхних лобковых ветвей наилучшим предиктором стала поперечная сила (AUC=0,852);
- для нижних лобковых ветвей — результирующая сила (AUC=0,781).

В тазовой области модели GHBC (Global Human Body Models Consortium) создано шесть пар поперечных сечений и одно индивидуальное сечение для важных несущих анатомических структур. Для валидации применяли пять методов нормализации данных, оцениваемых с помощью log rank тестов, критерия Вилкоксона и корреляционного анализа CORA. Анализ выживаемости с распределением Вейбулла использовали для генерации кривых риска травм, дополнительно проверяемых через ROC-анализ с расчётом AUC.

Исследователи из Шанхайской ключевой лаборатории судебной медицины провели судебно-медицинскую реконструкцию с использованием модели THUMS 4.0 (Toyota Central), масштабированной до роста 163 см [10]. Вычисления проводили с использованием пяти серверов HP Z820 в LS-DYNA® и LS-PrePost® 4.5 (Livermore Software Technology Corp., США). Четыре сценария моделирования (падение/удар автомобилем ± шлем) со скоростью вертикально и горизонтально 3,7 и 8,3 м/с соответственно. Критерий оценки — напряжение по Мизесу с валидацией против данных вскрытия.

Авторы первыми применили модель THUMS для судебно-медицинской реконструкции сложного ДТП с мотоциклистом. Четыре численных сценария показали,

что смертельный кольцевой перелом черепа сформировался при первичном падении, а не от удара автомобилем. Моделирование без шлема продемонстрировало 161 МПа напряжения у большого затылочного отверстия, превышающего порог прочности кости. При сценарии со шлемом напряжения снизились, но всё ещё предсказывали базиллярный перелом. Результаты объективировали выводы вскрытия и демонстрируют потенциал КЭА как доказательного инструмента экспертизы [10].

Научное исследование, опубликованное в журнале *Biomimetics* [11], посвящено численному анализу эффективности велосипедных шлемов в защите головы и шеи при столкновениях автомобиля с велосипедистом, основанному на реконструкции пяти реальных ДТП. Проведено комбинированное многотельное и конечно-элементное моделирование в MADYMO® V7.7 (TASS International Software and Services, Нидерланды) и LS-DYNA® R10.0 (Livermore Software Technology Corp., США). Авторы использовали гибридную модель THUMS (голова–шея) с многотельными сегментами тела. База данных IVAC из пяти реальных ДТП, 25 симуляций с четырьмя типами шлемов (16 350–27 620 элементов). Критерии травм: HIC₁₅, CSDM_{0,25} (Cumulative Strain Damage Measure), HIP (Head Impact Power), NIC (Neck Injury Criteria), N_{ij}.

Исследование впервые объединило многотельную и КЭ-модели для пяти реальных столкновений «автомобиль–велосипедист». Четыре цифровых прототипа шлемов снизили HIC₁₅ до 85% и существенно уменьшили риск тяжёлых черепно-мозговых травм. Впервые установлено, что стоимость шлема не коррелирует со степенью защиты. Анализ NIC и N_{ij} выявил наибольшую уязвимость шейных позвонков C1 и CVII, подчёркивая ограниченную эффективность шлемов для шеи. Кроме того, работа предлагает численный тест-стенд для сравнительной сертификации велосипедных шлемов [11].

M. Taylor и соавт. [12] разработали новый подход к прогнозированию риска переломов бедренной кости, используя КЭА в сочетании с активными моделями формы и внешнего вида для отбора наиболее значимых переменных. КЭА использовали с активными моделями формы и внешнего вида (Active Shape Model/Active Appearance Model, AAM/ASM) на когорте 100 женщин в постменопаузе. Два сценария нагружения (стояние 0°, падение 90°) с модифицированным критерием Скилео. Пятикратная перекрёстная проверка × 100 повторений. Валидацию выполняли через механические испытания *ex vivo* с точностью 1,4 мм для геометрии и 0,18 г/см³ для плотности.

Впервые процесс отбора переменных для прогноза переломов бедра основан на чувствительности КЭ-моделей, а не на традиционной статистике. Из 93 режимов формы лишь 6 существенно влияли на прочность кости. Модель с этими режимами повысила значение AUC до 0,865, превосходя стандартную модель, основанную на площади минеральной плотности костной ткани (Areal Bone Mineral Density, aBMD) на 0,146. Подход демонстрирует,

что плотность и толщина кортикального слоя важнее геометрии для оценки риска. Исследование открывает путь к клинически применимым минималистичным предсказателям остеопоротических переломов [12].

С.С. Yi и соавт. [13] разработали инновационный подход к изучению механизмов переломов дна орбиты, используя КЭА на анатомически точной модели черепа для разрешения многолетних споров о том, какие силы и процессы приводят к этим распространённым лицевым травмам. Авторы использовали программные обеспечения: MIMICS® (Materialise NV, Бельгия), LS-PrePost® (Livermore Software Technology Corp., США), Abaqus/Explicit® (Dassault Systèmes SIMULIA Corp. США). Сетка из 173 894 гексаэдрических элементов с коррекцией толщины кости до 0,26 мм. С.С. Yi и соавт. [13] создали анатомически точную КЭ-модель орбиты, впервые включив глазное яблоко и жировую ткань для сравнения механизмов «выпучивания» и «гидравлического» перелома. Определены критические скорости: для выпучивания и гидравлического механизма — 4 и 6 м/с соответственно. Показаны принципиальные различия в путях передачи энергии и распределении напряжений. Исследование даёт хирургу алгоритм диагностики и выбора тактики реконструкции в зависимости от типа повреждения, а эксперту уточнение места и скорости приложения травмирующей силы.

Результаты поиска в Consensus

L. Grassi и соавт. [14] разработали новый метод прогнозирования переломов бедра, который превосходит по точности стандартные измерения минеральной плотности костной ткани. Применяя алгоритм 2D-to-3D реконструкции с использованием изображений двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии (ДРА) и статистических моделей формы и внешнего вида (Statistical Shape and Appearance Model, SSAM), а также генетических алгоритмов. Конечно-элементное моделирование проводили в Abaqus® (Dassault Systèmes SIMULIA Corp. США) для когорты MrOS Sweden (мужчины 69–81 год). Десять конфигураций бокового падения с параметрами объёмной минеральной плотности. Валидацию осуществляли через механические испытания *ex vivo* ($R^2=0,89$) и ROC-анализ методом ДеЛонга.

Впервые трёхмерные КЭ-модели проксимального отдела бедра построены напрямую из стандартных 2D-снимков ДРА. Метод повысил AUC предсказания переломов до 0,90 у пациентов с падениями, превзойдя aBMD на 0,22. Геометрическая погрешность реконструкции составила всего 1,4 мм, подтверждённая экспериментально. Подход делает высокоточное биомеханическое тестирование доступным без КТ, расширяя клинические возможности диагностики остеопороза [14].

Х. Сао и соавт. [15] разработали первый глобальный индекс риска переломов бедра, использующий КЭА в сочетании с машинным обучением для прогнозирования остеопоротических переломов. Впервые применён

анализ главных компонент для создания интегрального индекса, рассчитанного на основе МКЭ и объединяющего множественные биомеханические параметры при различных сценариях нагружения. Научная новизна исследования заключается в создании единой количественной метрики — первой главной компоненты (PC1), которая объясняет 83,3% дисперсии параметров, полученных МКЭ, и превосходит традиционную денситометрию по точности прогнозирования переломов у мужчин на 77,6%. Впервые выявлены статистически значимые половые различия в эффективности МКЭ-прогнозирования переломов: показатель AUC составил 0,776 по сравнению с 0,737 для традиционных методов оценки. Предложенная методика учитывает трёхмерную геометрию кости, распределение плотности костной ткани и различные сценарии падений, что принципиально отличает её от двухмерной проекционной денситометрии. Валидация метода проведена на выборке из 345 участников исландского исследования AGES-Reykjavik с периодом наблюдения от 4 до 7 лет. Разработанный подход открывает новые возможности персонализированной оценки риска остеопоротических переломов в клинической практике.

