На правах рукописи

ПИМБУРСКИЙ ИВАН ПЕТРОВИЧ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ХИРУРГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СКОЛИОЗОВ У ДЕТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАВИГАЦИОННЫХ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

3.1.11. Детская хирургия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Москва 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном учреждении «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Научный руководитель:
доктор медицинских наук, доцент **Олег Борисович Челпаченко**

Официальные оппоненты:
доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры детской хирургии имени академика Ю.Ф. Исакова федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова" Министерства здравоохранения Российской Федерации

Выборнов Дмитрий Юрьевич

доктор медицинских наук, руководитель службы спинальной хирургии акционерного общества «Ильинская больница»,

Млявых Сергей Геннадьевич

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы"

Защита диссертации состоится «__ » _____2026 года в _____часов на заседании диссертационного совета 21.1.026.01 при федеральном государственном автономном учреждении «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации по адресу: 119991, г. Москва, Ломоносовский проспект, 2, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Минздрава России по адресу: 119991, г. Москва, Ломоносовский проспект, 2, стр.1 и на сайте http://www.nczd.ru.

Автореферат разослан « __ » _____ 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор медицинских наук, профессор РАН **Винярская Ирина Валериевна**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Распространённость сколиотических деформаций позвоночника у детей в общей популяции составляет от 0,47% до 5,2% (Marya S. et al., 2022), при этом, примерно 0,2% пациентов нуждаются в хирургическом лечении (Фадеев Е.М. и соавт., 2017). Тяжёлые многоплоскостные деформации позвоночника приводят к развитию сколиотической болезни, что сопровождается нарушениями со стороны внутренних органов и ранней инвалидизацией, снижением продолжительности и качества жизни пациентов (Челпаченко О.Б., 2020). Хирургическое лечение до настоящего времени остаётся единственным эффективным методом коррекции тяжёлых прогрессирующих деформаций, позволяющим восстановить пространственный баланс позвоночника, улучшить функцию органов грудной клетки и предотвратить развитие инвалидизирующих осложнений (Juncker R.B. et al., 2025).

Методом выбора при оперативном лечении сколиозов у детей является задняя полисегментарная фиксация транспедикулярными винтами. Она обеспечивает высокую степень коррекции и стабильную фиксацию позвоночника, по сравнению с крючковыми системами (Ansorge A. et al., 2023; Kwan M.K. et al., 2017; Suk S.I. et al., 2012). Несмотря на преимущества транспедикулярной фиксации, ее применение сопряжено с неврологическими и имплант-ассоциированными рисками осложнений, что в свою очередь, приводит к увеличению частоты ревизионных вмешательств, особенно при нейрогенных сколиозах (Al-Mohrej O.A. et al., 2020; Elmeshneb M.A. et al., 2024; Ollesch B. et al., 2018).

Одной из наиболее частых причин имплант-ассоциированных осложнений является мальпозиция транспедикулярных винтов. По данным литературы, частота мальпозиций при использовании техники «free-hand» составляет от 1,5% до 50,0% (Abul-Kasim K. et al., 2011; Adamski S. et al., 2023; Hicks J.M. et al., 2010; Sakhrekar R. et al., 2024; Samdani A.F. et al., 2010). При этом отсутствует единое мнение относительно того, в каких случаях мальпозиций требуется ревизионное вмешательство, при отсутствии клинических проявлений (Floccari L.V. et al., 2018). Доля мальпозиций, сопровождающихся клинически значимыми осложнениями, по данным литературы, варьирует от 0,2% до 21% (Lieber A.M. et al., 2019; Burger J.A. et al., 2024). Высокие риски осложнений диктуют необходимость совершенствования методов профилактики и повышения точности имплантации, включая КТ-навигацию и аддитивные технологии.

Степень разработанности темы исследования

Несмотря на развитие технологий хирургической коррекции деформаций позвоночника у детей, проблема точной и безопасной имплантации транспедикулярных винтов сохраняет свою актуальность. Публикуемые данные демонстрируют широкий диапазон частоты мальпозиций при использовании техники «free-hand» при различных формах сколиоза (Abul-Kasim K. et al., 2011; Baky F.J. et al., 2019; Ansorge A. et al., 2023; Bjerkreim I. et al., 2007; Hicks J.M. et al., 2010; Stepanovich M. et al., 2015; Sakhrekar R. et al., 2024; Samdani A.F. et al., 2010). Это связано с отсутствием универсальных критериев оценки точности установки и методологической неоднородностью исследований. Рутинный послеоперационный КТ-

контроль применяется не во всех лечебных учреждениях, вследствие чего часть бессимптомных мальпозиций может оставаться недиагностированной (Conrads N. et al., 2023). Встречающиеся в литературе классификации часто опираются преимущественно на величину выхода винта за пределы кортикального слоя, что ограничивает клиническую интерпретацию мальпозиций (Ansorge A. et al., 2023; Floccari L.V. et al., 2018; Sarwahi V. et al., 2016).

Современные технологии повышения точности, КТ-навигация и аддитивные технологии, в большинстве работ позволяют снизить частоту мальпозиций по сравнению с техникой «free-hand» (Jeong S. et al., 2023; Jin M. et al., 2016; Katsumi S. et al., 2025; Lajczak P. et al., 2025; Li C. et al., 2024; Liang W. et al., 2021; Lu S. et al., 2012; Lu C. et al., 2023; Maruo K. et al., 2023). В отечественной литературе представлены данные о применении КТ-навигации, обсуждаются вопросы классификации мальпозиций и лучевой нагрузки, описаны варианты использования навигационных шаблонов у детей, однако сравнительные исследования трёх подходов на сопоставимых по тяжести группах остаются ограниченными (Коваленко Р.А. и соавт., 2020; Кубасов М.В. и соавт., 2023; Косулин А.В. и соавт., 2020; Косулин А.В. и соавт., 2021; Косулин А.В. и соавт., 2022; Косулин А.В. и соавт., 2024; Прудникова О.Г. и соавт., 2025; Тория В.Г. и соавт., 2024). Дополнительно указывается, что КТ-навигация может иметь технически обусловленную погрешность между виртуальным изображением и реальным положением винта (Oertel M.F. et al., 2011).

Таким образом, сохраняются значительные пробелы в стандартизации оценки мальпозиций, определении клинически ориентированных критериев их опасности и пороговых значений клинически значимой перфорации, а также в разработке прогностических моделей риска и алгоритмов принятия решений с учётом данных КТ-контроля, клинических проявлений и интраоперационного нейромониторинга.

Цель исследования

Оптимизация тактики спондилодеза при хирургической коррекции сколиотических деформаций у детей на основе стратификации имплант-ассоциированных рисков.

Задачи исследования

1. Оценить точность имплантации транспедикулярных винтов при использовании стандартной техники «free-hand», сопоставить тяжесть деформации с частотой мальпозиций.
2. Определить роль аддитивных технологий в повышении точности имплантации транспедикулярных винтов и установить взаимосвязь частоты мальпозиций и тяжести деформаций при их применении.
3. Проанализировать результаты внедрения технологии КТ-навигации для обеспечения точной имплантации опорных элементов металлоконструкции и определить влияние исходной тяжести деформации на частоту мальпозиций винтов.
4. Определить параметры мальпозиции педикулярных винтов, ассоциированные с высоким риском неврологических осложнений.
5. Разработать прогностическую модель риска мальпозиции на основе рентгенологических параметров деформации позвоночника и данных детального

анализа точности позиционирования опорных элементов металлоконструкции в группе пациентов «free-hand».

Научная новизна исследования

Впервые выполнен комплексный сравнительный анализ точности установки транспедикулярных винтов с применением «free-hand», КТ-навигации и аддитивных технологий у детей со сколиотическими деформациями.

Предложена клинически ориентированная классификация мальпозиций транспедикулярных винтов, учитывающая тип, глубину и направление перфорации кортикальной пластинки корня дуги позвонка, сторону деформации и локализацию относительно зоны вершины деформации.

Установлены рентгенологические параметры деформации, ассоциированные с повышенным риском мальпозиции педикулярных винтов, определены пороговые значения глубины медиальной перфорации кортикальной пластинки корня дуги позвонка, ассоциированные с высоким риском неврологических осложнений.

Впервые разработана прогностическая модель риска мальпозиций опорных элементов металлоконструкции, основанная на параметрах деформации позвоночника и данных детального анализа эффективности «free-hand» техники.

Сформирован клинический алгоритм принятия решений при различных типах мальпозиций, позволяющий объективизировать выбор тактики при обнаружении медиальных, латеральных и передних мальпозиций винтов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Предложенная классификация мальпозиций транспедикулярных винтов позволяет стандартизировать оценку точности установки винтов при хирургической коррекции сколиотических деформаций у детей.

