

## Обзорная статья

УДК 616.711-007.55-089.227.84-073.756.8

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-6-839-849>

## КТ-навигация в хирургии деформаций позвоночника

**О.Г. Прудникова**✉, **Е.А. Матвеев**, **М.С. Стребкова**, **А.В. Евсюков**

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

**Автор, ответственный за переписку:** Оксана Германовна Прудникова, [rog6070@gmail.com](mailto:rog6070@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Одним из наиболее сложных аспектов хирургии при деформациях позвоночника является установка винтов, при которой используют различные методы и варианты рентгенологического контроля, в частности навигационную систему на основе компьютерной томографии (КТ-навигация). Дискуссии о преимуществах и недостатках применяемых технологий определили актуальность исследования.

**Цель работы** — на основе систематизированных данных научной литературы оценить эффективность применения интраоперационной КТ-навигации при хирургическом лечении пациентов с деформациями позвоночника.

**Материалы и методы.** Поиск литературных источников, оценивающих параметры хирургических вмешательств при использовании КТ-навигации в хирургии деформаций позвоночника, проведен в базах данных Pubmed, EMBASE, ELibrary, Google. Тип статей — систематический обзор и метаанализ, глубина поиска — 10 лет. Исследование выполнено в соответствии с международными рекомендациями по написанию систематических обзоров и метаанализов PRISMA. Уровни достоверности доказательности и градации силы рекомендаций оценивали по протоколу ASCO. Всего в базах данных найдено 40 статей, в их списках литературы — еще 11 статей, из них полнотекстовых — 48. Критериям включения соответствовало восемь статей, дополнительно по соглашению авторов в выборку включены еще две статьи. Для анализа определены параметры: точность установки винтов, частота мальпозиций и их осложнения, продолжительность операции, объем кровопотери, частота повторных операций, позиционирование референтной рамки, лучевая нагрузка.

**Результаты и обсуждение.** Анализ определил преимущества использования интраоперационной КТ-навигации при установке винтов. КТ-навигация повышает точность установки винтов, не увеличивает продолжительность операции и не снижает эффективность коррекции деформации. Продолжительность операции, объем кровопотери и лучевая нагрузка при КТ-навигации сопоставимы с другими методами. Однократное позиционирование референтной рамки значительно сокращает продолжительность операции, не влияет на точность расположения винтов и не требует дополнительного КТ-сканирования, что снижает дозу лучевой нагрузки. Для сокращения излучения рекомендуется настройка режима сканирования с пониженной дозой излучения.

**Заключение.** Использование КТ-навигации имеет преимущества по точности установке винтов, меньшей частоте мальпозиций и связанных с ними осложнений, а также частоте реопераций. Высокая безопасность при использовании навигационной системы обусловлена не только большей точностью проведения винтов, но и меньшим количеством осложнений.

**Ключевые слова:** компьютерная навигация при сколиозе, computer navigation scoliosis

**Для цитирования:** Прудникова О.Г., Матвеев Е.А., Стребкова М.С., Евсюков А.В. КТ-навигация в хирургии деформаций позвоночника. *Гений ортопедии*. 2025;31(6):839-849. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-6-839-849.



## CT navigation in spinal deformity surgery

O.G. Prudnikova✉, E.A. Matveev, M.S. Strebkova, A.V. Evsyukov

Ilyarov National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

**Corresponding author:** Oksana G. Prudnikova, [pog6070@gmail.com](mailto:pog6070@gmail.com)

**Introduction** One of the most challenges in spinal deformity surgery is screw placement, which utilizes various methods and options for radiographic guidance, particularly computed tomography-based navigation (CT navigation). Discussions about the advantages and disadvantages of the technologies used determined the relevance of this study.

The **aim** of this study was to evaluate the effectiveness of intraoperative CT navigation in the surgical treatment of patients with spinal deformities using systematic data from the scientific literature.

**Materials and Methods** A literature search for studies evaluating the parameters of surgical interventions using CT navigation in spinal deformity surgery was conducted in Pubmed, EMBASE, ELibrary, and Google. The article type was a systematic review and meta-analysis, with a search depth of 10 years. The study was conducted in accordance with the PRISMA international guidelines for systematic reviews and meta-analyses. Levels of evidence and strength of recommendations were assessed using the ACCO protocol. A total of 40 articles were found in the databases, with 11 more articles in their reference lists, 48 of which were full-text articles. Eight studies met the inclusion criteria, and two more were added in the sample by agreement of the authors. The following parameters were determined for analysis: screw placement accuracy, malposition rate and complications, operative time, blood loss, reoperation rate, reference frame positioning, and radiation exposure.

**Results and discussion** The analysis revealed the advantages of using intraoperative CT navigation for screw placement. CT navigation improves screw placement accuracy, does not increase surgical time, and does not reduce the effectiveness of deformity correction. Surgery time, blood loss, and radiation exposure with CT navigation are comparable to other methods. Positioning of one reference frame significantly reduces surgical time, does not affect screw placement accuracy, and does not require additional CT scanning, thereby reducing radiation exposure. To reduce radiation exposure, it is recommended to set a scanning mode with a reduced radiation dose.

**Conclusion** CT navigation offers advantages in terms of screw placement accuracy, lower malposition rates and associated complications, and reduced reoperation rates. The high safety profile of the navigation system is due not only to the increased accuracy of screw placement but also to lower complication rates.

**Keywords:** computer navigation for scoliosis, computer navigation scoliosis

**For citation:** Prudnikova OG, Matveev EA, Strebkova MS, Evsyukov AV. CT navigation in spinal deformity surgery. *Genij Ortopedii*. 2025;31(6):839-849. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-6-839-849.