Х. Yang и соавт. [16] впервые провели в судебной медицине комбинацию ретроспективного анализа случаев с современным конечно-элементным моделированием для изучения переломов черепа при переезде автотранспортными средствами. Авторы разработали 3-уровневую систему классификации переломов и установили биомеханические пороговые значения для различных типов транспортных средств в соответствии с китайской классификацией. Результаты исследования продемонстрировали, что переломы не возникают при нагрузке до 941 кг, что отличается от предыдущих данных, полученных N. Yoganandan и соавт. [17]. Впервые создана база данных морфологических характеристик переломов с научным обоснованием асимметрии повреждений — более серьёзных переломов со стороны грунта по сравнению со стороной шины. Конечно-элементное моделирование выявило ключевые закономерности распределения напряжений, в частности максимальные значения 131,0–152,0 МПа возникают исключительно со стороны грунта. Интеграция современных технологий в судебную патологию обеспечивает научно обоснованные критерии для дифференциальной диагностики, особенно важные для определения причин смерти в случаях наездов при скрытии с места происшествия. Исследование включало анализ 41 случая с систематическим биомеханическим моделированием при различных нагрузках [16].

L. Grassi и соавт. [18] установили, что автоматизированная реконструкция трёхмерных КЭ-моделей с использованием стандартных снимков ДРА представляет значительный прорыв в клинической диагностике остеопороза, впервые демонстрируя статистически значимое улучшение прогнозирования переломов на 16% без дополнительных затрат. Следует отметить, что научная новизна

заключается в применении SSAM совместно с генетическим алгоритмом оптимизации для автоматической трёхмерной реконструкции из одного двухмерного изображения. Кроме того, авторы впервые продемонстрировали статистически значимое превосходство конечно-элементной прогнозируемой прочности ($AUC=0,74$) над традиционной aBMD + индекс массы тела ($AUC=0,64$) в проспективной популяционной когорте из 138 женщин. Метод обеспечивает полную автоматизацию процесса за 1,5 ч без изменения существующих протоколов исследования ДРА. Так, aBMD объясняет лишь 24% изменчивости в прогнозируемой конечно-элементной прочности, подтверждая комплементарность подходов. В отличие от методов, требующих проведение дорогостоящей КТ, данная технология может быть протестирована на больших клинических выборках. Валидация включала 1380 конечно-элементных симуляций с анализом десяти конфигураций падения на бок.

Н. Mimata и соавт. [19] разработали новый метод количественной оценки процесса заживления костей после интрамедуллярного остеосинтеза переломов бедренной кости, используя КТ в сочетании с МКЭ для анализа механических свойств формирующейся костной мозоли и определения оптимального времени удаления металлических имплантатов. Авторы впервые применили количественный МКЭ для анализа результатов КТ с целью мониторинга формирования костной мозоли в реальной клинической практике и разработки коэффициента разрушения при растяжении (Tensile Failure Ratio, TFR) как объективного критерия оценки риска несращения. Кроме того, впервые создана методика виртуального удаления имплантата для обоснованного выбора сроков операции по извлечению металлоконструкции. Исследование продемонстрировало закономерное снижение TFR с 11,6% через 6 мес. до 0,5% через 15 мес., коррелирующее с рентгенологическими признаками консолидации. Следует отметить, что расчётная прочность виртуальной модели без стержня увеличивается с 212 до 3385 Н, превышая прочность контралатеральной здоровой кости к моменту сращения. Новизна метода заключается в использовании материальных свойств, рассчитанных на основе плотности гидроксиапатита из калиброванных результатов КТ с применением специфических формул для костной ткани и мозоли. Кроме того, исследование включало проспективное наблюдение с созданием трёхмерных моделей из 3 млн элементов. Таким образом, метод демонстрирует потенциал для выбора ревизионных техник при несращениях и сравнительной оценки различных вариантов фиксации.

I. Fleps и соавт. [20] провели крупнейшее проспективное исследование конечно-элементной прочности бедра с выполнением 21 636 конечно-элементных симуляций, результаты которого продемонстрировали статистически значимое превосходство нелинейных материальных моделей над традиционной денситометрией. Авторы выполнили первое систематическое сравнение трёх различных

материальных моделей (нелинейная с учётом скорости деформации, нелинейная и линейно-упругая) в проспективном дизайне. Впервые установлено, что отношения шансов для лучших конечно-элементных метрик (3,11–3,30) значительно превосходят aBMD (2,38), а значение AUC достигает 0,760 в сравнении с 0,714 для денситометрии. Кроме того, результаты исследования опровергли гипотезу о преимуществе минимальной прочности, показав, что конфигурации с низкой внутренней ротацией обеспечивают наилучшую классификацию. Впервые установлено, что вариабельность прочности внутри одной кости в зависимости от конфигурации нагрузки может достигать 57%. Авторы провели валидацию на выборке AGES-Reykjavik из 601 пациента с периодом наблюдения более 5 лет. Методика учитывает асимметрию компрессия–растяжение, а также различия в зависимости от скорости деформации и материальное размягчение при превышении предельных напряжений.

М. Prado и соавт. [21] разработали метод оценки риска переломов позвонков без использования дорогостоящих калибровочных фантомов, демонстрирующий точность прогнозирования 94–99% по сравнению с традиционными методами. Авторы использовали собственные ткани пациента [жир (F), мышцы (M), воздух (A), периметр тела (P)] для создания регрессионных уравнений конверсии единиц Хаунсфилда в минеральную плотность костной ткани. Впервые установлено, что уравнения PAFM, PFM и AFM достигают коэффициента детерминации 0,994–0,993 относительно фантомной калибровки. Кроме того, результаты исследования демонстрируют, что включение окружности тела в расчёты компенсирует влияние телосложения пациента на ослабление рентгеновского излучения. Валидация с использованием 217 трёхмерных моделей поясничных позвонков (LIII) показала высокую степень согласованности с коэффициентами корреляции 99% при сравнении с эталонными измерениями. Впервые установлено, что бесфантомные методы демонстрируют идентичную корреляцию с данными ДРА на уровне 0,68, не уступая традиционной калибровке в прогнозировании показателей остеопоротических переломов. Метод применяет степенной закон зависимости модуля Юнга от плотности золы с сохранением соотношения воксель к вокселю 1:1 между данными КТ и конечно-элементной сеткой.

Н. Schermann и соавт. [22] представили новый автоматизированный метод оценки риска переломов при доброкачественных опухолях бедренной кости с использованием персонализированного КТ-ориентированного КЭА (CT-Based Finite Element Analysis, CTFEA), который может помочь избежать до 55% необоснованных профилактических операций без увеличения частоты патологических переломов.

Впервые разработан коэффициент увеличения деформации (Strain Failure Ratio, SFR) как количественный критерий с пороговыми значениями [22]:

- SFR < 1,0 — низкий риск;
- 1,0–1,5 — умеренный риск;
- SFR > 1,5 — высокий риск перелома.

В отличие от субъективных клинических критериев и шкалы Mirels для метастатических поражений, данный подход обеспечивает воспроизводимую оценку механической прочности с учётом индивидуальной геометрии и расположения опухоли. Результаты исследования продемонстрировали высокую согласованность с клинической оценкой в 76,5% случаев при валидации на выборке из 17 пациентов с болезненными поражениями проксимального отдела бедренной кости. Технология получила маркировку Европейского соответствия (CE) и сертификацию Международной организации по стандартизации (ISO) с автоматической интеграцией результатов в систему архивирования и передачи медицинских изображений (PACS-система) в течение 1 ч. Метод создаёт тетраэдральную сетку из 100 тыс. элементов с физиологической нагрузкой 2,5 массы тела под углом 7° к оси диафиза [22].

Ф. Eggermont и соавт. [23] провели исследование и установили, что компьютерные КЭ-модели превосходят традиционные клинические методы в оценке риска патологических переломов у онкологических пациентов с метастазами в бедренную кость, демонстрируя 100% чувствительность в сравнении с 86% при использовании рентгенографических измерений. Исследование с участием 45 пациентов подтверждает потенциал персонализированного биомеханического моделирования для сокращения числа ненужных хирургических вмешательств при сохранении точного выявления пациентов высокого риска.