Определённые пороговые значения глубины медиальной перфорации, ассоциированные с высоким риском неврологических осложнений, могут использоваться как объективные критерии безопасности при послеоперационной оценке положения винтов.

Выявленные факторы риска мальпозиций транспедикулярных винтов, среди которых: угол сколиотической дуги, ротация апикального позвонка и расположение винтов на вогнутой стороне деформации, позволяют обоснованно выбирать технологию имплантации опорных элементов металлоконструкции («free-hand», КТ-навигация, аддитивные технологии) в зависимости от тяжести деформации позвоночника.

Разработанная прогностическая модель риска мальпозиций может применяться при предоперационном планировании для стратификации пациентов по уровню риска и оптимизации хирургической тактики. Это позволяет оперирующему хирургу вертебрологу спланировать компоновку металлоконструкции, избегая зон повышенного риска мальпозиции винтов.

Алгоритм принятия решений при выявлении различных типов мальпозиций обеспечивает дифференцированный подход к решению вопроса о необходимости

реимплантации винтов, в зависимости от направления и степени выявленной перфорации кортикальной пластинки корня дуги позвонка винтом, а также с учетом показателей нейрофизиологического мониторинга.

Внедрение результатов исследования в практику

Результаты работы внедрены в клиническую практику нейроортопедического отделения с ортопедией федерального государственного автономного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации (далее – ФГАУ «НМИЦ здоровья детей» Минздрава России); в клиническую практику ортопедического отделения государственного автономного учреждения здравоохранения «Оренбургский областной клинический центр хирургии и травматологии»; в клиническую практику травматолого-ортопедического отделения государственного бюджетного учреждения здравоохранения города Москвы «Детская городская клиническая больница имени З.А. Башляевой Департамента здравоохранения города Москвы»; в педагогическую практику кафедры детской хирургии с курсом анестезиологии и реаниматологии Института подготовки медицинских кадров ФГАУ «НМИЦ здоровья детей»; в педагогическую практику кафедры травматологии и ортопедии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Методология и методы исследования

Пациенты распределены на три группы в зависимости от техники установки транспедикулярных винтов: контрольная группа «free-hand» (n = 45), группа аддитивных технологий с использованием индивидуальных 3D-печатных моделей позвоночника (n = 30) и группа интраоперационной КТ-навигации (n = 45).

Всем пациентам выполняли комплексное лучевое обследование, включавшее рентгенографию позвоночника в прямой и боковой проекциях с оценкой деформации по Cobb до и после операции, а также компьютерную томографию: предоперационно для анализа анатомических параметров, потенциально влияющих на риск мальпозиций, и послеоперационно для объективной оценки положения винтов, верификации и классификации мальпозиций. В основу исследования положен анализ частоты, характера и клинической значимости мальпозиций транспедикулярных винтов, структуры осложнений, а также факторов риска мальпозиций по данным предоперационных лучевых исследований.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Внедрение аддитивных и КТ-навигационных технологий в сочетании с интраоперационным нейрофизиологическим мониторингом позволяет существенно повысить уровень безопасности выполнения хирургической коррекции сколиозов у детей.

2. С увеличением фронтального наклона и ротации позвонков, включенных в сколиотическую дугу, значительно повышается риск мальпозиций педикулярных винтов. При этом, медиальные мальпозиции более 4 мм по вогнутой стороне на вершине деформации существенно повышают риск неврологических осложнений

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов диссертационной работы определяется использованием достаточного количества наблюдений, современных методик исследования и методов статистической обработки полученных результатов.

Личное участие диссертанта

Автор непосредственно участвовал в организации и исполнении исследования: при формулировании цели и задач работы, разработке методических подходов, наборе клинического материала, проведении оперативных вмешательств и катамнестическом наблюдении пациентов, статистической обработке, анализе и интерпретации полученных данных.

Публикации

По теме диссертации и результатам исследования опубликовано 11 научных работ (6 статей, 5 тезисов), 6 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 2 публикации в журналах, индексируемых в SCOPUS. Тезисы опубликованы в сборниках научных форумов и конференций.

Апробация работы

Материалы диссертационного исследования доложены и обсуждены на V Научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Студеникинские чтения-2023», Москва, 6 декабря 2023 г.; III Международной научно-практической конференции «От фундаментальных знаний к тонкому владению скальпелем», Курск, 4–5 июня 2024 г.; VI Всероссийском педиатрическом форуме с международным участием «Виртуоз педиатрии», Москва, 20–24 мая 2024 г.; Форуме «Медицина на страже здоровья детей и подростков», Москва, 31 мая – 1 июня 2024 г.; II Съезде травматологов-ортопедов Приволжского федерального округа, Чебоксары, 20–21 июня 2024 г.; VI Научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Студеникинские чтения», Москва, 4 декабря 2024 г.; XV Научно-практической конференции с международным участием «Детская медицина – 12 шагов в будущее», Москва, 22–24 апреля 2025 г.; XIII Форуме «Неотложная детская хирургия и травматология», Москва, 19–21 февраля 2025 г.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на русском языке в объеме 140 страниц машинописного текста и состоит из введения, обзора литературы, главы с описанием материалов и методов исследования, четырех глав собственных наблюдений и клинических примеров, заключения, выводов и практических рекомендаций. Работа иллюстрирована 1 таблицей и 55 рисунками.

Список использованной литературы включает 161 источник: 16 отечественных и 145 зарубежных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено на базе нейроортопедического отделения с ортопедией ФГАУ «НМИЦ здоровья детей» Минздрава России; часть пациентов I группы была набрана на базе 7 отделения (патологии позвоночника) ФГБУ «НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова» Минздрава России согласно соглашению о научно-практическом сотрудничестве. Проанализированы результаты хирургического лечения 120 детей со сколиотическими деформациями грудного и поясничного отделов позвоночника, которым выполнялась коррекция деформации с применением транспедикулярной фиксации в период 2010-2025 гг. Всего оценены результаты имплантации 2193 транспедикулярных винтов. Средний срок наблюдения составил 32±3 месяца.

Согласно дизайну двунаправленного исследования, представленному на рис. 2, включавшему ретроспективный и проспективный этапы, пациенты были распределены на 3 группы в зависимости от применяемой технологии имплантации винтов: контрольная группа «free-hand» (n=45), группа I – аддитивных технологий (n=30), группа II – КТ-навигации (n=45). Всего в группах имплантировано 696, 572 и 925 винтов соответственно. Операции во всех группах выполнялись опытными спинальными хирургами со стажем более 20 лет, что позволяло минимизировать влияние «кривой обучения» на точность имплантации.

В контрольной группе пациенты женского пола составили 73,3% (n=33), мужского пола 26,7% (n=12). В группе аддитивных технологий доля пациентов женского пола составила 73,3% (n=22), мужского пола 26,7% (n=8). В группе КТ-навигации пациенты женского пола составили 53,3% (n=24), мужского пола 46,7% (n=21). Статистически значимых различий по полу между группами не выявлено (**рис. 1**, p=0,082).

По этиологии деформации **(рис. 1)** во всех группах преобладал идиопатический сколиоз: 71,1% (n=32) в контрольной группе, 80,0% (n=24) в группе аддитивных технологий и 71,1% (n=32) в группе КТ-навигации. Нейрогенные формы составили 24,4% (n=11), 20,0% (n=6) и 28,9% (n=13) соответственно. Врожденные формы были представлены только в контрольной группе (4,4%, n=2). Статистически значимых различий по этиологической структуре между группами не выявлено (p=0,386).