## ВВЕДЕНИЕ

Сколиоз является одним из наиболее распространенных патологических состояний, по поводу которого проводят инструментальную фиксацию позвоночника. Независимо от этиологического фактора сколиотические деформации сопровождаются не только отклонением оси позвоночника, но и изменениями формы и размеров структур позвонков, их ротацией и торсией. Цель операции при сколиозе — коррекция деформации для сбалансированного положения позвоночника и предотвращения прогрессирования искривления [1, 2]. Установка винтов является одним из наиболее сложных аспектов хирургии позвоночника из-за риска неправильного размещения с повреждением спинного мозга, нервных корешков, расположенных рядом внутренних органов, а в дальнейшем — миграции и переломов имплантов [3].

По данным послеоперационной компьютерной томографии (КТ), частота мальпозиций винтов при оперативных вмешательствах по коррекции деформаций позвоночника составляет до 57,8 %. Осложнения, связанные с положением винтов, наблюдают в 0,64–1,1 % случаев, а неврологический дефицит — в 0,3–0,8 % [2, 4, 5].

Неправильное расположение транспедикулярных винтов и длительная продолжительность операции — две основные проблемы, которые негативно влияют на конечные результаты хирургических вмешательств при сколиозе [1, 4].

При установке винтов хирурги применяют как разные методы имплантации, так и варианты рентгенологического контроля:

- установка под флюороскопией (FS);
- метод свободной руки FH (*англ.*: free hand) с рентгенологическим контролем после установки или без него;
- флюороскопическая навигация с использованием С-дуги, обеспечивающая двумерные рентгеноскопические изображения;
- робот-навигатор и компьютерная навигация с использованием О-дуги (КТ-навигация), обеспечивающая трёхмерную визуализацию.

При использовании КТ-навигации появляется возможность интраоперационного КТ-контроля положения винтов и их переустановки в случае смещения. КТ-навигация становится предпочтительным вариантом во многих центрах спинальной хирургии, так как обеспечивает трёхмерную визуализацию, определение анатомии позвоночника в реальном времени и помогает хирургу размещать имплантаты. Сторонники этого метода утверждают, что он позволяет стабильно точно располагать винты при фиксации позвонков, в то время как противники утверждают, что он увеличивает продолжительность операции, кровопотерю и облучение, что сводит на нет ценность КТ-навигации [1, 6, 7, 8].

**Цель работы** — на основе систематизированных данных научной литературы оценить эффективность применения интраоперационной КТ-навигации при хирургическом лечении пациентов с деформациями позвоночника.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Стратегия поиска и отбора литературных данных**

Поиск литературных данных, оценивающих параметры хирургических вмешательств при использовании КТ-навигации у больных с деформациями позвоночника, проведен в базах данных Pubmed, EMBASE, ELibrary, Google.

Исследование выполнено в соответствии с международным протоколом PRISMA, критерии включения и исключения представлены в табл. 1. В рамках протокола на первом этапе выполнен поиск литературных источников с использованием ключевых слов: компьютерная навигация при сколиозе, computer navigation scoliosis. Глубина поиска — 10 лет. На втором этапе проведено исключение публикаций, не соответствующих критериям исследования. На третьем этапе осуществлен анализ полных текстов отобранных статей на соответствие критериям включения и список литературы на наличие релевантных исследований. Поиск осуществляли три исследователя: первоначальное извлечение данных выполнено одним автором, впоследствии проверено другим автором. Затем три автора провели отбор по критериям исключения и окончательный анализ публикации.

Всего в поисковых базах данных найдено 40 статей (2014–2024 гг.), в списках источников к этим статьям — еще 11, из 51 статьи полнотекстовых было 48. Критериям включения соответствовало восемь статей (табл. 1, рис. 1).

Критерии селекции и включения/невключения публикаций в соответствии с протоколом PRISMA

Элементы PRISMA	Критерии селекции	
Вмешательство	Задняя инструментальная фиксация с использованием интраоперационной КТ-навигации	
Сравнение	Группы исследования в отобранных статьях	
Результат	Преимущества и недостатки при использовании интраоперационной КТ-навигации при хирургическом лечении пациентов с деформациями позвоночника	
	Критерии включения	Критерии невключения
Участники	Пациенты, получившие оперативное лечение по поводу сколиоза с интраоперационной КТ-навигацией	Пациенты, получившие оперативное лечение не по поводу сколиоза с интраоперационной КТ-навигацией
Дизайн исследования	Систематический обзор	Рандомизированные и нерандомизированные, ретроспективные, проспективные исследования. Клинические случаи, серии клинических случаев
Публикации	На русском, английском языках, полнотекстовые	На любых других языках, без доступа к полному тексту

