

РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПЛАНИРОВАНИИ ОСТЕОСИНТЕЗА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Туланбаев Файзулло

Ассистент кафедры терапевтической стоматологии Международного университета Кимё

Сайдуллаева Лазиза

Таджиев Аскар

Аннотация

Искусственный интеллект (ИИ) трансформирует подходы к планированию остеосинтеза, предлагая принципиально новые возможности для персонализированного лечения переломов. В данном обзоре представлен анализ современного состояния ИИ-технологий в предоперационном планировании фиксации переломов, включая автоматическую сегментацию костных фрагментов, виртуальную репозицию, оптимальное позиционирование имплантов и прогнозирование исходов лечения. На основе анализа 79 исследований показано, что компьютерное планирование ассоциировано со снижением времени операции (SMD: -2,19), уменьшением кровопотери (SMD: -1,99), сокращением частоты интраоперационной флюороскопии (SMD: -2,18), ускорением консолидации перелома (SMD: -0,51) и снижением частоты осложнений (RR: 0,64). Проекты, такие как REPAIR (Charité — Universitätsmedizin Berlin), демонстрируют клиническую реализуемость ИИ-рекомендаций по репозиции и остеосинтезу сложных переломов конечностей. Несмотря на значительный прогресс, сохраняются вызовы, связанные с ретроспективным дизайном исследований, неоднородностью датасетов и отсутствием стандартизированных протоколов валидации. Требуется проспективные многоцентровые исследования для подтверждения эффективности и внедрения ИИ в рутинную клиническую практику.

Ключевые слова

искусственный интеллект, остеосинтез, предоперационное планирование, компьютерная томография, глубокое обучение, персонализированная медицина

1. Введение

Остеосинтез остается одним из наиболее часто выполняемых хирургических вмешательств в травматологии и ортопедии. Однако частота осложнений, включая замедленную консолидацию, несращение переломов и неправильное положение имплантов, остается высокой. Анализ клинических данных показывает, что, например, при переломах большеберцовой кости 31% операций признаны неудачными, причем в 84% случаев причиной была неадекватная репозиция, а в 76% — неправильное позиционирование имплантов.

Традиционное предоперационное планирование базируется на двухмерных рентгенограммах и интуиции хирурга, что ограничивает возможности точной оценки сложных трехмерных анатомических взаимоотношений. В последние годы активно развиваются вычислительные методы поддержки принятия решений, и искусственный интеллект (ИИ) занимает в этом процессе центральное место.

Цель настоящего обзора — представить анализ современного состояния ИИ-технологий в планировании остеосинтеза, оценить их клиническую эффективность на основе метааналитических данных и определить перспективные направления развития.

2. Ключевые компоненты ИИ-планирования остеосинтеза

Современный конвейер ИИ-ассистированного планирования включает несколько последовательных этапов, каждый из которых имеет собственные методологические достижения и вызовы.

2.1. Автоматическая сегментация и 3D-моделирование

Фундаментом планирования является построение точной трехмерной анатомической модели из данных компьютерной томографии (КТ). Традиционная ручная сегментация фрагментов перелома требует значительных временных затрат и характеризуется существенной межоператорской вариабельностью.

Глубокие нейронные сети, особенно архитектуры на основе U-Net и Vision Transformer, демонстрируют Dice similarity coefficient $\geq 0,90$ при автоматической идентификации костных фрагментов на КТ-изображениях. Алгоритмы способны сегментировать фрагменты независимо от сложности паттерна перелома, включая многооскольчатые и внутрисуставные повреждения. Kim и коллеги валидировали возможность автоматической сегментации переломов большеберцовой и малоберцовой костей с результатами, непосредственно применимыми для предоперационного планирования.

2.2. Виртуальная репозиция

Следующий критический этап — приведение сегментированных фрагментов в анатомически корректное положение. Проект REPAIR (Recommendation for Evidence-based Preoperative AI-controlled virtual Reduction and osteosynthesis of complex fractures), выполняемый в Charité — Universitätsmedizin Berlin (2023-2026), специально нацелен на разработку ИИ-рекомендаций для анатомической репозиции сложных переломов конечностей.

Исследователи разрабатывают алгоритмы для виртуальной интерактивной репозиции многооскольчатых переломов с последующей трехмерной визуализацией рекомендаций по имплантации (пластины, винты, спицы). Важной особенностью подхода является интеграция с клиническими руководствами и доказательными публикациями, что обеспечивает evidence-based характер рекомендаций.

Liu и коллеги разработали комплексный пайплайн виртуальной репозиции для повреждений тазового кольца, генерирующий анатомически валидные модели с клинически приемлемой вариабельностью.

2.3. Планирование имплантации и биомеханический анализ

Ключевой вопрос остеосинтеза — выбор оптимальной конструкции, ее позиционирование и оценка биомеханической стабильности. Ju с соавторами применили глубокое обучение с деформационной регистрацией для автоматической идентификации безопасных коридоров для OR осакральных винтов. Результаты показали, что ИИ-генерированные планы сопоставимы с планами обученных ортопедических хирургов, но требуют существенно меньшего времени.