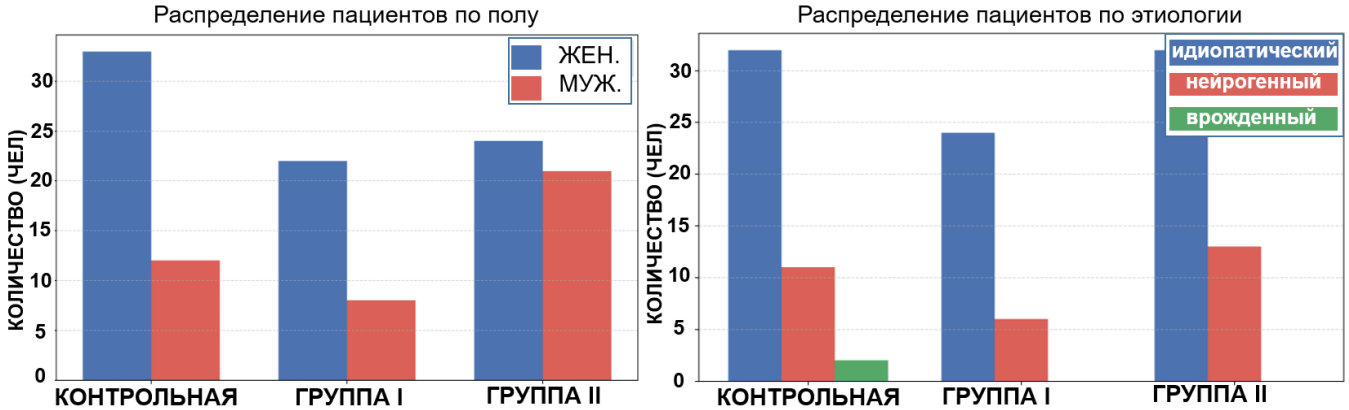


Рисунок 1. Распределение пациентов по полу и по этиологии деформации

Медианный возраст пациентов в контрольной группе составил 14,0 [12,0; 16,0] лет, в группе аддитивных технологий 16,0 [12,0; 17,0] лет, в группе КТ-навигации 14,0 [13,0; 16,75] лет. Достоверных различий по возрасту между группами не выявлено (p=0,583).

Всем пациентам выполняли комплексное предоперационное обследование (клинический осмотр, МРТ, КТ, рентгенография позвоночника в прямой и боковой проекциях). Дооперационная КТ использовалась для детальной оценки анатомии и параметров, потенциально влияющих на риск мальпозиций. Послеоперационная КТ выполнялась для верификации мальпозиций и их классификации. В контрольной группе дополнительно проведён углубленный анализ параметров каждого инструментированного позвонка, включая фронтальный наклон, сагиттальный наклон и ротацию, а также топографию уровня относительно вершины дуги и сторону (вогнутая или выпуклая).

По данным послеоперационной КТ для каждого винта регистрировали направление отклонения, величину выхода за пределы кортикального слоя (в мм), уровень фиксации и сторону относительно деформации (вогнутая или выпуклая). Направление отклонения классифицировали как медиальная мальпозиция (ММ), латеральная мальпозиция (ЛМ) и передняя мальпозиция (ПМ).



Рисунок 2. Дизайн исследования

Клиническую значимость положения винтов оценивали по классификации Sarwahi et al. (2016) с русскоязычной клинической привязкой категорий: точное положение (ТП), незначительная мальпозиция (НМ), сомнительная мальпозиция (СМ) и опасная мальпозиция (ОМ). ТП соответствовало полному внутрикостному положению винта без перфорации кортикального слоя. НМ фиксировали при наличии перфорации кортикального слоя без угрозы критически важным анатомическим образованиям по данным КТ. СМ определяли при медиальной перфорации от 2 до 4 мм, либо при латеральном или переднем отклонении при

сохранении расстояния от 1 до 2 мм до структур риска (легкие, плевра, аорта и т.д.). ОМ определяли при медиальной перфорации более 4 мм, либо при латеральном или переднем отклонении при расстоянии менее 1 мм до структур риска.

Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг применялся для обеспечения безопасности вмешательства; основным методом являлись транскраниальные моторные вызванные потенциалы, критерием тревоги считали снижение амплитуды более чем на 50-80% или полную утрату ответа.

Критерии включения детей в исследование: сколиотическая деформация грудного и поясничного отделов позвоночника, требующая оперативного лечения; неэффективность консервативного лечения; отсутствие противопоказаний к хирургической коррекции.

Критерии невключения: отсутствие послеоперационной рентгенологической картины; тяжёлое соматическое состояние, не позволяющее выполнить оперативное лечение.

Во всех группах выполняли задний доступ, коррекцию сколиотической деформации и полисегментарную фиксацию позвоночника транспедикулярными винтами с последующей установкой стержней и выполнением стандартных корригирующих манёвров.

В группе «free-hand» имплантацию винтов выполняли по анатомическим ориентирам методом инструментальной пальпации. В группе аддитивных технологий предоперационно по данным КТ строили трёхмерную реконструкцию позвоночника и изготавливали индивидуальную 3D-модель в масштабе 1:1, которую использовали для пространственного анализа деформации, планирования уровней фиксации и оптимальных траекторий винтов, а также для интраоперационной ориентировки. В группе КТ-навигации имплантацию транспедикулярных винтов выполняли под контролем интраоперационной КТ и навигационной системы с визуализацией положения инструмента относительно анатомических структур в трёх плоскостях, что позволяло уточнять траекторию и глубину установки на этапах формирования канала и введения винта.

Статистические методы исследования

Статистический анализ проводился с использованием программы StatTech v. 4.9.2 (разработчик - ООО "Статтех", Россия). Нормальность распределения количественных данных оценивали критерием Шапиро-Уилка (n <50) или Колмогорова-Смирнова (n>50). При нормальном распределении показатели представляли как M±SD с 95% ДИ, при ненормальном как Me [Q1; Q3]. Категориальные данные приводили в абсолютных значениях и процентах, 95% ДИ для долей рассчитывали по методу Клоппера-Пирсона.

Для сравнения двух независимых групп при ненормальном распределении использовали U-критерий Манна-Уитни, корреляционные связи оценивали по коэффициенту Спирмена. Для сравнения трёх и более групп применяли критерий Краскела-Уоллиса с апостериорными сравнениями по Данну с поправкой Холма. Для анализа таблиц сопряжённости использовали критерий хи-квадрат Пирсона, апостериорные сравнения выполняли с поправкой Холма. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Прогностическую модель вероятности исхода строили методом логистической регрессии, качество модели оценивали по R^2 Найджелкерка. Дискриминационную способность признаков оценивали ROC-анализом, значение «cut-off» определяли по максимальному индексу Юдена.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ эффективности и безопасности технологии «free-hand»

В контрольной группе медиана исходного угла сколиотической дуги по Cobb составила 69° [61°; 93°], после операции 28 ± 12°, средняя коррекция 59% (p<0,001). Медиана ротации апикального позвонка составила 25° [19°; 35°], максимум 56°.

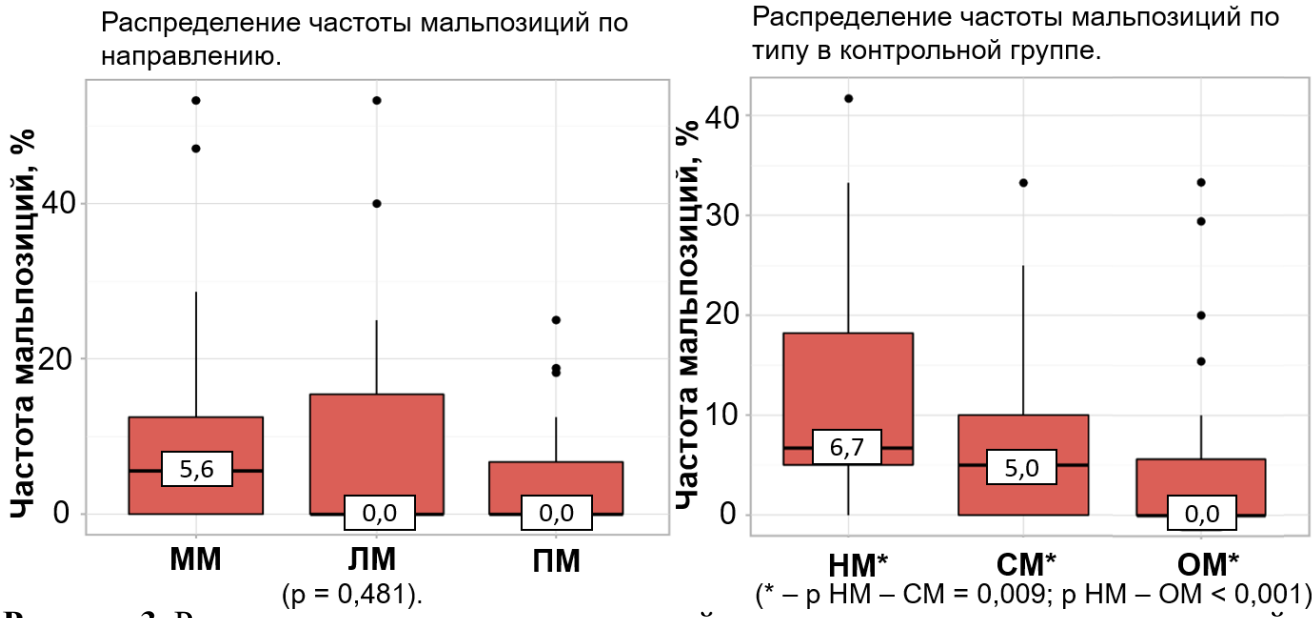


Рисунок 3. Распределение частоты мальпозиций по типу и направлению в контрольной группе