Кроме того, авторы впервые установили пороговое значение $7,5 \times$ массу тела как границу между высоким и низким риском перелома. Исследование показало двукратное снижение ложноположительных результатов при использовании биомеханического моделирования. Разработана методология калибровки без фантома, использующая плотности собственных тканей пациента. Выявлены критические недостатки существующей практики лучевой терапии при неточной классификации риска. Следует отметить, что данная работа открывает перспективы персонализированного подхода для сокращения ненужных хирургических вмешательств. Тем не менее существуют ограничения метода в отношении применимости к остеобластическим поражениям, что требует дальнейших исследований материальных моделей [23].

Исследование, опубликованное в *Frontiers in Endocrinology* [24], продемонстрировало возможность оппортунистического скрининга остеопороза с использованием КЭА на основе изображений, полученных при проведении стандартной мультidetекторной КТ без дополнительного облучения пациентов. Авторы разработали автоматизированный метод создания трёхмерных КЭ-моделей позвонков с оптимальным размером сетки 2 мм. Установлена высокая воспроизводимость метода со среднеквадратичным коэффициентом вариации 2,72–2,89%. Кроме того, впервые показано, что включение задних элементов позвонков увеличивает прогнозируемую нагрузку разрушения на $5,13 \pm 3,05\%$. Доказана

возможность дифференциации здоровых и фрактурных позвонков со статистически значимыми различиями ($p=0,026$). Таким образом, исследование продемонстрировало приемлемую корреляцию между «исследовательским» и «клиническим» форматами сканирования ($R^2=0,87$). Работа открывает возможности широкого клинического внедрения через разработку моделей искусственного интеллекта для сегментации. Метод превосходит традиционную денситометрию в отношении выявления пациентов с высоким риском переломов [24].

Недавнее исследование, опубликованное в *European Journal of Radiology* [25], посвящено сравнению диагностической эффективности глобальных текстурных характеристик, трёхмерных конечно-элементных параметров и объёмной минеральной плотности костной ткани (Volumetric Bone Mineral Density, vBMD) в прогнозировании инцидентных переломов позвонков. Научная новизна заключается в установлении превосходства текстурной характеристики «Корреляция» ($AUC=0,754$) над традиционной vBMD ($AUC=0,750$). Впервые показано, что КЭА «нагрузка разрушения» имеет более низкую эффективность ($AUC=0,719$) по сравнению с текстурными параметрами. Проведена валидация на выборке из 234 пациентов, у которых в течение 18-месячного наблюдения зарегистрировано 16 инцидентных переломов. Авторы использовали стандартизированный протокол мультidetекторной КТ с контрастированием для максимальной клинической применимости. Установлена преимущественная локализация новых переломов в области грудных и поясничных позвонков (ТХII–LII). Таким образом, работа демонстрирует потенциал текстурного анализа как дополнительного инструмента оценки риска переломов. В свою очередь, результаты указывают на необходимость интеграции различных методов для повышения точности прогнозирования [25].

Согласно результатам многоцентрового исследования, опубликованного в *Osteoporosis International* [26], впервые валидирован поясничный индекс деформации костной ткани (Bone Strain Index, BSI) как независимый предиктор повторных остеопоротических переломов позвонков на выборке из 234 пациентов. Научная новизна заключается в разработке автоматизированного КЭА, требующего всего 10 с для обработки одного исследования. Авторы впервые установили, что BSI превосходит возрастную стратификацию риска с отношением рисков 1,372 ($p=0,0261$). Результаты исследования продемонстрировали, что у 47% пациентов сформировались повторные переломы в период наблюдения. Метод основан на анализе внутренней структурной деформации позвонков с учётом плотности и геометрии. Валидацию провели в трёх академических центрах Италии с использованием стандартизированных протоколов ДРА. Разработанный подход обеспечивает независимую от возраста оценку риска остеопоротических переломов у пациентов. В свою очередь, BSI представляет революционный инструмент для персонализированного ведения пациентов с остеопорозом [26].

Результаты поиска в Elicit

Научное исследование, проведённое М. Prado и соавт. [27], посвящено разработке инновационного бесфантомного метода оценки риска переломов позвонков, основанного на использовании собственных тканей пациента для калибровки данных КТ. Научная новизна состоит в разработке математического алгоритма, показавшего статистическую эквивалентность традиционному фантомному методу ($R^2=0,95-0,98$). Впервые установлены дифференцированные пороговые значения прочности для женщин:

- хрупкие кости — ≤ 4500 Н;
- низкая прочность — >4500 , но <8500 Н;
- норма — ≥ 8500 Н.

Достигнута точность классификации 99,1% при валидации на выборке из 108 пациентов с различной степенью остеопороза. Метод устраняет логистические сложности и расходы на калибровочные фантомы. Кроме того, технология обеспечивает переход от двухмерной оценки плотности к трёхмерному анализу прочности костной ткани, а также открывает возможности ретроспективного анализа ранее полученных результатов КТ без повторного обследования. Метод превосходит традиционную ДРА в отношении идентификации пациентов с высоким риском переломов [27].

E.S. Kim [28] представил инновационный подход к судебно-медицинской экспертизе, объединяющий современные 3D-технологии с МКЭ для точного определения механизмов травм и состояний напряжений в костных структурах во время несчастных случаев. Научная новизна заключается в разработке методологии реконструкции несчастных случаев с повреждённым человеческим телом с использованием мультidetекторной КТ и компьютерного численного анализа. Процесс создания цифровой модели включает три ключевых этапа:

- реконструкцию с использованием изображений КТ;
- преобразование в цифровой формат;
- финальную реконструкцию модели с применением сертифицированного программного обеспечения MIMICS® (Materialise NV, Бельгия).

Достоверность методологии подтверждается точным совпадением расположения максимальных напряжений с фактическими переломами, выявленными при вскрытии. Максимальные напряжения достигали критических значений более 140 МПа, значительно превышающих пределы прочности костной ткани. Методология демонстрирует высокую точность прогнозирования переломов через цифровое моделирование, что подтверждается соответствием результатов анализа фактическим повреждениям [28].

Представлено значительное достижение в судебно-медицинской биомеханике — валидация КЭ-модели головы человека для анализа фронтальных переломов черепа на основе экспериментальных данных 18 посмертных образцов [29]. Научная новизна заключается в разработке модели SUFEHM (Strasbourg University Finite

Element Head Model) с 13 208 элементами, включающей основные анатомические структуры с использованием критерия разрушения Цай–Ву для 3-слойных композитных оболочечных элементов черепа. Впервые глобальная энергия деформации черепа использована как основной критерий для прогнозирования переломов, при этом установлено пороговое значение 833 мДж для 50% риска возникновения переломов черепа. Модель успешно предсказывает глобальные зоны переломов и линейные картины разрушения в лобной кости, инициирующиеся в точке удара и распространяющиеся к орбитальным краям. Параметрическое исследование выявило ключевые факторы точности прогнозирования: вариации толщины кортикального черепа и модель материала черепа. Все 13 численно реконструированных случаев превысили пороговое значение энергии деформации, что подтверждает обоснованность подхода. После завершения валидации модель сможет подтверждать или опровергать конкретные сценарии происшествий путём численного воспроизведения аварии и сравнения предсказанных повреждений с наблюдаемыми травмами.

M. Jurda [30] представил новую перспективную технологию для исследования травм в исторических мумифицированных останках — МКЭ, позволяющий компьютерному моделированию дополнить традиционный остеологический анализ путём симуляции биомеханических процессов травмообразования. Научная новизна заключается в первом применении КЭА в области палеотравматологии на основе индивидуальных данных КТ мумии XVIII века барона Franz von der Trenck. Программа Mechanical Finder® (Research Center of Computational Mechanics, Inc., Япония) создавала КЭ-модели из костных структур с механическими свойствами, извлечёнными из данных КТ, дополнительных элементов и сферического снаряда, соответствующего 2-фунтовому пушечному ядру. Только при латеральном ударе снарядом со скоростью 100 м/с модель продемонстрировала перелом в дистальной трети как большеберцовой, так и малоберцовой кости, что точно соответствовало реальной травме в мумифицированных останках. В отличие от медиального и фронтального воздействий, латеральная траектория снаряда вызывала характерный паттерн разрушения через суставные сочленения. Исследование демонстрирует как диагностические возможности, так и текущие ограничения этого подхода в палеотравматологии.