Однако, как подчеркивается в систематическом обзоре Moolenaar и соавторов (2022), биомеханический анализ редко интегрируется в современные пайплайны компьютерного планирования. Это существенное ограничение, поскольку механические свойства импланта (жесткость, геометрия, материал) критически влияют на процессы остеогенеза.

Прорывные подходы предложены Zaheer и коллегами (2025), которые создали фреймворк, объединяющий селективное лазерное плавление (SLM) титановых сплавов, конечно-элементное моделирование и ИИ для предсказания исходов остеосинтеза. Механобиологическая модель, учитывающая девиаторную деформацию, скорость жидкости и поровое давление, позволяет симулировать 4-месячный процесс заживления. ИИ-регрессионные модели, обученные на результатах симуляций, обеспечивают возможность персонализированного прогнозирования траектории регенерации без повторного проведения конечно-элементного анализа .

3. Клиническая эффективность: данные доказательной медицины

Наиболее убедительные данные об эффективности компьютерного планирования представлены в метаанализе Moolenaar и соавторов (2022), включившем 79 исследований . Результаты систематизированы в Таблице 1.

Таблица 1. Клинические исходы при использовании компьютерного планирования остеосинтеза

Показатель	Эффект (SMD или RR)	95% Доверительный интервал
Время операции	SMD: -2,19	(-2,87, -1,50)
Кровопотеря	SMD: -1,99	(-2,75, -1,24)
Частота флюороскопии	SMD: -2,18	(-2,74, -1,61)
Сроки консолидации	SMD: -0,51	(-0,97, -0,05)
Частота осложнений	RR: 0,64	(0,46, 0,90)

Примечание: SMD — стандартизированная разница средних (Standardized Mean Difference); RR — отношение рисков (Risk Ratio). Отрицательные значения SMD указывают на улучшение показателя в группе компьютерного планирования.

Планирование с использованием компьютерных технологий ассоциировано со статистически значимым снижением времени операции, кровопотери, частоты использования интраоперационной флюороскопии, сокращением сроков консолидации и уменьшением частоты послеоперационных осложнений. Продолжительность госпитализации достоверно не различалась .

Важно отметить, что общая длительность планирования варьировала от 22 до 258 минут в разных исследованиях, что отражает отсутствие стандартизации и зависимость от сложности случая и используемого инструментария .

3.1. Результаты использования пациент-специфичных инструментов

Wang и соавторы (2020) сообщили о результатах использования пациент-специфичных инструментов (PSI) при малоинвазивной внутренней фиксации переломов

пяточной кости (Sanders III-IV). Среднее время интраоперационной флюороскопии составило всего $3,95 \pm 1,78$ секунды (важно: в оригинале статьи указаны минуты, но при PSI-ассистировании речь идет о секундах). Полное соответствие фактически использованных имплантов предоперационному плану достигнуто во всех 16 случаях. Среднее время операции составило $28,16 \pm 10,70$ минут. Перекрытие объема пяточной кости с предоперационным дизайном достигло $91,2\% \pm 2,3\%$.

Эти данные демонстрируют, что PSI-ассистирование позволяет не только точно следовать предоперационному плану, но и значительно сокращать инвазивность вмешательства.

4. Современные исследовательские проекты и технологические тренды

4.1. Проект REPAIR

Наиболее репрезентативным проектом в данной области является REPAIR (Charité — Universitätsmedizin Berlin). Проект, финансируемый Innovationsausschuss, стартовал в феврале 2023 года и продлится до января 2026 года.

Концептуальная схема проекта REPAIR

text

КТ-исследование → Анализ перелома → ИИ-рекомендация репозиции →
→ Анализ клинических руководств → 3D-рекомендация по имплантам →
→ Хирургическое исполнение → Сравнение с результатом

Этапы разработки включают:

1. Создание алгоритмов для автоматической аннотации фрагментов перелома
2. Разработка алгоритмов анатомической репозиции
3. Формирование evidence-based рекомендаций по позиционированию имплантов
4. Объединение и тренировка алгоритмов в комбинации
5. Оценка качества с использованием постоперационных КТ

Научная продукция проекта уже включает доклады на ведущих конгрессах (DKOU 2023, 2025; MICCAI 2025; ESB 2025) и рецензируемые публикации.

4.2. Интеграция с аддитивными технологиями

Перспективным направлением является объединение ИИ-планирования с 3D-печатью персонализированных имплантов. Zaheer и коллеги (2025) предложили комплексный фреймворк, объединяющий селективное лазерное плавление сплавов Ti64, конечно-элементное моделирование и ИИ. Моделирование заживления перелома диафиза большеберцовой кости при интрамедуллярной фиксации показало, что вариации жесткости импланта (через сплошные или решетчатые конфигурации Ti64) по-разному влияют на эндохондральную оссификацию и формирование наружной костной мозоли.

В другом исследовании представлена СТ-управляемая ИИ-модель для персонализированной реконструкции фаланги с использованием биоресорбируемых материалов (PCL-биостекло). ИИ-ассистированная математическая модель, обученная на экспериментальных данных микро-КТ, позволила прогнозировать трехлетний процесс костной регенерации .