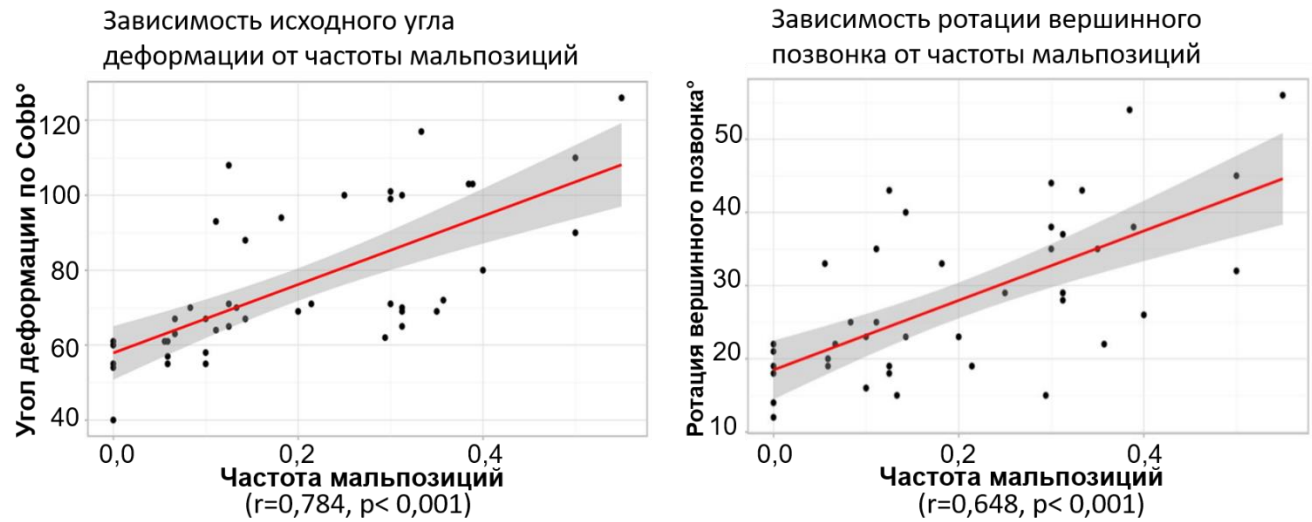


Рисунок 4. Графики регрессионной функции, характеризующие зависимость исходного угла деформации и ротации вершинного позвонка от частоты мальпозиций в контрольной группе

Установлено 696 транспедикулярных винтов (15,47 ± 4,12 на пациента). По данным послеоперационной КТ выявлены 148 мальпозиций (21,3%). По типу: НМ - 10,8%, СМ - 6,6%, ОМ - 3,9%. По направлению: ММ 9,2%, ЛМ 7,6%, ПМ 4,5%; различий по направлению не выявлено (p=0,481), распределение представлено на **рис. 3**.

Выполнено 3 ревизионных вмешательства (6,7% пациентов), в связи с прилеганием винта к аорте без клинических сосудистых осложнений. Зафиксировано 2 неврологических осложнения (4,4% пациентов), ассоциированных с медиальной мальпозицией.

Установлены корреляции: сильная прямая связь между исходным углом основной дуги и частотой мальпозиций (**рис. 4**, r=0,784, p<0,001), а также прямая связь между ротацией апикального позвонка и частотой мальпозиций (**рис. 4**, r=0,648, p<0,001).

Углублённый анализ по уровням инструментации показал, что максимальная частота мальпозиций наблюдается в верхнегрудном отделе (Th3-Th6). На уровне Th3 отмечено до 26,4% всех латеральных перфораций, преимущественно НМ, что связано с узостью и асимметрией ножек дуг. В этой же зоне зарегистрирована наибольшая доля ОМ. Медиальные мальпозиции чаще локализовались в апикальной зоне и возрастали с увеличением ротации (p<0,001), при увеличении фронтального наклона возрастала частота латеральных мальпозиций (p<0,001), что продемонстрировано на **рис. 5**; наличие мальпозиции ассоциировалось с фронтальным наклоном (p<0,001) и ротацией инструментируемого позвонка (p<0,001).

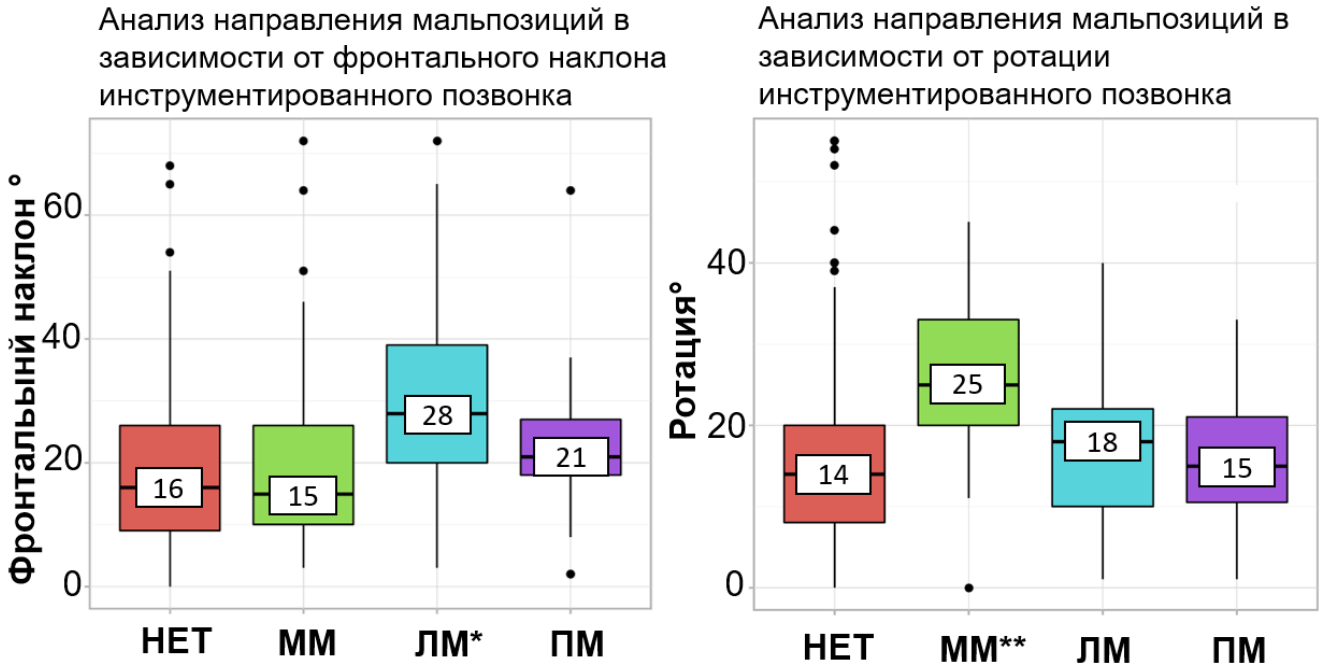


Рисунок 5. Зависимость направления мальпозиций от ротации и фронтального наклона вершинного позвонка в контрольной группе (* – p ЛМ – нет мальпозиции = 0,039; ** – p ММ – нет мальпозиции <0,001; p ЛМ – ММ <0,001; p ПМ – ММ <0,001)

Анализ эффективности внедрения аддитивных технологий

В I группу включены 30 пациентов. Медиана исходного угла основной дуги по Cobb составила 86,5° [77,5°; 113,5°], после операции 53,5° [37°; 73°], средняя коррекция 40,3% (p<0,001). Ротация апикального позвонка была выраженной: медиана 31,5° [25,5°; 46,5°], максимум 87°.

Всего установлено 572 транспедикулярных винта (19,07 ± 2,55 на пациента). По данным послеоперационной КТ выявлено 35 мальпозиций (6,1%). По типу **(рис.6):** НМ - 4,3%, СМ - 1,6%, ОМ - 0,1%; различия между категориями статистически значимы (p<0,001). По

направлению перфорации **(рис.6)**: ЛМ 3,2%, ММ 2,6%, ПМ 0,3%; различия по направлениям также статистически значимы (p<0,05).

Корреляционный анализ показал умеренную связь частоты мальпозиций с исходным углом основной дуги (r=0,419, p<0,05) и более выраженную связь с ротацией апикального позвонка (r=0,573, p<0,001), что продемонстрировано на **рис. 7.**

Таким образом, применение аддитивных технологий обеспечило низкую общую частоту мальпозиций (6,1%) даже при исходно тяжёлых деформациях и выраженной ротации. Большинство мальпозиций относились к НМ и СМ, доля ОМ была минимальной (0,1%), при этом передние перфорации встречались единично (0,3%).