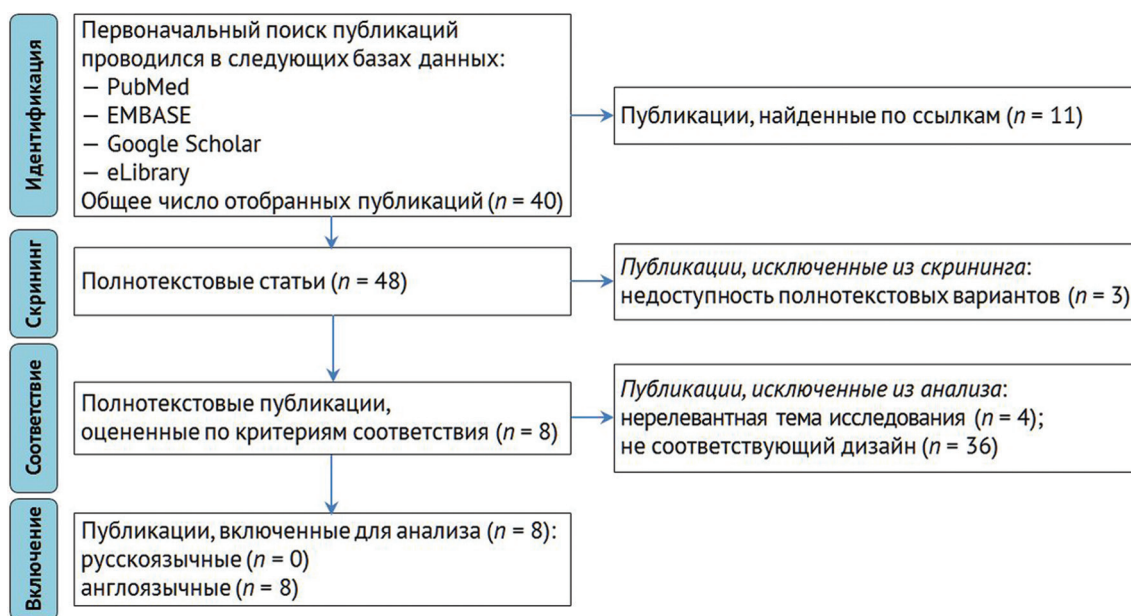


Рис. 1. Схематический алгоритм отбора тематических публикаций в соответствии с протоколом PRISMA

Для анализа работ сформулированы **основные вопросы исследования**:

- 1) точность установки винтов, частота мальпозиций;
- 2) осложнения мальпозиций;
- 3) продолжительность операции, время установки винтов;
- 4) объем кровопотери;
- 5) частота повторных операций;
- 6) позиционирование референтной рамки;
- 7) лучевая нагрузка.

По соглашению авторов данной публикации в выборку включены еще две статьи: обзорная статья A. Ansoerge et al. [9], не соответствующая критериям систематического обзора, но содержащая сравнительный анализ лучевой нагрузки при разных видах вмешательств, и оригинальная статья S. Karoor et al. [10], в которой представлено обоснование протокола исследования с низкой дозой лучевой нагрузки. Таким образом, в исследование вошло 10 статей (табл. 2).

Основная структура статей — это сравнительный анализ различных методик установки винтов по выбранным авторами параметрам. Наиболее часто использованы отношения шансов (ОШ) и 95-процентных доверительных интервалов (ДИ). Объединённые оценки ОШ по всем исследованиям получены с помощью модели с фиксированным эффектом. При неоднородности выборок ОШ объединено с по-

мощью модели со случайным эффектом [11, 12, 13]. Следует учитывать, что при проведении сравнительного анализа авторы использовали разнородные объединенные статистические параметры, поэтому интерпретация результатов единым цифровым показателем невозможна.

Таблица 2

## Список статей, соответствующих критериям отбора и включенных в обзор

Авторы, № источника	Дизайн исследования	Количество включенных статей	Стратегия поиска	Характеристика пациентов	Характеристика исследования	Параметры для оценки	Системы оценки точности расположения винтов
Kapoor S. et al., 2021 [10]	Оригинальная статья	–	–	Фантомы, 4 ребенка	Разработка протокола КТ-навигации с низкими дозами, расчеты и модели	Анализ изображений при разной лучевой нагрузке	–
Ansorge A. et al., 2023 [9]	Обзор	51	нет данных	–	Сравнительный анализ оперативных вмешательств с КТ-навигацией и других методов визуализации	Выбрано: лучевая нагрузка	–
Tian W. et al., 2016 [11]	Систематический обзор	8	PRISMA	321 пациент, 3821 винт, с КТ-навигацией – 1920 винтов, без КТ навигации – 1901 винт, идиопатический сколиоз	Сравнительный анализ оперативных вмешательств с КТ-навигацией и без КТ-навигации	Точность установки винта, частота мальпозиций, коррекция деформаций, продолжительность операции, лучевая нагрузка	Предложенный вариант, основанный на медиальном/латеральном смещении 0–2 мм, 2–4 мм, более 4 мм
Feng W. et al., 2020 [14]	Систематический обзор	8	PRISMA	850 пациентов, 10 трупов, 5522 винта, деформации грудного и поясничного отделов различной этиологии	Сравнительный анализ эффективности O-Atm и рентгеноскопии C-Atm	Точность установки винта, время подготовки к установке винта, время установки винта, продолжительность операции	Шкала от 0 до 3, классификации Лейна, шкала от 1 до 10
Chan A. et al., 2017 [13]	Систематический обзор	79	PROSPERO	4795 пациентов, 5923 винта; возраст 12,1–19,6 лет; идиопатический сколиоз	Сравнительный анализ оперативных вмешательств с КТ-навигацией, метода свободной руки (FH)	Продолжительность операции, объем кровопотери, частота мальпозиций, осложнения мальпозиций, реоперации, послеоперационные осложнения	Различные варианты, в основе медиальное/латеральное смещение 0–2 мм, 2–4 мм, более 4 мм
Baldwin K.D. et al., 2022 [8]	Систематический обзор и метаанализ	13	PRISMA	5578 пациентов, КТ-навигации – 485; идиопатический сколиоз (6), нейрофиброматоз (1), деформации позвоночника (1), смешанные группы (5)	Сравнительный анализ оперативных вмешательств с КТ-навигацией и без КТ-навигации	Продолжительность операции, объем кровопотери, количество мальпозиций, осложнения мальпозиций, реоперации, послеоперационные осложнения, лучевая нагрузка	Классификация Герцбейна или ее производные
Oba H. et al., 2023 [15]	Систематический обзор	20	PRISMA	6209 пациентов; дети; идиопатический сколиоз (381), нервно-мышечный сколиоз (44), нейрофиброматоз (9), врожденный сколиоз (8), системный сколиоз (14), другие заболевания (7)	Сравнительный анализ оперативных вмешательств с КТ-навигацией и без КТ-навигации	Точность установки, мальпозиции, доза облучения, продолжительность операции, объем кровопотери, реоперации, опорность винтов, осложнения	Классификации Rao (3), Neo (4), Герцбейна (4), Джесвани (1), Таникавы (1). Представили объединенную классификацию
Aoude A.A. et al., 2015 [16]	Систематический обзор	68	нет данных	3442 пациента, 60 трупов, 43 305 винтов	Сравнительный анализ оперативных вмешательств с КТ-навигацией и метода свободной руки (FH)	Точность установки винтов	Анализ основных типов классификаций