A. Darwich и соавт. [31] представили современный подход в судебной медицине и челюстно-лицевой хирургии для биомеханической оценки переломов орбиты с использованием МКЭ, позволяющего количественно оценить гидравлический и изгибовый механизмы формирования травм. Научная новизна заключается в детализированном моделировании на основе индивидуализированных данных КТ пациентов с объёмной сеткой из 560 тыс. тетраэдральных элементов, что обеспечивает высокую пространственную точность по сравнению с предыдущими

исследованиями (248 тыс. элементов). Впервые продемонстрировано существенное влияние орбитального жира на распределение напряжений, увеличивающего пороговое усилие до 9000 Н при гидравлическом механизме. Кроме того, установлены критические значения напряжений для различных механизмов:

- 7200 Н для blow-out переломов при нагрузке на глазное яблоко;
- 8600 Н при воздействии на нижнеорбитальный край.

Сопоставление результатов численного моделирования с клиническими данными продемонстрировало высокую степень соответствия прогнозируемых паттернов переломов реальным изображениям КТ пациентов. Такое совпадение теоретических предсказаний с клинической практикой подтверждает целесообразность использованной КЭ-модели для судебно-медицинского анализа механизмов травм [31].

Компьютерное моделирование МКЭ применяют для исследования влияния различных типов нагрузок на возникновение травматических переломов нижней челюсти, что имеет важное значение для судебно-медицинской экспертизы и анализа механизмов травм челюстно-лицевой области [31].

F.N. Osman и соавт. [32] впервые продемонстрировали возможность применения МКЭ для установления чёткой взаимосвязи между характеристиками тупой травмы и потенциальными паттернами переломов нижней челюсти, что имеет принципиальное значение для судебно-медицинской стоматологической экспертизы. Научная новизна заключается в систематизации биомеханических закономерностей возникновения переломов в зависимости от направления и локализации приложенной силы с использованием модели из 1698 тетраэдральных элементов. Четыре различных условия нагружения (латеральное, билатеральное, аксиальное и поперечное) моделировали с силой удара 2000 Н, при этом максимальные напряжения по фон Мизесу варьировали от 53,4 до 142,1 МПа. Мышечки выявлены как наиболее уязвимые участки независимо от направления силы. Кроме того, показано, что переломы возникают в результате изгибающих моментов, индуцированных приложенными силами, в свою очередь, их локализация существенно зависит от воздействия такого момента на различные области нижней челюсти с разной костной массой. Валидацию проводили методом сравнения с литературными данными, которые подтвердили корректность предсказанных значений напряжений и мест переломов.

С.М. Босьяков и соавт. [33] разработали детализированную КЭ-модель головы человека для исследования напряженно-деформированного состояния костных структур черепа при ударах цилиндрическими предметами, что открывает новые возможности для судебно-медицинских заключений. Научная новизна заключается в создании трёхмерной модели с многослойной архитектурой, включающей все основные анатомические структуры

головы взрослого мужчины с использованием программного комплекса LS-DYNA® (Livermore Software Technology Corp., США). Авторы впервые исследовали удары полимерным стержнем под углами 30, 45 и 60° к вертикали со скоростью от 15,0 до 25,0 м/с двумя способами нанесения — средней частью и концом стержня. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу достигали 140 МПа при ударе средней частью стержня под углом 60° со скоростью 25 м/с. Установлено, что удар средней частью стержня генерирует существенно более высокие напряжения по сравнению с ударом концом (разница 20–60 МПа). Полученные данные о критических напряжениях и характерных паттернах разрушения позволяют экспертам определять тип использованного орудия и реконструировать динамику нанесения повреждений цилиндрическими предметами. Разработку выполняли в рамках государственной программы научных исследований по криминалистической экспертизе холодного оружия ударно-раздробляющего действия.

Результаты поиска в PubMed

Исследование шведских учёных [34] демонстрирует применение инновационного биомеханического подхода с использованием конечно-элементного моделирования для дифференциальной диагностики переломов черепа у младенцев. Авторы впервые в мировой практике применили индивидуальные КЭ-модели головы младенцев для судебно-медицинской реконструкции случаев подозрения на жестокое обращение с детьми. Создание моделей осуществляли на основе высокодетализированных изображений КТ с разрешением $0,32 \times 0,32 \times 0,63$ мм³, содержащих 5,68 и 4,13 млн элементов соответственно. Разработанная методология определения места удара с использованием мультимодальной визуализации позволила преодолеть ограничения традиционного подхода. Ключевым достижением стало продвинутое моделирование ортотропных свойств костей черепа младенцев с учётом анизотропии волокон, исходящих из центров оссификации. Биомеханический анализ позволил сделать вывод, что описанная история случайного падения может объяснить наблюдаемые множественные переломы без необходимости предполагать жестокое обращение. Интеграция инженерного моделирования, медицинской визуализации и судебной медицины открывает новые возможности для развития доказательной судебной медицины.

Y. Gao и соавт. [35] использовали МКЭ для создания объективных количественных критериев судебно-медицинской экспертизы черепно-мозговых травм вследствие ударов кулаком. Исследование основано на валидированной модели человеческого тела THUMS 4.02, созданной на основе данных высокоразрешающей КТ взрослого мужчины. При ударах по лобной области максимальное напряжение черепа достигало 122,40 МПа, тогда как по височной области составляло лишь 71,53 МПа. Следует отметить, что при меньшем напряжении черепных

структур риск повреждения мозговой ткани при височных ударах значительно выше — 7,09 против 4,31 кПа при лобных воздействиях. Полученные пороговые значения внутричерепного давления (53–130 кПа для лёгких повреждений, свыше 200 кПа для субарахноидальных кровоизлияний) создают научно обоснованную базу для экспертных заключений. Численное моделирование позволяет установить количественные биомеханические критерии для различных типов воздействий, заменяя субъективные оценки точными расчётами. Разработанный метод повышает достоверность судебно-медицинских выводов при объективной оценке степени тяжести травм.

W.H. Hu и соавт. [36] разработали принципиально новый подход в судебно-медицинской практике, используя МКЭ THUMS 4.0 для систематического анализа механизмов переломов рёбер при различных позах приземления. Авторы впервые установили прямую биомеханическую связь между позой приземления и характерными паттернами повреждений на основе анатомической модели с 1293 компонентами. Различные позы приземления демонстрируют специфические паттерны повреждений:

- при приземлении на переднюю часть переломы концентрируются в области соединения ребро–рёберный хрящ;
- при задних позах — в области от лопаточной до околопозвоночной линии.

Верификация на реальном судебно-медицинском случае падения с 8-го этажа показала высокую степень соответствия между моделированием и фактическими повреждениями. Разработанный метод предоставляет судебно-медицинским экспертам научно обоснованный инструмент для реконструкции обстоятельств падения с высоты. Использование высокоточной модели открывает новые возможности для прогнозирования характера травм и повышает достоверность экспертных заключений в судебной практике. Кроме того, метод заменяет субъективные оценки точными биомеханическими расчётами [36].

G.A. Khalid и соавт. [37] представили инновационную сопряжённую физико-вычислительную методологию, сочетающую высокоточные 3D-печатные модели головы младенца с конечно-элементным моделированием. Разработанная методология представляет первое применение комбинированного физико-вычислительного подхода для исследования педиатрических травм головы, преодолевая этические ограничения экспериментов. Инновационность заключается в интеграции высокоразрешающих данных КТ толщиной 0,35 мм с ортотропными свойствами материалов костей черепа младенца. Исследование выявило критические ограничения традиционного «глобального приближения», поскольку различные области черепа демонстрировали локальные ускорения, превышающие глобальные значения в 2–3 раза. Валидация модели показала корреляционный балл ≥ 86 для всех тестовых сценариев при различных местах удара и скоростях. Параметрический анализ продемонстрировал корреляцию между

высотой падения и вероятностью переломов черепа с точностью до конкретных анатомических областей. Методология существенно расширяет понимание биомеханики младенческих травм и создаёт основу для разработки защитных устройств.