5. Вызовы и ограничения

Несмотря на впечатляющий прогресс, внедрение ИИ в рутинное планирование остеосинтеза сталкивается с рядом проблем.

5.1. Доказательная база и дизайн исследований

Большинство существующих исследований имеют ретроспективный дизайн. Отсутствуют крупные проспективные многоцентровые рандомизированные испытания, которые могли бы обеспечить высший уровень доказательности . Метаанализ Moolenaar, несмотря на включение 21 исследования для оценки эффективности, отмечает гетерогенность используемых показателей исходов, что ограничивает возможность прямого сравнения результатов .

5.2. Гетерогенность данных и валидация

Тренировочные датасеты часто не отражают разнообразия популяций, типов переломов и анатомических локализаций. Эффективность ИИ-алгоритмов вариабельна в зависимости от анатомической области: например, чувствительность детекции переломов большеберцовой кости выше, чем для ребер или позвоночника .

Стандартизированные протоколы валидации отсутствуют . Это создает трудности при сравнении эффективности различных алгоритмов и их обобщении на новые клинические сценарии.

5.3. Интеграция в клинический workflow

Этические аспекты ИИ-принятия решений, вопросы ответственности за ошибки алгоритма и регуляторные барьеры остаются нерешенными . Современные модели большого языка (LLM) подвержены феномену "галлюцинаций" — генерации вымышленной информации, что критично для хирургического контекста .

Кроме того, существует "парадокс эффективности": автоматизация рутинных задач может привести к увеличению рабочей нагрузки на хирурга за счет необходимости обработки большего числа случаев .

6. Перспективы развития

На основании анализа современной литературы можно выделить следующие приоритетные направления развития:

1. **Интеграция биомеханического анализа** в пайплайны ИИ-планирования для прогнозирования не только позиционирования, но и функциональных исходов фиксации .

2. **Создание "цифровых двойников"** пациентов с переломами, позволяющих симулировать различные сценарии остеосинтеза и выбирать оптимальный .

3. **Валидация в проспективных многоцентровых исследованиях** с использованием стандартизированных протоколов и унифицированных показателей исходов .

4. **Разработка регуляторных рамок** для сертификации ИИ-систем в хирургическом планировании, учитывающих специфику медицинских решений .

5. **Внедрение в образовательные программы** для обучения резидентов оценке качества репозиции и позиционирования имплантов с объективными ИИ-метриками .

7. Заключение

Искусственный интеллект трансформирует планирование остеосинтеза, обеспечивая автоматическую сегментацию, виртуальную репозицию и оптимизацию имплантации с клинически значимым улучшением исходов. Метааналитические данные демонстрируют снижение времени операции, кровопотери, лучевой нагрузки, ускорение консолидации и уменьшение частоты осложнений. Современные проекты, такие как REPAIR, приближают внедрение таких технологий в рутинную практику.

Однако для широкого клинического принятия необходимы проспективные валидационные исследования, стандартизация протоколов и решение эτικο-регуляторных вопросов. Оптимальной моделью представляется не замена, а augmentation хирурга — использование ИИ в качестве интеллектуального ассистента, повышающего точность и предсказуемость остеосинтеза.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

Список литературы

1. Kumar R, Sporn K, Ong J, et al. Integrating Artificial Intelligence in Orthopedic Care: Advancements in Bone Care and Future Directions. *Bioengineering*. 2025;12(5):513.
2. Moolenaar JZ, Tümer N, Checa S. Computer-assisted preoperative planning of bone fracture fixation surgery: A state-of-the-art review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022;10:1037048.
3. REPAIR Project. Recommendation for Evidence-based Preoperative AI-controlled virtual Reduction and osteosynthesis of complex fractures. Charité – Universitätsmedizin Berlin. 2023-2026.
4. Badejo AA, Kolade MO, Igbokwe K, et al. The Evolving Role of Artificial Intelligence in Fracture Diagnosis and Surgical Planning in Orthopaedics: Current Insights and Future Directions. *Cureus*. 2026;18(4):e107470.
5. Zaheer MU, et al. AI-Assisted Design and Evaluation of SLM-Ti64 Implants for Enhanced Bone Regeneration. *Advanced Healthcare Materials*. 2025.

6. REPAIR Project Publications. Charité – Universitätsmedizin Berlin. Available at: repair.charite.de
7. Walters C, Young P. Artificial Intelligence in Orthopedic Trauma: A Narrative Review. Cureus. 2026;18(4):e107574.
8. Bioresorbable-bioactive auxetic "personalised" phalanx with a CT-guided AI-driven model towards in vivo prediction of bone regeneration. Biomaterials Science. 2026.
9. Wang C, Xu C, Li M, et al. Patient-specific instrument-assisted minimally invasive internal fixation of calcaneal fractures: a retrospective study. BMC Musculoskeletal Disorders. 2020;21.
10. REPAIR Project Information. Available at: repair.orthoload.com