Список статей, соответствующих критериям отбора и включенных в обзор

Авторы, № источника	Дизайн исследования	Количество включенных статей	Стратегия поиска	Характеристика пациентов	Характеристика исследования	Параметры для оценки	Системы оценки точности расположения винтов
Meng X.T. et al., 2017 [12]	Метаанализ	14	PRISMA	1723 пациента, 9019 винтов	Сравнительный анализ оперативных вмешательств с КТ-навигацией и флюороскопией	Точность установки, частота мальпозиций, продолжительности операции, объём интраоперационной кровопотери, время установки транспедикулярных винтов, частота осложнений	нет данных
Chan A. et al., 2020 [2]	Систематический обзор и метаанализ	94	PRISMA	–	Сравнительный анализ оперативных вмешательств с КТ-навигацией и без КТ-навигации	Точность установки, частота мальпозиций, продолжительности операции, частота осложнений	классификации Герцбейна

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Точность установки винтов, частота мальпозиций**

Основными параметрами при проведении сравнительного анализа во всех представленных исследованиях являются точность установки винтов и частота мальпозиций. В зависимости от выбранного статистического параметра точность установки винтов при КТ-навигации во всех исследованиях выше и оценивается как *умеренно выше – выше – значительно выше*, от 75,6 % до 97,3 % (табл. 3). Точность установки винтов без КТ-навигации характеризуется как *ниже – умеренно ниже – значительно ниже*, от 58,5 % (FS) до 91,4 % (FH).

Анализ, проведенный K.D. Baldwin et al., показал, что при КТ-навигации вероятность оптимального расположения винтов в ножке почти в два раза выше, вероятность приемлемого расположения в три раза выше, а вероятность потенциально небезопасного расположения составляет  $\frac{1}{3}$  вероятности при использовании только мануальной техники или рентгеноскопии [8].

Частота мальпозиций также ниже при использовании КТ-навигации и составляет от 7,2 % до 15,4 %. При установке винтов без КТ-навигации мальпозиции выявляются чаще: от 11,8 – 26,5 – 66,8 % (FH) до 50,7 % (FS) [2, 11, 12, 14, 15]. По данным K.D. Baldwin et al., при КТ-навигации небезопасную мальпозицию диагностируют в 1,9 % случаев, в то время как при установке винтов без КТ-навигации — до 7 % случаев [8]. Анализ уровней позвоночника с наиболее частыми мальпозициями представлен в обзоре H. Oba et al.: при использовании КТ-навигации большее количество сообщений указывает на мальпозиции в верхне-грудном и средне-грудном отделах позвоночника, а при использовании метода свободной руки — в средне-грудном и нижне-грудном отделах. Применение КТ-навигации снижает частоту медиальных смещений в большей степени, чем частоту латеральных [15]. В обзорах A. Ansoerge et al. и A.A. Aoude et al. показано, что при оценке точности положения винтов и определения мальпозиций проблемой является отсутствие стандартного метода оценки и классификации, учитывающих клинические проявления и дальнейшую тактику [9, 16].

**Осложнения мальпозиций**

Анализ осложнений мальпозиций винтов проведен в пяти работах. K.D. Baldwin et al. и H. Oba et al. отмечают отсутствие осложнений мальпозиций винтов при использовании КТ-навигации [8, 15]. A. Chan et al. указывают на противоречивые из-за разнородности выборок данные в отношении осложнений, связанных с установкой винтов. В исследовании 2017 г. частота осложнений при КТ-навигации составила 1,8 %, при флюороскопии — 25,8 %, при методе свободной руки — 28,7 % [2]. В последующей работе 2020 г. осложнения при применении КТ-навигации составили 0–1,6 %, без КТ-навигации — 0–1,7 % [13]. В исследовании X.T. Meng et al. анализ использования модели с фиксированным эффектом показал значительную разницу между группами с КТ-навигацией и рентгеноскопией, — частота осложнений при КТ-навигации была ниже [12].

**Продолжительность операции, время установки винтов**

Основной дискуссионный вопрос при сравнительном анализе оперативных вмешательств с использованием КТ-навигации и без нее — продолжительность операции. Проведение подготовительных этапов (установка референтной рамки, КТ-сканирование позвонков, калибровка инструментов) занимают

определенное время, сокращение которого зависит от опыта хирурга и используемых технических приемов. Вместе с тем, не стоит забывать, что проведение рентгеноскопии при деформированном позвоночнике также требует временных затрат.