Результаты поиска в Ai2 ScholarQA

Систематический анализ влияния параметров КТ на точность конечно-элементного моделирования костной ткани выявил критические факторы для безопасного внедрения технологии в клиническую практику [38]. Различия в настройках томографа, включая реконструктивные алгоритмы и межсканерную вариабельность, могут приводить к погрешностям в предсказании механических свойств кости до 20%. Алгоритмы реконструкции изображений представляют наиболее критический фактор, влияющий на точность КЭ-моделей костной ткани. Применение костного реконструктивного ядра вместо стандартного приводило к средней абсолютной процентной разности 16,5 и 18,8% для жёсткости и нагрузки разрушения соответственно. Использование различных компьютерных томографов в многоцентровых исследованиях обуславливает наибольшие технические сложности для внедрения конечно-элементного моделирования. Четыре радиотерапевтических института продемонстрировали значительные расхождения при анализе бедренных костей с метастазами: до 17% вариации в расчётной ультимативной нагрузке. Фантомные исследования с применением восьми различных компьютерных томографов выявили диапазон межсканерных отклонений от 7 до 56 HU. Гистограммный анализ показал, что костные реконструктивные алгоритмы увеличивают частоту вокселей высокой плотности, что критически важно для прогнозирования прочности [38].

N.M. Rayudu и соавт. [39] разработали новый подход к оценке прочности позвоночника, используя анализ МКЭ на основе мультidetекторной КТ для создания трёхмерных моделей функциональных спинальных единиц. Авторы впервые количественно оценили вклад связочного аппарата в прочность позвоночника, в частности включение связок увеличивало прогнозируемую нагрузку разрушения на 16% (404 Н в среднем). Семь типов связок моделировали как многоэлементные тросовые конструкции с детальным воспроизведением анатомической структуры. Экспериментальная валидация с использованием 16 трупных образцов показала хорошую корреляцию между компьютерными прогнозами и экспериментальными данными ($\rho=0,79$ для моделей со связками). Использовали 256-рядный компьютерный томограф с высоким пространственным разрешением $250 \times 250 \times 600$ мкм³ и специальным костным ядром реконструкции. Разработанная методология открывает новые возможности для неинвазивной диагностики остеопороза и персонализированной оценки риска переломов позвоночника. Количественная КТ демонстрирует превосходство над традиционными методами диагностики остеопороза, поскольку ДРА

обеспечивает точность прогнозирования переломов менее 50%. Комплексная интеграция анатомических и физико-механических деталей обеспечила реалистичность и актуальность расчётных прогнозов.

H.H. Chen и соавт. [40] разработали автоматизированную методику оценки прочности поясничных позвонков (L1) с использованием КТ и анализа МКЭ. Ключевая научная новизна заключается в разработке специализированных программ на базе MATLAB® R2023b (MathWorks, Inc., США) для автоматического создания трёхмерных гетерогенных моделей костной ткани с минимальным человеческим вмешательством. Исследователи впервые применили воксельную КЭ-модель, где каждый пиксель преобразован в единицы Хаунсфилда с последующим расчётом плотности и модуля упругости по формулам:

$$\rho = 1,122 \times HU + 47, \quad (1)$$

где ρ — плотность, кг/м³; HU — единицы Хаунсфилда, HU;

$$E = 4730 \times \rho^{1,56} \quad \text{и} \quad E = 4730 \times \rho^{1,56}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости, Мпа; ρ — плотность, кг/м³.

Сокращение времени обработки составило в среднем 579,6±480,8 с на образец против более 1000 с в традиционных методах. Исследование с участием 52 пациентов (28 мужчин, 24 женщины) 50–95 лет выявило значимые гендерные различия в биомеханических характеристиках. Так, женщины демонстрируют существенно более высокие показатели напряжения и деформации при идентичной нагрузке. Клиническая применимость модели подтверждена высокой воспроизводимостью (вариабельность менее 1%) и соответствием результатам экспериментального тестирования на кадаверном материале. Данная работа открывает новые возможности для персонализированной оценки риска переломов позвонков в клинической практике [40].

E. Venca и соавт. [41] представили первую комплексную валидацию МКЭ на основе данных КТ для прогнозирования патологических переломов проксимального отдела бедренной кости с метастатическими поражениями. Новизна заключается в преодолении ограничений существующих клинических методов оценки, таких как система Мирелса, которая недостаточно точна для индивидуального планирования лечения онкологических пациентов. Экспериментальная валидация на 32 парных человеческих анатомических образцах в условиях, максимально приближенных к реальным биомеханическим нагрузкам, обеспечила статистическую значимость результатов. Методологическая инновация состоит в использовании высокоразрешающей КТ с 460 срезами и интервалом 1,5 мм для создания детализированных 3-компонентных моделей костной ткани. Анализ максимального главного растяжения (Maximum Principal Strain, MPS) выявил нелинейную зависимость от скорости механического воздействия, что представляет новое понимание механизмов разрушения костной ткани. При различных скоростях нагружения (25 и 45 км/ч) наблюдали противоположные паттерны распределения

напряжений, что кардинально меняет подходы к оценке риска переломов. Данное исследование открывает эру персонализированной онкологической ортопедии и точной медицины в лечении метастатических поражений костей. Разработанная методика позволяет индивидуально прогнозировать риск патологических переломов и оптимизировать хирургические вмешательства.

A. Barbosa и соавт. [42] разработали инновационную вычислительную платформу для моделирования структур черепных костей и симуляции переломов черепа с использованием модели головы YEANM (Yet Another Head Model). Основная научная новизна состоит в создании детализированной трёхмерной модели черепа с использованием твердотельных конечных элементов вместо традиционных оболочечных элементов, что обеспечивает более точное описание градиента напряжений по толщине и улучшенную обработку двойных контактов. Авторы разработали уникальную материальную модель для кортикальной и трабекулярной костной ткани с модулем Юнга 1000 МПа и коэффициентом Пуассона 0,05 для диплоэ, а также интегрировали модель трещинообразования с учётом деформации $\epsilon_{ок}$. Ключевым достижением является валидация модели через множественные экспериментальные сценарии:

- компрессионные тесты трабекулярной кости;
- прямые удары по вертексу черепа;
- латеральные импакты при различных скоростях;
- баллистические воздействия на височно-теменную область.

Модель демонстрирует высокую предсказательную способность для определения паттернов переломов и механизмов повреждения черепа. Практическая значимость работы заключается в создании инструмента для судебно-медицинской экспертизы, биомеханических исследований травм головы и разработки защитных средств [42].

S. Yu и соавт. [43] впервые разработали гибридную вычислительную биомеханическую модель пешехода (Coupled Pedestrian Computational Biomechanics Model, CPCBM), объединяющую КЭ-модель головы и шеи THUMS с многотельной моделью остального тела. Научная новизна заключается в создании первой модели, успешно сочетающей преимущества конечно-элементного моделирования для точного расчёта травм тканей головного мозга с вычислительной эффективностью многотельных моделей. CPCBM продемонстрировала существенное сокращение времени вычислений с 42 ч для полномасштабной модели THUMS до 7,5 ч при сохранении высокой точности прогнозирования кинематики головы. Модель показала высокую корреляцию с экспериментальными данными трупных испытаний (рейтинги CORA: $Y=0,99\pm0,01$; $Z=0,98\pm0,01$). Валидацию проводили в трёх кадаверных экспериментах с использованием объективного инструмента оценки CORA для количественного анализа корреляции между прогнозируемыми и экспериментальными данными. Разработка делает возможным эффективный

анализ биомеханики травм головы пешеходов в столкновениях с автомобилями, это критически важно, поскольку пешеходы составляют 22% смертельных исходов в ДТП. Модель открывает новые возможности для предотвращения повреждений при автомобильных ударах вследствие оптимального баланса точности и вычислительной эффективности. Методология позволяет детально изучать повреждения тканей головного мозга на клеточном уровне при сохранении возможности моделирования кинематики всего тела пешехода.