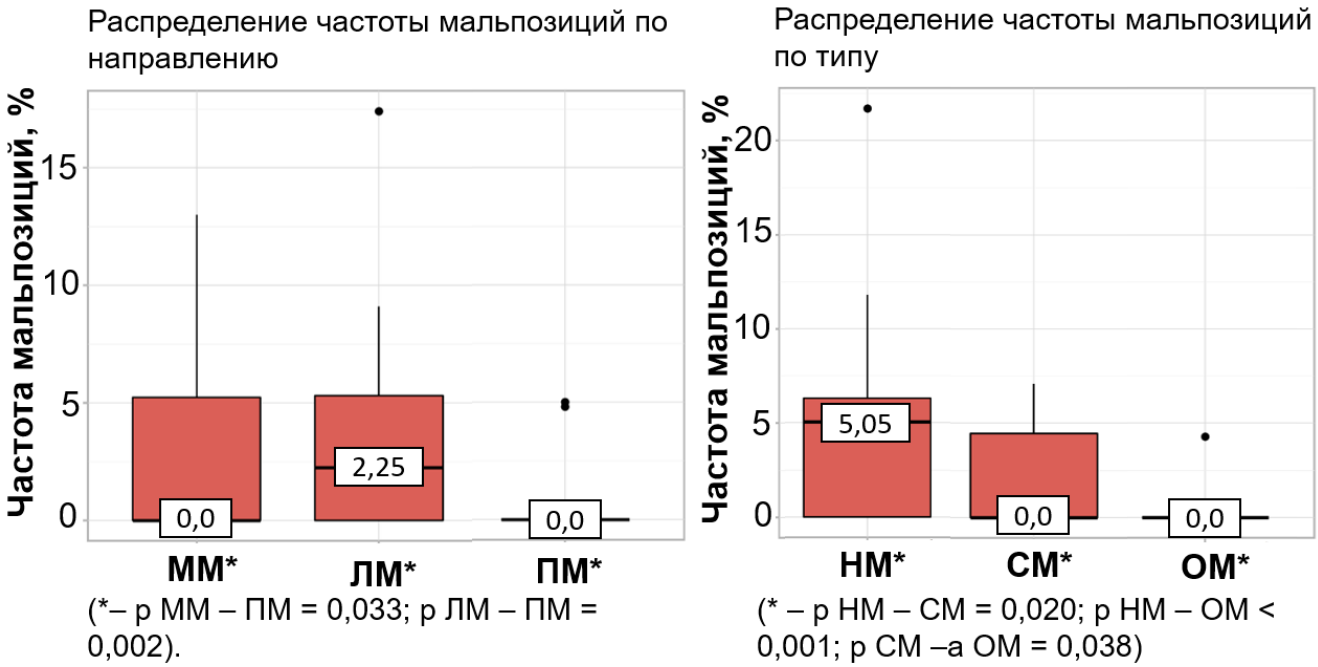


Рисунок 6. Распределение частоты мальпозиций по типу и направлению в I группе

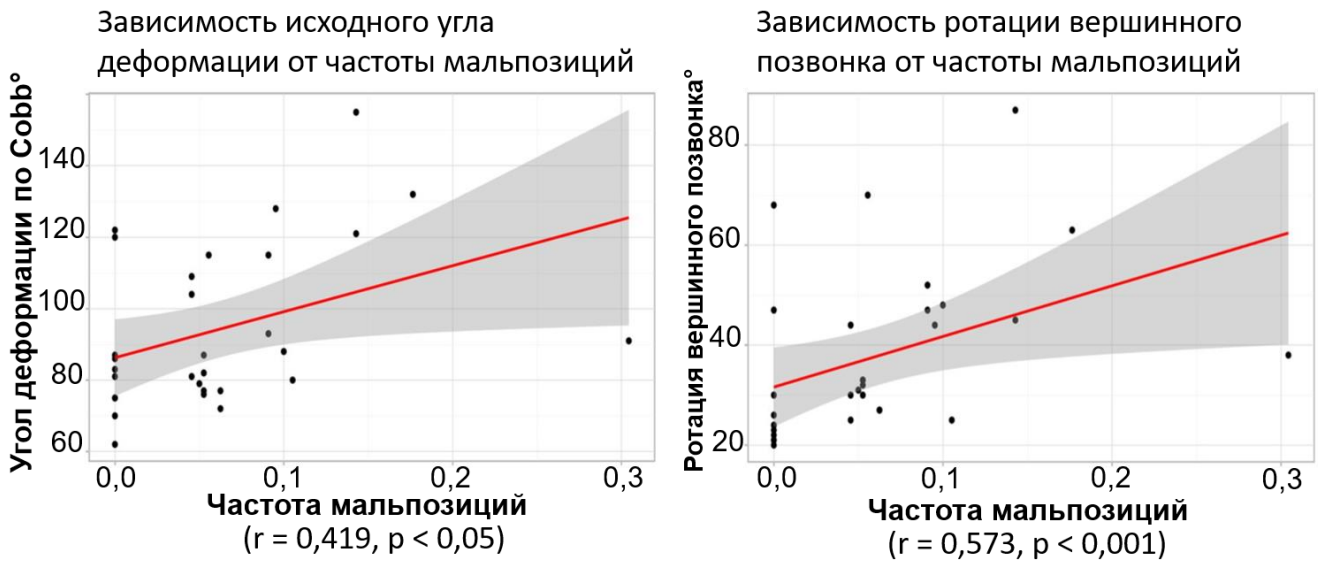


Рисунок 7. Графики регрессионной функции, характеризующие зависимость исходного угла деформации и ротации вершинного позвонка от частоты мальпозиций в I группе

Анализ эффективности КТ-навигации

Во II группу включены 45 пациентов. Медиана исходного угла основной дуги по Cobb составила 87° [68°; 113°], после операции 34° [21°; 52°], средняя коррекция 57,5% (p<0,001). Ротация апикального позвонка была выраженной: 37,71 ± 14,55°, максимум 61°.

Имплантировано 925 транспедикулярных винтов (20,56 ± 5,79 на пациента). По данным послеоперационной КТ выявлено 46 мальпозиций (4,97%). По типу **(рис.8)**: НМ - 3,8%, СМ - 1,2%, ОМ - 0,1%; распределение статистически неоднородно (p<0,001). По направлению **(рис.8)**: ММ - 2,3%, ЛМ - 2,3%, ПМ - 0,4%; различия по направлениям статистически значимы (p<0,001).