Анализ продолжительности операций проведен в семи исследованиях. По данным шести обзоров продолжительность операции при применении КТ-навигации значимо не отличается от других методов интраоперационной визуализации: 446 мин. с навигацией против 412 мин. без навигации [8], 257 мин. и 227 мин. соответственно [13], 310 мин. и 136–380 мин. [2]. Эти данные подтверждаются и другими исследованиями [11, 12, 14]. При анализе оперативных вмешательств 362 пациентов среднее время операции с использованием КТ-навигации, по данным Н. Oba et al., составило 309 мин. [15]. Некоторые авторы отмечают, что время подготовки к установке винта при навигации — больше [12, 14].

Таким образом, большинство исследователей указывают на отсутствие существенной разницы в продолжительности операции при использовании КТ-навигации и без нее.

### **Объем кровопотери**

Авторы четырех обзоров обсуждают объем кровопотери при использовании КТ-навигации, во всех работах показано, что объем кровопотери при таких вмешательствах не больше, чем при использовании рентгеноскопии или метода свободной руки.

По данным К.Д. Baldwin et al., кровопотери в группах с КТ-навигацией и без нее не имеют существенных различий (1131,0 мл против 1077,0 мл) [8]. Х.Т. Meng на модели случайных эффектов доказывает, что при операциях с КТ-навигацией объем кровопотери меньше, чем при операциях с рентгеноскопией [12]. В обзоре А. Chan et al. отдельные исследования показывают, что при использовании КТ-навигации объем кровопотери составляет 1138 мл, при рентгеноскопии — 523–860 мл, при методе свободной руки — 305–1813 мл [2]. По данным Н. Oba et al., средняя кровопотеря у 347 пациентов при операциях с использованием КТ-навигации составила 675 мл [15].

### **Частота повторных операций**

Данные о повторных операциях отражены в четырех обзорах, и во всех отмечено их отсутствие при применении КТ-навигации. К.Д. Baldwin et al. описывают шесть случаев повторных операций в группе без КТ-навигации ( $n = 465$ ), в группе с КТ-навигацией реопераций не зарегистрировано [8]. Таким образом, можно констатировать отсутствие критических мальпозиций при использовании интраоперационной КТ-навигации, что косвенно подтверждает ее высокую безопасность.

### **Позиционирование референтной рамки**

Одним из факторов, определяющих продолжительность операции и лучевую нагрузку, является подготовительный этап, — установка референтной рамки и КТ-сканирование позвонков зоны фиксации. Классическим вариантом является размещение рамки для сканирования и навигации шести позвонков (три выше и ниже) с последующей переустановкой рамки и повторным сканированием при необходимости более протяженной имплантации. Данный подход увеличивает как время операции, так и лучевую нагрузку. Только Н. Oba et al. обсуждают вопрос о вариантах позиционирования референтной рамки и связанной с этим частотой мальпозиций. Представленные ими данные доказывают точность установки винтов на шесть–девять позвонков от референтной рамки, что исключает повторное позиционирование рамки и КТ-сканирование, значительно сокращая время операции и лучевую нагрузку [15].

### **Лучевая нагрузка**

Еще одним дискуссионным вопросом при использовании КТ-навигации является лучевая нагрузка на пациента и хирурга во время проведения операции. Противники метода говорят о высокой нагрузке, которая представляет опасность для пациента и персонала, участвующего в операции. Сторонники метода считают, что лучевая нагрузка снижается при использовании специального протокола с низкой дозой, соблюдении мер безопасности и оптимальном планировании операции, в т.ч. сокращении сканирования за счет позиционирования референтной рамки. Излучение, получаемое при интраоперационной КТ-навигации, является фиксированным, зависит от количества сканирований и используемого протокола визуализации [15].

Авторы только двух систематических обзоров проводят анализ лучевой нагрузки при использовании КТ-навигации и других методов. По данным К.Д. Baldwin et al., несмотря на то, что воздействие радиации в группе с навигацией было выше, чем в группе без навигации, разница из-за высокой степени дисперсии не была статистически значимой. Дополнительный анализ чувствительности показал незначительную разницу облучения пациента и хирурга при применении навигационной и ненавигационной методик [8].

H. Oba et al. указывают на разнородность результатов из-за отсутствия статистически достоверных значений. При этом авторы уточняют, что при интраоперационной рентгеноскопии лучевая нагрузка составляет 20 мЗв/мин, что в два раза больше, чем при КТ-исследовании от Th<sub>1</sub> до L<sub>v</sub>, которое составляет примерно 10 мЗв. Это позволяет предположить, что общая доза рентгеновского излучения при предоперационной КТ-навигации и послеоперационной КТ-оценке положения винтов почти равна дозе при интраоперационной рентгеноскопии в течение 1 мин. Таким образом, доза рентгеновского излучения при проведении основных рентгенологических исследований в рамках этой процедуры является разумной [15].

A. Ansorge et al. анализируют интраоперационную лучевую нагрузку по четырем публикациям. При установке винтов методом свободной руки с использованием обычной рентгеноскопии среднее время рентгеноскопии составляет от 24 до 35 сек., что соответствует эффективной дозе облучения от 0,17 до 0,34 мЗв. При использовании КТ-навигации эффективная доза облучения пациента составляет от 1,11 до 1,48 мЗв. При использовании протокола с низкой дозой облучения в двух сериях исследований методом «случай–контроль» эффективная доза облучения составляет 0,65 мЗв для каждого исследования, что эквивалентно 85 сек. обычной рентгеноскопии и позволяет визуализировать 6–8 позвонков [9].