Впервые систематически исследовано парадоксальное влияние переломов костей черепа на риск травматического повреждения головного мозга при тупых ударах с использованием валидированной КЗ-модели THUMS [44]. Научная новизна состоит в количественном доказательстве двойственного механизма воздействия переломов: защитного при низких скоростях удара и повреждающего при высокоэнергетических воздействиях. Результаты исследования продемонстрировали, что во всех расчётных сценариях значения CSDM для модели с переломом были ниже на 49,3, 55,0 и 45% при 25, 35 и 45 км/ч соответственно, что указывает на снижение риска диффузных аксональных повреждений. При низкой скорости 25 км/ч значения MPS в модели с переломом были значительно ниже на 45,7 и 38,0% для лобного удара и затылочного соответственно. Однако при высокой скорости 45 км/ч MPS в модели с переломом превысили значения контрольной модели на 6,7 и 16,1% для лобного удара и затылочного соответственно. Модель модифицировали для прогнозирования переломов с заданием пределов текучести 95,88 МПа для компактной кости и 4,794 МПа для губчатого вещества. Валидацию проводили путём воспроизведения эксперимента с ударом головы трупа об асфальтовую поверхность со скоростью 44,1 км/ч. Результаты объясняют клинически наблюдаемую закономерность более низкой смертности пациентов с переломами черепа по сравнению с пострадавшими без переломов.

Х. Deng и соавт. [45] разработали высокоточную методологию численного моделирования в ABAQUS/Explicit для судебно-медицинской реконструкции травм головы при ударах о землю в ДТП с валидацией на основе реальных изображений КТ пациентов. Научная новизна заключается в определении критических биомеханических параметров: минимальной скорости 3,5 м/с при угле контакта 30° как пороговых значений для возникновения переломов черепа. Кроме того, результаты исследования продемонстрировали, что максимальное напряжение по Мизесу достигается при угле контакта 30°, составляя 37,84 МПа при критической скорости 3,5 м/с, что превышает установленный порог перелома черепа в 34,47 МПа. Цифровую модель создали с использованием изображений КТ высокого разрешения, она включает 472 061 элемент и 1 404 580 узлов с оптимизированной плотностью сетки по методу Лю и Гласса. Валидацию осуществляли воспроизведением классического эксперимента Нахума

с ударом цилиндрического объекта массой 5,59 кг со скоростью 6,3 м/с, показав отличное согласование с экспериментальными данными при внутричерепном давлении. Методология позволяет судебно-медицинским экспертам определять реальные причины травм головы путём анализа биомеханических параметров удара для дифференциации между случайными и преднамеренно нанесёнными повреждениями. Кроме того, выявлена вторая критическая зона повреждений в области соединения черепа с позвоночником, проявляющаяся через 2 мс после начального контакта. Разработанный подход обеспечивает экономически эффективный способ анализа травм, которые невозможно реконструировать в реальных условиях.

ОБСУЖДЕНИЕ

При поиске научных публикаций все способы были эффективными. Так, получено наибольшее количество результатов по использованию КЗА в судебной медицине из всех выдач. Кроме того, результаты поиска во всех нейросетевых платформах сопровождались выдачей результатов по использованию КЗА в смежных областях, чаще в хирургии. Наибольшее количество «галлюцинаций» наблюдали при использовании Perplexity (4, 13,3%) и Elicit (2, 5,2%), наименьшее — Ai2 ScholarQA (1, 1,7%). Следует отметить, что платформы Consensus, Elicit и Ai2 ScholarQA часто представляли в выдаче обзорные статьи по рассматриваемой теме. В большинстве случаев все нейросетевые платформы выдавали различные ошибки в ссылках на работы.

По нашему мнению, наиболее комфортный и достоверный поиск с предварительным анализом публикаций представила платформа Ai2 ScholarQA. Для подготовки поисковой фразы и детальной обработки полученных научных работ больше подошёл Perplexity в режиме «Исследование, Академический». Использование нейросетевых моделей позволило сэкономить около 40% времени для проведения анализа по переводу статей с английского и китайского языков, а также написания коротких аннотаций к каждой публикации. По сравнению со стандартным поиском в PubMed получено для изучения в 16 раз больше статей (177 при поиске с помощью нейросетевых моделей против 11 — в PubMed), выбрано для анализа в 8,5 раза больше публикаций (34 при поиске с помощью нейросетевых моделей против 4 — в PubMed).

По сравнению со стандартным поиском в PubMed нейросетевые платформы выдают больше информации по релевантным публикациям, однако иногда встречаются «галлюцинации».

В результате анализа найденных публикаций по применению КЗА в судебной медицине для установления механизма перелома костей человека за период с 2019 по 2025 год установлены следующие закономерности:

- наиболее часто исследуют модели головы ($n=21$, 47,7%), что связано с актуальностью исследования черепно-мозговой травмы и необходимостью объективизации

экспертных выводов. После моделирования черепно-мозговой травмы следуют по частоте травмы бедра ($n=12$, 27%), позвоночника ($n=5$, 11%) и таза ($n=3$, 6,8%);

- наблюдают тенденцию к индивидуализации математических моделей, однако методы построения геометрии и получения свойств материалов моделей варьируют, что указывает на отсутствие практического решения проблемы;
- научные исследования в области применения КЭА при переломах костей в судебной медицине акцентированы на прогнозировании места перелома, тем не менее единичные из них моделируют форму линии перелома.

Следует отметить, что во всех работах обосновывают точность результатов КЭА при валидации на практических случаях. Актуальная тенденция развития КЭА обусловлена формированием полностью персонализированных, верифицированных и мультидисциплинарных фреймворков для КЭА, дополняющих традиционную судебно-медицинскую травматологию объективным биомеханическим доказательством причинно-следственных связей.

Мы предлагаем следующий алгоритм поиска и обработки статей с использованием нейросетевых платформ.

1. Необходимо создать в Perplexity поисковую фразу для остальных платформ, которая будет удовлетворять потребности и отражать все критерии включения и исключения публикаций в список. Поисковая фраза должна содержать цель исследования, временной промежуток публикации статьи, а также дополнительные параметры поиска. Для удобства можно попросить сформировать «единую поисковую фразу», что позволит получить единый текст, удобный для поиска на разных платформах.

2. Полученную поисковую фразу необходимо добавить в желаемые нейросети и иные платформы. Мы использовали: Perplexity, PubMed, Consensus, Elicit, Ai2 ScholarQA. После добавления фразы в Perplexity необходимо попросить сформировать список использованных статей с фамилиями авторов и цифровым идентификатором объекта (Digital Object Identifier, DOI). В поисковый запрос можно задать параметры оформления ссылок по требованию конкретного журнала. Поиск в Perplexity мы проводили в режиме «Исследование, Академический».

3. Все найденные публикации необходимо сохранить в формате PDF.

4. Отобранные и загруженные статьи необходимо загрузить в Perplexity со следующим промптом: «Сделай полный технический перевод статьи на русский язык. Отдельно сделай резюме статьи с указанием метода и объекта исследования, размер выборки, методы валидации, результаты исследования, научной новизны».

5. Далее самостоятельно изучаем статью и оцениваем её релевантность. Сохраняем ссылки подходящих публикаций в отдельном файле.

6. В новой ветке в том же режиме необходимо загрузить файл в формате PDF с отобранными статьями

(по 10 страниц за один запрос в Perplexity) с запросом: «Найди все научные статьи в файле, сделай список публикаций по стилю Vancouver (AMA) (или иными требованиями журнала), приведи по каждой статье аннотацию на русском длиной не более 8 предложений с акцентом на научную новизну».

7. Для получения формата ответа, подходящего для добавления в текст статьи в Perplexity необходимо нажать на три точки в верхнем правом углу и выбрать опцию «Конвертировать в страницу». Полученный результат описания оцениваем на качество, при необходимости корректируем аннотацию, копируем в текст статьи.

8. Дальнейший анализ материала и оформление статьи необходимо выполнить стандартным методом вручную.