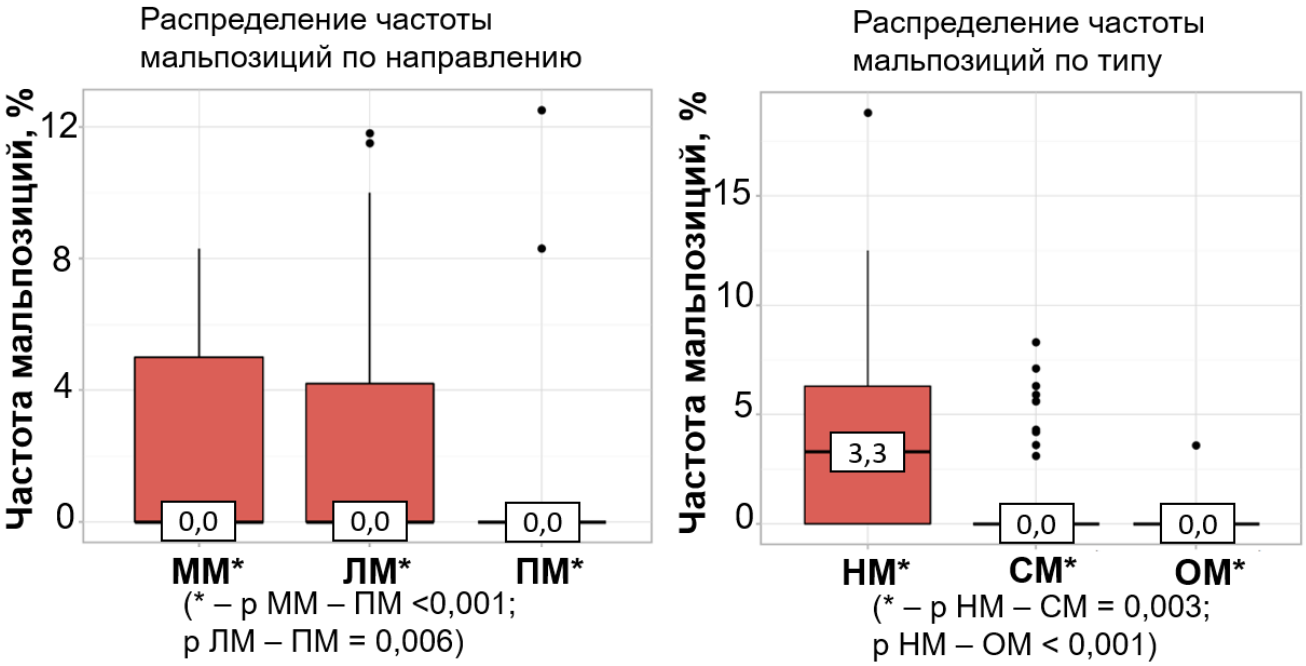


Рисунок 8. Распределение частоты мальпозиций по типу и направлению во II группе

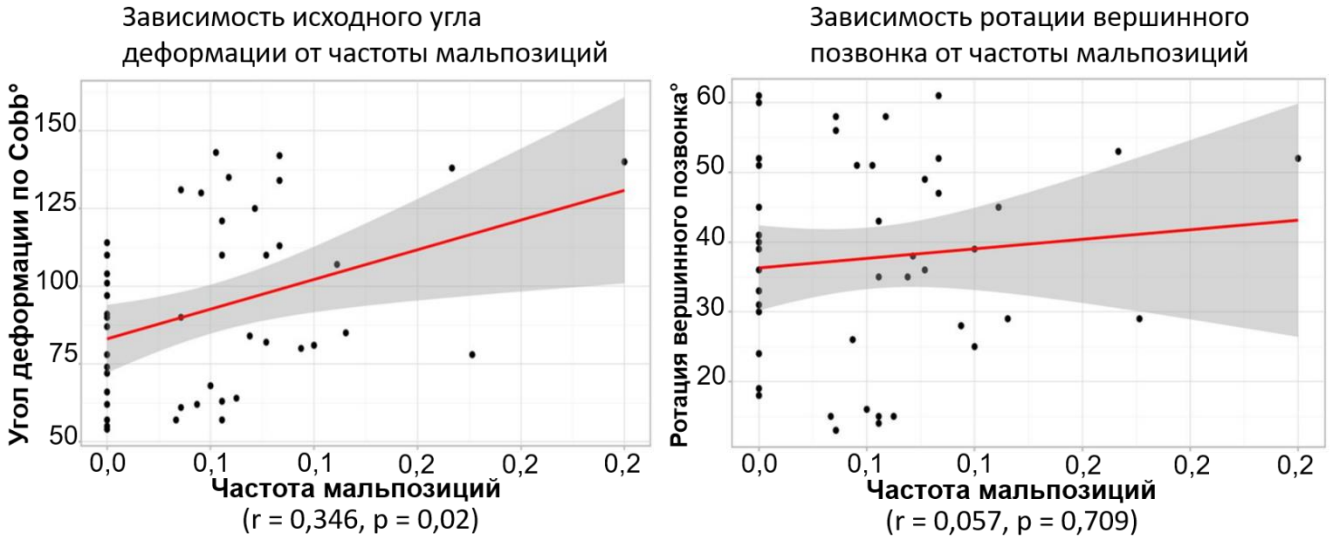


Рисунок 9. Графики регрессионной функции, характеризующие зависимость исходного угла деформации и ротации вершинного позвонка от частоты мальпозиций во II группе

Корреляционный анализ (**рис. 9**) показал умеренную прямую связь между исходным углом основной дуги и частотой мальпозиций (r=0,346, p=0,02). Влияние ротации апикального позвонка оказалось статистически незначимым (r=0,057, p=0,709).

Таким образом, применение КТ-навигации обеспечило высокую точность имплантации ТПВ при выраженных деформациях. Общая частота мальпозиций составила 4,97% и преимущественно была представлена НМ и СМ, доля ОМ составила 0,1%. Отсутствие связи с ротацией апикального позвонка указывает на то, что навигация нивелирует влияние ротационного смещения анатомических ориентиров на точность имплантации.

Сравнительный анализ эффективности и безопасности различных технологий имплантации транспедикулярных винтов

Сравнение техники «free-hand», аддитивных технологий и КТ-навигации выявило выраженные различия в частоте мальпозиций, что представлено в **таб. 1**.

Таблица 1. Сравнительный анализ различных технологий имплантации транспедикулярных винтов.

Показатели	Группа пациентов			p
	контрольная группа	группа I	группа II	
Cobb до, Me [IQR]	69,00 [61,70; 93,00]	86,50 [77,50; 113,50]	87,00 [68,00; 113,00]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} = 0{,}001$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} = 0{,}003$
Cobb после, Me [IQR]	28,00 [20,00; 33,00]	53,50 [37,00; 73,00]	34,00 [21,00; 52,00]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} < 0{,}001$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} = 0{,}018$ $p_{\text{группа II – группа I}} = 0{,}001$
N винтов, M (SD)	15,47 (4,12)	19,07 (2,55)	20,56 (5,79)	$p_{\text{контрольная группа – группа I}} < 0{,}001$ $p_{\text{контрольная группа – группа II}} < 0{,}001$
частота мальпозиций, Me [IQR]	0,14 [0,07; 0,31]	0,05 [0,00; 0,09]	0,05 [0,00; 0,08]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} < 0{,}001$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} < 0{,}001$
Частота НМ, Me [IQR]	0,07 [0,05; 0,18]	0,05 [0,00; 0,06]	0,03 [0,00; 0,06]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} = 0{,}004$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} < 0{,}001$
Частота СМ, Me [IQR]	0,05 [0,00; 0,10]	0,00 [0,00; 0,04]	0,00 [0,00; 0,00]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} = 0{,}008$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} < 0{,}001$
Частота ОМ, Me [IQR]	0,00 [0,00; 0,06]	0,00 [0,00; 0,00]	0,00 [0,00; 0,00]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} < 0{,}001$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} < 0{,}001$
Частота медиальных, Me [IQR]	0,06 [0,00; 0,12]	0,00 [0,00; 0,05]	0,00 [0,00; 0,05]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} = 0{,}034$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} = 0{,}034$
Частота латеральных, Me [IQR]	0,00 [0,00; 0,15]	0,02 [0,00; 0,05]	0,00 [0,00; 0,04]	0,301
Частота передних, Me [IQR]	0,00 [0,00; 0,07]	0,00 [0,00; 0,00]	0,00 [0,00; 0,00]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} < 0{,}001$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} < 0{,}001$
ротация вершинного позвонка , Me [IQR]	25,00 [19,30; 35,00]	31,50 [25,25; 46,50]	38,00 [28,00; 51,00]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} = 0{,}014$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} = 0{,}002$

Общая частота мальпозиций статистически значимо различалась между группами ($p<0{,}001$): наибольшее число перфораций отмечено в контрольной группе (21,3%), тогда как при

применении аддитивных технологий и КТ-навигации частота мальпозиций была существенно ниже (6,1% и 4,97% соответственно). Различия между группами сохранялись при анализе частоты незначительных, сомнительных и опасных мальпозиций ($p<0,001$), а также при анализе направлений перфораций ($p<0,001$).

При прямом сравнении КТ-навигации и аддитивных технологий статистически значимых различий не выявлено ни по общей частоте мальпозиций, ни по отдельным типам или направлениям перфораций ($p>0,05$ для всех показателей), что указывает на сопоставимо высокую точность обеих технологий.

Корреляционный анализ показал различия в степени влияния параметров деформации на точность имплантации. В контрольной группе отмечена сильная зависимость частоты мальпозиций от исходного угла основной дуги и ротации апикального позвонка ($p<0,001$). В группе аддитивных технологий выраженность этих зависимостей снижалась, однако влияние угла деформации и ротации сохранялось. В группе КТ-навигации влияние ротации отсутствовало, а связь с величиной деформации была минимальной и существенно слабее, чем в остальных группах. Таким образом, обе современные технологии обеспечивают статистически значимое снижение частоты мальпозиций по сравнению с «free-hand», при этом КТ-навигация демонстрирует наименьшую зависимость от анатомических условий и параметров деформации позвоночника.

Клинические случаи неврологических осложнений, ассоциированных с медиальной мальпозицией



Рисунок 10. Клинический пример 1. А – внешний вид до оперативного лечения; Б – рентгенография до оперативного лечения, показаны критические мальпозиции на уровнях Th11 и L3; В – внешний вид после 1 этапа; Г – рентгенография после 1 этапа. Д – внешний вид после 2 этапа; Ж – рентгенография после 2 этапа

Неврологические осложнения при транспедикулярной фиксации при сколиотических деформациях встречаются относительно редко, однако именно они определяют наиболее тяжёлые последствия медиальной мальпозиции транспедикулярных винтов. Для иллюстрации клинических сценариев, в которых медиальная перфорация приводит к неврологическому дефициту, проанализированы два клинических наблюдения.