В согласительной статье S. Karoor et al. представлены разбор и обоснование протокола исследования с низкой лучевой нагрузкой. Кадаверная часть работы включает отработку протокола визуализации, достаточного для достоверной оценки изображений, клиническая часть (4 пациента) — апробацию на людях при оперативных вмешательствах по поводу сколиоза. Протокол с низкой дозой облучения (снижения тока рентгеновской трубки до 10 мА при сохранении потенциала на уровне 90 кВ) позволяет получить изображения приемлемого качества, при этом доза облучения составляет всего 14 % от рекомендуемой дозы облучения по протоколу. Общая доза облучения, полученная по этому протоколу, — примерно 0,8 мЗв за одно вращение. Эта эффективная доза составляет менее 1/3 от среднего уровня облучения в Великобритании и менее 1/6 от среднего уровня облучения в США за год. У пациентов не выявлено никаких неврологических осложнений или осложнений, связанных с установкой винтов [10]. Представленный протокол рекомендован для хирургического лечения пациентов со сколиозом. В то же время необходимо понимать, что использование интраоперационной навигации после рентгенологического сканирования исключает необходимость нахождения операционной бригады в операционной во время исследования, а дальнейшая работа осуществляется без облучения, что дополнительно снижает лучевую нагрузку на персонал операционной.

В табл. 3 представлены основные параметры сравнительного анализа оперативных вмешательств с использованием КТ-навигации и других методов.

Таблица 3

Сравнительный анализ хирургических вмешательств при сколиозе с использованием КТ-навигации и других методов

Критерии	Tian W. et al., 2016 [11]	Baldwin K.D. et al., 2022 [8]	Chan A. et al., 2020 [13]	Feng W. et al., 2020 [14]	Oba H. et al., 2023 [15]	Aoude A.A. et al., 2015 [16]	Meng X.T. et al, 2017 [12]	Chan A. et al., 2017 [2]
	КТН / без КТН			O-Arm / C-Arm	КТН / FH		КТН / FS	КТН / FS / FH
Точность установки винтов	выше / ниже	75,6 % / 58,5 %	умеренно выше / умеренно ниже	выше / ниже	–	97,3 % / 91,4 %	значительно выше / значительно ниже	–
Частота мальпозиций	3,7 % / 11,9 %	небезопасная мальпозиция 1,9 % / 7 %	13 % / 20 %	меньше / больше	7,2–11,5 % / 11,8–26,5 %	–	меньше / больше	15,4 % / 50,7 % / 66,8 %
Частота осложнений мальпозиций	–	0/12 человек	0–1,6 % / 0–1,7 %	–	0/–	–	меньше / больше	1,8 % / 25,8 % / 28,7 %
Время подготовки к установке винта	–	–	–	больше в 2 раза / меньше	–	–	больше / меньше	–
Время установки винта	–	–	–	нет разницы	–	–	–	–
Продолжительность операции, мин.	нет разницы	446 / 412	257 / 227	нет разницы	309 / –	–	меньше / больше	310 / 274 / 136–380
Объем кровопотери, мл	–	1131 / 1077	–	–	675 / –	–	меньше / больше	1138 / 523–860 / 305–1813

Таблица 3 (продолжение)

Сравнительный анализ хирургических вмешательств при сколиозе с использованием КТ-навигации и других методов

Критерии	Tian W. et al., 2016 [11]	Baldwin K.D. et al., 2022 [8]	Chan A. et al., 2020 [13]	Feng W. et al., 2020 [14]	Oba H. et al., 2023 [15]	Aoude A.A. et al., 2015 [16]	Meng X.T. et al., 2017 [12]	Chan A. et al., 2017 [2]
	КТН / без КТН			O-Arm / C-Arm	КТН / FH		КТН / FS	КТН / FS / FH
Реоперации	0 / 1	0 / 6 человек	–		0 / –	–	–	0 / 0 / 4 %
Инфекционные осложнения	–	–	–		–	–	–	0 / 0 / 14,1 %
Поломка винтов, псевдоартроз	–	–	–		–	–	–	0 / 0 / 6,7 %
Коррекция деформации	нет разницы							
Лучевая нагрузка	–	нет разницы	–	–	разнородные данные	–	–	–

КТН – КТ-навигация; FS – флюороскопия (fluoroscopy), FH – метод свободной руки (free hand).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Хирургия деформаций позвоночника относится к наиболее сложным разделам спинальной хирургии и сопряжена с высоким уровнем осложнений. Установка винтов на фоне деформированного позвоночника и измененных костных структур позвонков требует контроля их положения для предупреждения повреждений невральных структур, расположенных рядом анатомических образований и формирования нестабильности конструкций [17]. Сосудистые и неврологические осложнения, связанные с неправильным положением винтов, являются основной проблемой при операциях по коррекции деформаций позвоночника [18, 19].

Точность установки винтов имеет первостепенное значение и является важной составляющей успешной операции. Для улучшения позиционирования винтов разработаны и усовершенствованы инструменты, а также новые методы визуализации и навигации [16, 17, 19]. Метод свободной руки является преобладающим при установке винтов, несмотря на то, что интраоперационное использование трехмерных изображений повышает точность их установки [1, 2, 4, 5, 7, 13, 19]. Основными обсуждаемыми вопросами при использовании интраоперационной КТ-навигации являются точность установки винтов, частота и осложнения мальпозиций, продолжительность операций, объем кровопотери и самое главное, – лучевая нагрузка на пациента и персонал [6, 20, 21]. Проведенный анализ литературных данных показывает преимущества использования КТ-навигации при оперативных вмешательствах у больных сколиозом по точности установке винтов, меньшей частоте мальпозиций и связанных с ними осложнений и, соответственно, частоте повторных операций.

Продолжительность операции также является сопоставимой при использовании КТ-навигации и других методов интраоперационной визуализации винтов. По мере того, как хирурги осваивают навигационные системы, процесс регистрации становится более точным, время установки винтов сокращается, улучшается сопоставление данных между устройствами, что приводит к сокращению времени установки [12, 22, 23].