При необходимости возможно использование нейросети для поиска названия статьи. Для этого в поисковой строке описывается ход исследования с указанием его цели и ставится задача. Например: «Я провёл научный поиск по литературным источникам с использованием нейросетевых моделей и предложил алгоритм использования нейросетей с последующей ручной выборкой и анализом при написании обзора литературы в научных исследованиях. Цель исследования сформулирована как: “Определить практическую применимость нейронных сетей для решения задач информационного поиска и анализа в научных исследованиях переломов костей с использованием метода конечных элементов”. Предложи варианты названия статьи на русском и английском языках».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый алгоритм помогает выбрать большое количество релевантных публикаций и сокращает время научного анализа. Кроме того, алгоритм не заменяет работу исследователя, а расширяет её возможности и увеличивает скорость обработки материала. Следует отдельно отметить, что ручная обработка материала исследователем, полученного с помощью нейросетевых технологий, обязательна ввиду возможных ошибок.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. К.Н. Крупин — определение концепции, работа с данными, анализ данных, разработка методологии, администрирование и руководство проектом, валидация, написание черновика рукописи, пересмотр и редактирование текста рукописи; М.А. Кислов, Е.М. Кильдюшов — администрирование проекта, валидация, пересмотр и редактирование текста рукописи; Н.В. Игнаткин, А.И. Донькина — работа с данными, написание черновика рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты настоящей работы, гарантируют надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими

лицами (коммерческими и некоммерческими организациями), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Авторы сообщают, что все данные доступны в статье.

Генеративный искусственный интеллект. При создании рукописи использовался генеративный ИИ с целью поиска научных публикаций. Применены Perplexity, Ai2 ScholarQA, Elicit, Consensus в период с июня по август 2025 г. Методология применения ИИ описана в разделе «Методы».

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали член редакционной коллегии и научный редактор журнала.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: K.N. Krupin: conceptualization, data curation, formal analysis, methodology, project administration and supervision, validation, writing—original draft, writing—review & editing; M.A. Kislov, E.M. Kildyushov: project administration, validation, writing—review &

editing; N.V. Ignatkin, A.I. Donkina: data curation, writing—original draft. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources. No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: All data obtained in this work are available in the article.

Generative AI: Generative AI was used to search for scientific publications during the creation of this manuscript. Perplexity, Ai2 ScholarQA, Elicit, and Consensus were applied between June and August 2025. The AI methodology is described in the Methods section.

Provenance and peer review: This article was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer-review process involved one external reviewer, and the in-house science editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Miclau T, Balogh ZJ, Miclau KR, et al. Trauma systems: a global comparison. *OTA Int.* 2025;8(Suppl 3):e376. doi: 10.1097/O19.0000000000000376
2. Henningsen MJ, Lindgren N, Kleiven S, et al. Subject-specific finite element head models for skull fracture evaluation – a new tool in forensic pathology. *International Journal of Legal Medicine.* 2024;138(4):1447–1458. doi: 10.1007/s00414-024-03186-3 EDN: JDVEQT
3. Sas A, Tanck E, Sermon A, van Lenthe GH. Finite element models for fracture prevention in patients with metastatic bone disease. A literature review. *Bone Reorts.* 2020;12:100286. doi: 10.1016/j.bonr.2020.100286 EDN: YOXUGU
4. Terzini M, Aldieri A, Nurisso S, et al. Finite element modeling application in forensic practice: a periprosthetic femoral fracture case study. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology.* 2020;8:619. doi: 10.3389/fbioe.2020.00619 EDN: UVSEQD
5. Zielinski C, Winker MA, Aggarwal R, et al. Chatbots, generative AI, and scholarly manuscripts. *Colombia Medica.* 2023;54(3):e1015868. doi: 10.25100/cm.v54i3.5868 EDN: ELDTFQ
6. Li Z, Zou D, Zhang J, et al. Effects of loading conditions on the pelvic fracture biomechanism and discrimination of forensic injury manners of impact and run-over using the finite element pelvic model. *Applied Sciences.* 2022;12(2):604. doi: 10.3390/app12020604 EDN: KGPIRI
7. Lindgren N, Henningsen MJ, Jacobsen C, et al. Prediction of skull fractures in blunt force head traumas using finite element head models. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology.* 2023;23(1):207–225. doi: 10.1007/s10237-023-01768-5 EDN: WNNWQJ
8. Huang Q, Kleiven S. Finite element analysis of energy-absorbing floors for reducing head injury risk during fall accidents. *Applied Sciences.* 2023;13(24):13260. doi: 10.3390/app132413260 EDN: YOXZNV
9. Weaver CM, Baker AM, Davis ML, et al. Finite Element-Based Pelvic Injury Metric Creation and Validation in Lateral Impact for a Human Body Model. *Journal of Biomechanical Engineering.* 2018;140(6):061008. doi: 10.1115/1.4039393
10. Jia M, Li Z, Zhang J, et al. Finite element analysis to determine the cause of ring fractures in a motorcyclist's head. *Legal medicine.* 2020;45:101697. doi: 10.1016/j.legalmed.2020.101697 EDN: FKEOYI
11. Wang F, Peng K, Zou T, et al. Numerical reconstruction of cyclist impact accidents: Can helmets protect the head-neck of cyclists? *Biomimetics (Base).* 2023;8(6):456. doi: 10.3390/biomimetics8060456 EDN: NTNPNQ
12. Taylor M, Viceconti M, Bhattacharya P, Li X. Finite element analysis informed variable selection for femoral fracture risk prediction. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials.* 2021;118:104434. doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104434 EDN: IHGZRD
13. Yi CC, Kim J, Jung J, et al. Biomechanical analysis using finite element analysis of orbital floor fractures reproduced in a realistic experimental environment with an anatomical model. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology.* 2024;12:1354944. doi: 10.3389/fbioe.2024.1354944 EDN: LMFDOB
14. Grassi L, Väänänen SP, Jheppsson L, et al. 3D Finite element models reconstructed from 2D dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) images improve hip fracture prediction compared to areal BMD in osteoporotic fractures in men (MrOS) Sweden cohort. *Journal of Bone and Mineral Research.* 2023;38(9):1258–1267. doi: 10.1002/jbmr.4878 EDN: FOOXSL
15. Cao X, Keyak JH, Sigurdsson S, et al. A new hip fracture risk index derived from FEA-computed proximal femur fracture loads and energies-to-failure. *Osteoporosis International.* 2024;35(5):785–794. doi: 10.1007/s00198-024-07015-6 EDN: ZREOSM
16. Yang X, Chen X, Zhang F, et al. Case analysis and finite element analysis of adult head skull fractures in people run over by motor vehicles. *Forensic Sciences Research.* 2025;10(2). doi: 10.1093/fsr/owaf007 EDN: PGWPRR
17. Yoganandan N, Pintar FA. Biomechanics of temporo-parietal skull fracture. *Clinical Biomechanics.* 2004;19(3):225–239. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2003.12.014
18. Grassi L, Väänänen SP, Voss A, et al. DXA-based 3D finite element models predict hip fractures better than areal BMD in elderly women. *Bone.* 2025;195:117457. doi: 10.1016/j.bone.2025.117457 EDN: YNNVDQ
19. Mimata H, Matsuura Y, Yano S, et al. Evaluation of bone healing process after intramedullary nailing for femoral shaft fracture by quantitative computed tomography-based finite element analysis. *Clinical Biomechanics.* 2022;100:105790. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2022.105790 EDN: HNYATH
20. Fleps I, Pálsson H, Baker A, et al. Finite element derived femoral strength is a better predictor of hip fracture risk than aBMD in the AGES Reykjavik study cohort. *Bone.* 2022;154:116219. doi: 10.1016/j.bone.2021.116219 EDN: EROSAE
21. Prado M, Khosla S, Chaput C, Giambini H. Opportunistic application of phantom-less calibration methods for fracture risk prediction using QCT/FEA. *European Radiology.* 2021;31(12):9428–9435. doi: 10.1007/s00330-021-08071-w EDN: AVYKJD
22. Schermann H, Gortzak Y, Kollender Y, et al. Patient-specific computed tomography-based finite element analysis: a new tool to assess fracture risk