Клинический пример 1 **(рис. 10)**. Пациентка 15 лет с идиопатическим сколиозом IV степени. Исходная величина основной дуги по Cobb 103°, ротация вершинного позвонка 54°. Выполнено двухэтапное лечение: на первом этапе многоуровневая дискэктомия на вершине

деформации с межтеловым спондилодезом и гало-тракцией, без неврологических осложнений. На втором этапе выполнена задняя коррекция и фиксация с имплантацией транспедикулярных винтов техникой «free-hand». После операции развилась клиника миелопатии с нижним вялым парапарезом, чувствительными нарушениями и дисфункцией тазовых органов. По данным послеоперационной КТ выявлены критические медиальные мальпозиции на уровнях Th11 и L3, при этом винт на L3 располагался по вогнутой стороне непосредственно ниже вершины основной дуги (L2), то есть в зоне максимальной ротации. Выполнена ревизия с уменьшением дистракции и переустановкой винтов Th11 и L3. В течение 3 месяцев отмечен полный регресс двигательных и чувствительных нарушений и нормализация функции тазовых органов.

Клинический пример 2. Пациент 17 лет с нейрогенным грудопоясничным сколиозом IV степени. Первичная операция выполнена вне специализированного центра без применения навигации и нейромониторинга. После вмешательства сформировался стойкий неврологический дефицит (нижний правосторонний вялый парапарез), болевой синдром и усугубление нейрогенной дисфункции мочевого пузыря. По данным КТ в условиях сформировавшегося спондилодеза выявлены критические мальпозиции транспедикулярных винтов, представленные на **рис. 11**.

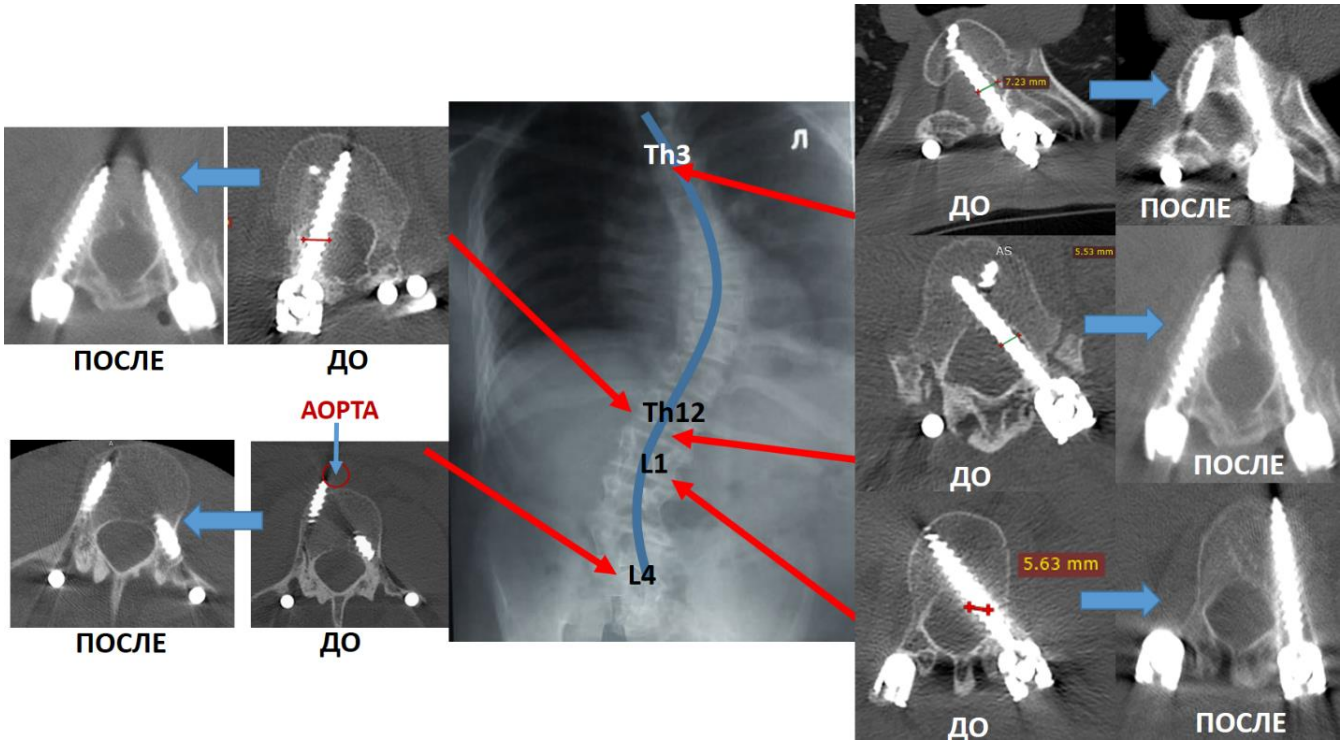


Рисунок 11. Критические мальпозиции в клиническом примере 2

Ревизионная операция выполнена с применением интраоперационной КТ-навигации, что позволило безопасно реимплантировать винты в условиях отсутствия стандартных анатомических ориентиров. Существенной положительной динамики неврологического статуса в течение года после ревизии не отмечено, что косвенно указывает на стойкий характер поражения и позднее устранение повреждающего фактора.

Таким образом, клинические наблюдения демонстрируют, что неврологически значимые осложнения ассоциируются с медиальными перфорациями большой глубины, особенно при локализации по вогнутой стороне дуги, преимущественно в апикальной зоне и парагиббарных отделах, а также на фоне тяжёлых и нейромышечных форм сколиоза.

Анализ пороговых значений глубины медиальной перфорации как предиктора неврологического дефицита

Одной из задач исследования была оценка взаимосвязи между глубиной медиальной перфорации винта и риском неврологических осложнений. Проведение классического ROC-анализа в настоящем исследовании оказалось статистически некорректным из-за малого числа клинических событий: зарегистрировано 2 случая неврологического дефицита, ассоциированного с медиальной мальпозицией. При столь малом числе положительных исходов расчёт AUC и параметров cut-off становится неустойчивым и чувствительным к минимальным изменениям выборки.

В связи с этим применён пороговый анализ методом прямого перебора всех значений глубины медиальной перфорации, представленных в выборке, с расчётом чувствительности и специфичности относительно двух клинических случаев. У большинства пациентов глубина медиальной перфорации не превышала 3-3,5 мм и не сопровождалась неврологическими нарушениями. Оба случая неврологического дефицита ассоциировались с выраженными медиальными перфорациями глубиной 5,5 мм и 7,4 мм. При пороговом значении 5-6 мм чувствительность составила 100%, поскольку оба осложнения превышали данную границу; при повышении порога до 7 мм чувствительность снижалась до 50%, так как один из двух случаев имел перфорацию 5,5 мм.

Дополнительным фактором риска являлась топография перфорации. Оба осложнения отмечены при медиальной перфорации по вогнутой стороне дуги; один случай был связан с апикальной зоной деформации. В рамках выборки медиальные перфорации меньшей глубины и перфорации по выпуклой стороне не сопровождались неврологическим дефицитом.

Таким образом, результаты порогового анализа указывают на тенденцию: в данной выборке неврологический дефицит возникал только при медиальных перфорациях не менее 5,5 мм, при этом по вогнутой стороне и в анатомически уязвимых зонах. На основании полученных данных сформулирована практическая позиция: медиальные перфорации 5-6 мм и более, особенно по вогнутой стороне и в пределах центрального угла сколиотической дуги, следует рассматривать как потенциально опасные и требующие интраоперационной коррекции либо раннего послеоперационного контроля с решением вопроса о ревизии.