Представленные систематические обзоры не определяют большую кровопотерю и продолжительность операций с применением КТ-навигации, хотя подготовка к установке винтов требует дополнительного времени.

Поскольку установка винтов является лишь этапом хирургического вмешательства при деформациях позвоночника, то использование КТ-навигации и других методов не определяет степень коррекции [1, 11, 17, 20].

Минимизация радиационного облучения пациентов со сколиозом имеет первостепенное значение. На облучение в периоперационный период может влиять выбранный тип и настройки используемого метода визуализации (обычная рентгеноскопия, 3D-рентгеноскопия, КТ-навигация, КТ-контроль) [20, 21]. Для сокращения излучения рекомендуют настройку режима сканирования с пониженной дозой излучения, а также использование во время оперативного вмешательства специальных технических приемов [10]. Однократное позиционирование референтной рамки значительно сокращает продолжительность операции, не влияет на точность расположения винтов и не требует дополнительного КТ-сканирования, что снижает дозу лучевой нагрузки [24, 25, 26].

Отсутствие единой системы оценки и классификации смещений винтов определяет необходимость ее разработки с учетом клинических проявлений и тактики лечения [16, 25, 26].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный анализ показал, что интраоперационная КТ-навигация при установке винтов действительно повышает точность их размещения, не увеличивает продолжительность операции и не снижает эффективность коррекции деформации. Повышение хирургической безопасности с использованием навигационной системы обусловлено не только большей точностью проведения винтов, но и меньшим количеством осложнений.

**Конфликт интересов.** Не заявлен.

**Источник финансирования.** Не заявлен.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cammarata G, Scalia G, Costanzo R, et al. Fluoroscopy-Assisted Freehand Versus 3D-Navigated Imaging-Assisted Pedicle Screw Insertion: A Multicenter Study. *Acta Neurochir Suppl.* 2023;135:425-430. doi: 10.1007/978-3-031-36084-8\_65.
2. Chan A, Parent E, Narvacan K, et al. Intraoperative image guidance compared with free-hand methods in adolescent idiopathic scoliosis posterior spinal surgery: a systematic review on screw-related complications and breach rates. *Spine J.* 2017;17(9):1215-1229. doi: 10.1016/j.spinee.2017.04.001.
3. Rivkin MA, Yocom SS. Thoracolumbar instrumentation with CT-guided navigation (O-arm) in 270 consecutive patients: accuracy rates and lessons learned. *Neurosurg Focus.* 2014;36(3):E7. doi: 10.3171/2014.1.FOCUS13499.
4. Zhao Z, Liu Z, Hu Z, et al. Improved accuracy of screw implantation could decrease the incidence of post-operative hydrothorax? O-arm navigation vs. free-hand in thoracic spinal deformity correction surgery. *Int Orthop.* 2018;42(9):2141-2146. doi: 10.1007/s00264-018-3889-8.
5. Zhang W, Takigawa T, Wu Y, et al. Accuracy of pedicle screw insertion in posterior scoliosis surgery: a comparison between intraoperative navigation and preoperative navigation techniques. *Eur Spine J.* 2017;26(6):1756-1764. doi: 10.1007/s00586-016-4930-5.
6. Berlin C, Quante M, Thomsen B, et al. Intraoperative Radiation Exposure for Patients with Double-Curve Idiopathic Scoliosis in Freehand-Technique in Comparison to Fluoroscopic- and CT-Based Navigation. *Z Orthop Unfall.* 2021;159(4):412-420. doi: 10.1055/a-1121-8033.
7. Singh A, Kotzur T, Peterson B, et al. Computer Assisted Navigation Does Not Improve Outcomes in Posterior Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Global Spine J.* 2024;21925682241274373. doi: 10.1177/21925682241274373.
8. Baldwin KD, Kadiyala M, Talwar D, et al. Does intraoperative CT navigation increase the accuracy of pedicle screw placement in pediatric spinal deformity surgery? A systematic review and meta-analysis. *Spine Deform.* 2022;10(1):19-29. doi: 10.1007/s43390-021-00385-5.
9. Ansoorge A, Sarwahi V, Bazin L, et al. Accuracy and Safety of Pedicle Screw Placement for Treating Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Narrative Review Comparing Available Techniques. *Diagnostics (Basel).* 2023;13(14):2402. doi: 10.3390/diagnostics13142402.
10. Kapoor S, O'Dowd K, Hilis A, Quraishi N. The Nottingham radiation protocol for O-arm navigation in paediatric deformity patients: a feasibility study. *Eur Spine J.* 2021;30(7):1920-1927. doi: 10.1007/s00586-021-06762-y.
11. Tian W, Zeng C, An Y, et al. Accuracy and postoperative assessment of pedicle screw placement during scoliosis surgery with computer-assisted navigation: a meta-analysis. *Int J Med Robot.* 2017;13(1). doi: 10.1002/rcs.1732.
12. Meng XT, Guan XF, Zhang HL, He SS. Computer navigation versus fluoroscopy-guided navigation for thoracic pedicle screw placement: a meta-analysis. *Neurosurg Rev.* 2016;39(3):385-391. doi: 10.1007/s10143-015-0679-2.
13. Chan A, Parent E, Wong J, et al. Does image guidance decrease pedicle screw-related complications in surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis: a systematic review update and meta-analysis. *Eur Spine J.* 2020;29(4):694-716. doi: 10.1007/s00586-019-06219-3.
14. Feng W, Wang W, Chen S, et al. O-arm navigation versus C-arm guidance for pedicle screw placement in spine surgery: a systematic review and meta-analysis. *Int Orthop.* 2020;44(5):919-926. doi: 10.1007/s00264-019-04470-3.
15. Oba H, Uehara M, Ikegami S, et al. Tips and pitfalls to improve accuracy and reduce radiation exposure in intraoperative CT navigation for pediatric scoliosis: a systematic review. *Spine J.* 2023;23(2):183-196. doi: 10.1016/j.spinee.2022.09.004.
16. Aoude AA, Fortin M, Figueiredo R, et al. Methods to determine pedicle screw placement accuracy in spine surgery: a systematic review. *Eur Spine J.* 2015;24(5):990-1004. doi: 10.1007/s00586-015-3853-x.
17. Kwan MK, Loh KW, Chung WH, et al. Perioperative outcome and complications following single-staged Posterior Spinal Fusion (PSF) using pedicle screw instrumentation in Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS): a review of 1057 cases from a single centre. *BMC Musculoskelet Disord.* 2021;22(1):413. doi: 10.1186/s12891-021-04225-5.
18. Zhang W, Takigawa T, Wu Y, et al. Accuracy of pedicle screw insertion in posterior scoliosis surgery: a comparison between intraoperative navigation and preoperative navigation techniques. *Eur Spine J.* 2017;26(6):1756-1764. doi: 10.1007/s00586-016-4930-5.
19. Kothari AR, Katkade SM, Bhilare PD, et al. "Critical pedicle wall" breaches analysis in complex spinal deformity using O-arm navigation. *Surg Neurol Int.* 2023;14:306. doi: 10.25259/SNI\_437\_2023.
20. Urbanski W, Jurasz W, Wolanczyk M, et al. Increased Radiation but No Benefits in Pedicle Screw Accuracy With Navigation versus a Freehand Technique in Scoliosis Surgery. *Clin Orthop Relat Res.* 2018;476(5):1020-1027. doi: 10.1007/s11999-000000000000204.
21. Obid P, Zahnreich S, Frodl A, et al. Freehand Technique for Pedicle Screw Placement during Surgery for Adolescent Idiopathic Scoliosis Is Associated with Less Ionizing Radiation Compared to Intraoperative Navigation. *J Pers Med.* 2024;14(2):142. doi: 10.3390/jpm14020142.
22. Shin MH, Hur JW, Ryu KS, Park CK. Prospective Comparison Study Between the Fluoroscopy-guided and Navigation Coupled With O-arm-guided Pedicle Screw Placement in the Thoracic and Lumbosacral Spines. *J Spinal Disord Tech.* 2015;28(6):E347-E351. doi: 10.1097/BSD.0b013e31829047a7.
23. Jin M, Liu Z, Qiu Y, et al. Incidence and risk factors for the misplacement of pedicle screws in scoliosis surgery assisted by O-arm navigation-analysis of a large series of one thousand, one hundred and forty five screws. *Int Orthop.* 2017;41(4):773-780. doi: 10.1007/s00264-016-3353-6.
24. Uehara M, Takahashi J, Ikegami S, et al. Are pedicle screw perforation rates influenced by distance from the reference frame in multilevel registration using a computed tomography-based navigation system in the setting of scoliosis? *Spine J.* 2017;17(4):499-504. doi: 10.1016/j.spinee.2016.10.019.
25. Oba H, Ikegami S, Uehara M, et al. Reduction in CT scan number with the reference frame middle attachment method in intraoperative CT navigation for adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J.* 2023;32(9):3133-3139. doi: 10.1007/s00586-023-07842-x.
26. Shimizu M, Takahashi J, Ikegami S, et al. Are pedicle screw perforation rates influenced by registered or unregistered vertebrae in multilevel registration using a CT-based navigation system in the setting of scoliosis? *Eur Spine J.* 2014;23(10):2211-2217. doi: 10.1007/s00586-014-3512-7.