- in benign bone lesions of the femur. *Clinical Biomechanics*. 2020;80:105155. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2020.105155 EDN: GYDYYJ
23. Eggermont F, van der Wal G, Westhoff P, et al. Patient-specific finite element computer models improve fracture risk assessments in cancer patients with femoral bone metastases compared to clinical guidelines. *Bone*. 2020;130:115101. doi: 10.1016/j.bone.2019.115101 EDN: EROZNA
24. Rayudu NM, Dieckmeyer M, Löffler MT, et al. Predicting vertebral bone strength using finite element analysis for opportunistic osteoporosis screening in routine multidetector computed tomography scans—a feasibility study. *Frontiers in Endocrinology*. 2021;11:526332. doi: 10.3389/fendo.2020.526332 EDN: SZESDQ
25. Dieckmeyer M, Rayudu NM, Yeung LY, et al. Prediction of incident vertebral fractures in routine MDCT: Comparison of global texture features, 3D finite element parameters and volumetric BMD. *European Journal of Radiology*. 2021;141:109827. doi: 10.1016/j.ejrad.2021.109827 EDN: FXOJWN
26. Messina C, Rinaudo L, Cesana BM, et al. Prediction of osteoporotic fragility re-fracture with lumbar spine DXA-based derived bone strain index: a multicenter validation study. *Osteoporosis International*. 2021;32(1):85–91. doi: 10.1007/s00198-020-05620-9 EDN: MYNKEO
27. Prado M, Khosla S, Giambini H. Vertebral fracture risk thresholds from phantom-less quantitative computed tomography-based finite element modeling correlate to phantom-based outcomes. *Journal of Clinical Densitometry*. 2024;27(1):101465. doi: 10.1016/j.jocd.2023.101465 EDN: GSAMPI
28. Kim ES. Accident Reconstruction of damaged human body using MDCT and computer numerical analysis. *Applied Sciences*. 2020;10(9):3059. doi: 10.3390/app10093059 EDN: RYEUPH
29. Asgharpour Z, Baumgartner D, Willinger R, et al. The validation and application of a finite element human head model for frontal skull fracture analysis. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2014;33:16–23. doi: 10.1016/j.jmbbm.2013.02.010
30. Jurda M. Investigating trauma in mummified remains using finite element analysis. *International Journal of Osteoarchaeology*. 2024;34(5):e3337. doi: 10.1002/oa.3337 EDN: CNDQHE
31. Darwich A, Attieh A, Khalil A, et al. Biomechanical assessment of orbital fractures using patient-specific models and clinical matching. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*. 2021;122(4):e51–e57. doi: 10.1016/j.jormas.2020.12.008 EDN: CFAIUW
32. Osman FN, Sirry MS. Computational investigation of the effect of loading conditions on traumatic mandibular fracture. In: *Proceeding of the 2019 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCEEE)*. Sudan: IEEE; 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ICCEEE46830.2019.9070828
33. Bosiakov SM, Pronkevich SA, Moroz IA, et al. Biomechanical modelling of the human skull stress state under impact by cylindrical solid. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2023;1(62):88–94. doi: 10.46864/1995-0470-2023-1-62-88-94 EDN: SLDIVE
34. Li X, Sandler H, Kleiven S. Infant skull fractures: Accident or abuse?: Evidences from biomechanical analysis using finite element head models. *Forensic Sci Int*. 2019;294:173–182. doi: 10.1016/j.forsciint.2018.11.008
35. Gao Y, Li ZD, Zou DH, et al. Parameterized analysis of craniocerebral injury caused by fist. *Fa Yi Xue Za Zhi*. 2021;37(3):344–350. doi: 10.12116/j.jssn.1004-5619.2021.410107
36. Hu WH, Shao Y, Li ZD, et al. Exploring of the mechanism of rib fracture caused by landing on different parts of the trunk after falls from height using finite element method. *Fa Yi Xue Za Zhi*. 2020;36(2):181–186. doi: 10.12116/j.jssn.1004-5619.2020.02.007
37. Khalid GA, Prabhu RK, Arthurs O, Jones MD. A coupled physical-computational methodology for the investigation of short fall related infant head impact injury. *Forensic Science International*. 2019;300:170–186. doi: 10.1016/j.forsciint.2019.04.034
38. Benca E, Amini M, Pahr DH. Effect of CT imaging on the accuracy of the finite element modelling in bone. *European Radiology Experimental*. 2020;4(1):51. doi: 10.1186/s41747-020-00180-3 EDN: ZUFVVB
39. Rayudu NM, Baum T, Kirschke JS, Subburaj K. MDCT-Based Finite Element Analysis for the Prediction of Functional Spine Unit Strength—An In Vitro Study. *Materials*. 2021;14(19):5791. doi: 10.3390/ma14195791 EDN: EUJFCF
40. Chen HH, Wu CW, Cheng Y, et al. Gender differences in L1 vertebral strength in adults 50+ using automated CT-based finite element analysis. *Scientific Reports*. 2025;15(1):10667. doi: 10.1038/s41598-025-94557-2 EDN: LZYMWC
41. Benca E, Synek A, Amini M, et al. QCT-based finite element prediction of pathologic fractures in proximal femora with metastatic lesions. *Scientific Reports*. 2019;9(1):10305. doi: 10.1038/s41598-019-46739-y
42. Barbosa A, Fernandes FAO, Alves de Sousa RJ, et al. Computational modeling of skull bone structures and simulation of skull fractures using the YEAHM head model. *Biology*. 2020;9(9):267. doi: 10.3390/biology9090267 EDN: IBMPMU
43. Yu C, Wang F, Wang B, et al. A computational biomechanics human body model coupling finite element and multibody segments for assessment of head/brain injuries in car-to-pedestrian collisions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(2):492. doi: 10.3390/ijerph17020492 EDN: HTFJTF
44. Ren L, Wang D, Liu X, et al. Influence of Skull Fracture on Traumatic Brain Injury Risk Induced by Blunt Impact. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(7):2392. doi: 10.3390/ijerph17072392 EDN: ZRDPLJ
45. Deng X, Du Z, Feng H, et al. Investigation on the modeling and reconstruction of head injury accident using ABAQUS/Explicit. *Bioengineering*. 2022;9(12):723. doi: 10.3390/bioengineering9120723 EDN: MEVFKO

ОБ АВТОРАХ

* **Крупин Константин Николаевич**, канд. мед. наук, доцент; адрес: Россия, 117513, Москва, ул. Островитянова, д. 1, стр. 6; ORCID: 0000-0001-6999-8524; eLibrary SPIN: 1761-8559; e-mail: krupin_kn@rsmu.ru

Кислов Максим Александрович, д-р мед. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-9303-7640; eLibrary SPIN: 3620-8930; e-mail: smedik@gmail.com

Кильдюшов Евгений Михайлович, д-р мед. наук, профессор; ORCID: 0000-0001-7571-0312; eLibrary SPIN: 6412-0687; e-mail: kem1967@bk.ru

AUTHORS' INFO

* **Konstantin N. Krupin**, MD, Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor; address: 1 Ostrovityanova st, bldg. 6, Moscow, Russia, 117513; ORCID: 0000-0001-6999-8524; eLibrary SPIN: 1761-8559; e-mail: krupin_kn@rsmu.ru

Maksim A. Kislov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Assistant Professor; ORCID: 0000-0002-9303-7640; eLibrary SPIN: 3620-8930; e-mail: smedik@gmail.com

Evgeniy M. Kildyushov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor; ORCID: 0000-0001-7571-0312; eLibrary SPIN: 6412-0687; e-mail: kem1967@bk.ru

Игнаткин Никита Владимирович;

ORCID: 0009-0007-8383-472X;

e-mail: ignatkin_nik@mail.ru

Донькина Александра Ильинична;

ORCID: 0009-0002-0919-211X;

e-mail: donkinaa@gmail.com

Nikita V. Ignatkin;

ORCID: 0009-0007-8383-472X;

e-mail: ignatkin_nik@mail.ru

Alexandra I. Donkina;

ORCID: 0009-0002-0919-211X;

e-mail: donkinaa@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author