Статья поступила 10.04.2025; одобрена после рецензирования 14.04.2025; принята к публикации 14.10.2025.

The article was submitted 10.04.2025; approved after reviewing 14.04.2025; accepted for publication 14.10.2025.

**Информация об авторах:**

Оксана Германовна Прудникова — доктор медицинских наук, старший научный сотрудник, заведующая отделением, rog6070@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1432-1377>, Author ID: 416145, Scopus AuthorID: 57094937500;

Евгений Александрович Матвеев — врач-нейрохирург, matveeva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6055-4013>;

Маргарита Сергеевна Стребкова — аспирант, Strebkovams@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-2618-6164>;

Алексей Владимирович Евсюков — кандидат медицинских наук, руководитель клиники, alexevsukov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8583-0270>, Author ID: 615954, Scopus AuthorID: 57196004386.

**Information about the authors:**

Oksana G. Prudnikova — Doctor of Medical Sciences, Senior Researcher, Head of Department, rog6070@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1432-1377>, Author ID: 416145, Scopus AuthorID: 57094937500;

Evgeny A. Matveev — neurosurgeon, matveeva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6055-4013>;

Margarita S. Strebkova — postgraduate student, Strebkovams@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-2618-6164>;

Alexey V. Evsyukov — Candidate of Medical Sciences, Head of the Clinic, alexevsukov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8583-0270>, Author ID: 615954, Scopus AuthorID: 57196004386.

**Вклад авторов:**

Прудникова О.Г. — постановка цели и задач исследования, поиск статей, обработка и анализ полученных данных, написание статьи.

Матвеев Е.А. — поиск статей, обработка и анализ полученных данных, оформление статьи.

Стребкова М.С. — поиск статей, обработка и анализ полученных данных, оформление статьи.

Евсюков А.В. — анализ полученных данных, редакция статьи.