Прогностическая модель риска мальпозиций

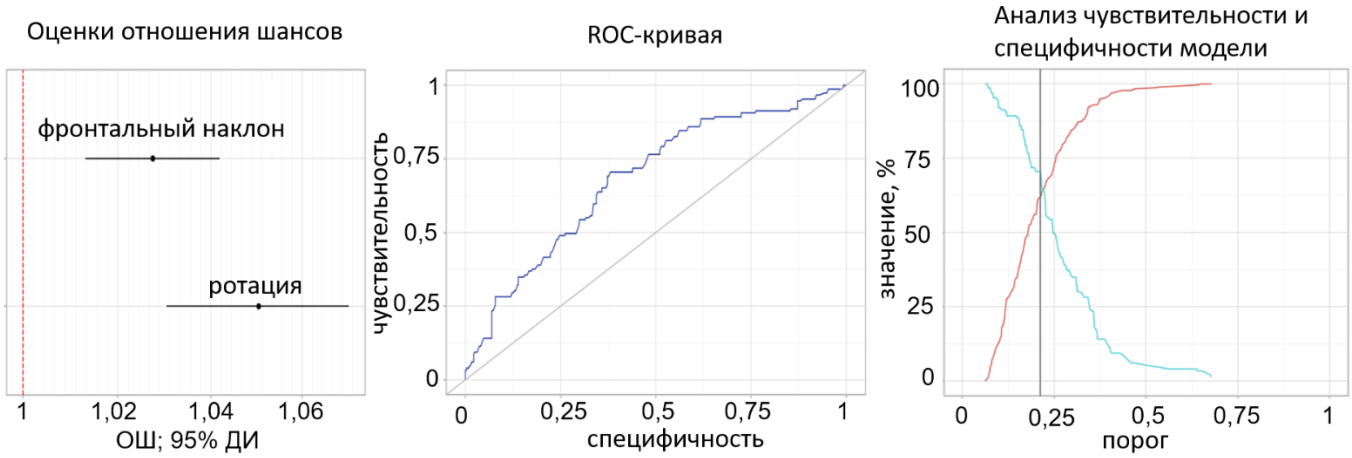


Рисунок 12. Прогностическая модель риска мальпозиций

Результаты исследования показали, что риск мальпозиции при использовании техники «free-hand» имеет воспроизводимую зависимость от объективных рентгенологических характеристик деформации. Это послужило основанием для разработки прогностического инструмента, позволяющего количественно оценить вероятность мальпозиции на уровне каждого инструментируемого позвонка.

С этой целью построена бинарная логистическая регрессионная модель **(рис. 12)**, включавшая фронтальный наклон и ротацию инструментируемого позвонка. Оба параметра оказали статистически значимое влияние на вероятность мальпозиции, при этом наибольший вклад вносила ротация. Увеличение фронтального наклона на 1° повышало шансы мальпозиции на 2,7% (ОШ 1,027; 95% ДИ 1,013-1,042), увеличение ротации на 1° повышало шансы на 5,0% (ОШ 1,050; 95% ДИ 1,030-1,070). Модель статистически значима ($p<0,001$), псевдо-R^2 Найджелкерка составил 10,3%.

Диагностическую способность модели оценивали с помощью ROC-анализа. Площадь под ROC-кривой составила AUC=0,682 (95% ДИ 0,631-0,733; $p<0,001$), что соответствует умеренной дискриминационной способности. Оптимальное пороговое значение вероятности (cut-off), определённое по индексу Юдена, составило P=0,212, при котором чувствительность модели была 70,5%, а специфичность 62,5%. Таким образом, вероятность мальпозиции 0,20 и более может рассматриваться как практический ориентир при планировании и выборе технологии имплантации.

Интерпретация «cut-off» показала, что достижение $P\geq0,212$ характерно для сочетаний фронтального наклона и ротации инструментируемого позвонка порядка 20° и более на одном уровне. Наиболее неблагоприятной является ситуация одновременного повышения фронтального наклона и ротации до 20° и более, что формирует существенно повышенный риск неточной установки винта при технике «free-hand». Такие уровни требуют особого внимания на этапе предоперационного планирования и могут рассматриваться как показание к применению навигационных методов установки винтов либо к выбору альтернативных вариантов фиксации.

Таким образом, разработанная модель позволила количественно оценить вклад фронтального наклона и ротации в риск мальпозиции при «free-hand» технике и выделить практические пороговые ориентиры, применимые для стратификации риска и обоснования выбора технологии имплантации при хирургической коррекции сколиоза у детей.

Оценка риска неврологических осложнений

Результаты исследования показали, что в представленной выборке клинически выраженные неврологические осложнения наблюдались только при медиальных перфорациях более 5 мм, локализованных по вогнутой стороне дуги и в анатомически уязвимой зоне. Вместе с тем данный порог следует рассматривать как порог реализации осложнений в собственной серии наблюдений, а не как универсальную границу безопасности.

С практической точки зрения клиническая тактика должна быть ориентирована не на констатацию уже развившегося неврологического дефицита, а на его профилактику. По данным литературы медиальные перфорации до 2 мм относятся к зоне относительной безопасности, 2-4 мм рассматриваются как пограничные, а более 4 мм ассоциируются с высоким риском неблагоприятных исходов. В хирургии сколиоза клиническая значимость медиальной

перфорации определяется не только её глубиной, но и топографией деформации. На вогнутой стороне и в апикальной зоне анатомический резерв позвоночного канала минимален, поэтому даже формально пограничная перфорация в этих условиях может иметь более высокий риск повреждения невральных структур.

В ходе исследования положение винтов оценивали по классификации Sarwahi et al. (2016). Полученные результаты, анализ клинических наблюдений и данные литературы позволили предложить её клинически ориентированную интерпретацию для практического алгоритма принятия решений в хирургии сколиоза. Для латеральных мальпозиций к НМ следует относить только экстрапедикулярное положение винта при сохранении его в пределах тела позвонка и отсутствии угрозы критическим структурам. Выход винта вне тела позвонка целесообразно трактовать как СМ, поскольку он снижает опороспособность фиксации. Передняя мальпозиция при отсутствии контакта с органами и сосудами может расцениваться как НМ, а при их контакте или опасной близости как ОМ. Для медиальных мальпозиций сохраняется общая логика стратификации: менее 2 мм соответствует НМ, 2-4 мм соответствует СМ, более 4 мм соответствует ОМ. Однако по вогнутой стороне и в апикальной зоне медиальные перфорации 2 мм и более следует рассматривать как потенциально более опасные и учитывать это при выборе тактики. Любая мальпозиция, сопровождающаяся неблагоприятной динамикой нейромониторинга или клиническим неврологическим дефицитом, должна относиться к ОМ.

Таким образом, порог 5-6 мм отражает порог реализации осложнений в собственной серии наблюдений, тогда как порог 4 мм целесообразно использовать как профилактический порог настороженности. Диапазон 2-4 мм следует рассматривать как промежуточную зону, в которой тактика определяется индивидуально с учётом стороны дуги, близости к вершине деформации, данных нейромониторинга и клинической картины. На основании этих положений сформулирован алгоритм действий при выявлении мальпозиций на интраоперационном и послеоперационном этапах.

Интраоперационный алгоритм действий при выявлении мальпозиций

Интраоперационная тактика основана на оценке нейрофизиологических и данных лучевых методов исследования. После установки винтов оценивают направление перфорации, глубину выхода, уровень фиксации, сторону дуги и близость к зоне вершины деформации. Далее выявленная мальпозиция интерпретируется в категориях ТП, НМ, СМ и ОМ по предложенной клинической логике.

При латеральных и передних мальпозициях допустимость сохранения винта определяется отсутствием угрозы критическим структурам и сохранностью внутрикостной опоры. Экстрапедикулярное положение при сохранении винта в пределах тела позвонка расценивается как НМ и, как правило, не требует коррекции. Положение винта вне корня дуги и вне тела позвонка относится к СМ и является основанием для предпочтительной его реимплантации, так как потенциально снижает стабильность спондилосинтеза. Контакт винта с аортой или органами расценивается как ОМ и требует обязательной коррекции.

При медиальных мальпозициях ключевое значение имеют глубина выхода и топография деформации. Перфорация менее 2 мм при стабильных данных нейромониторинга может быть оставлена без коррекции. Перфорация 2-4 мм требует индивидуальной оценки, при расположении по вогнутой стороне и в зоне вершины должна рассматриваться как ОМ с предпочтительной переустановкой винта. Перфорация более 4 мм относится к ОМ и требует реимплантации опорного элемента. При неблагоприятной динамике нейромониторинга приоритетом является немедленная оценка положения подозрительных винтов и устранение потенциально опасной, прежде всего медиальной, мальпозиции.

Послеоперационный алгоритм действий при выявлении мальпозиций

Для своевременного выявления потенциально опасных мальпозиций, включая бессимптомные варианты, способные приводить к отсроченным осложнениям, рекомендуется выполнение послеоперационной КТ. При появлении новой или нарастающей неврологической симптоматики, подозрении на мальпозицию по интраоперационным данным или изменении характера болевого синдрома КТ должна выполняться в первоочередном порядке.

Послеоперационно оценивают направление и глубину перфорации позвонка, уровень имплантации, наличие контакта с органами и сосудами, а также локализацию по отношению к вогнутой стороне и зоне вершины деформации.

В отличие от интраоперационного этапа, послеоперационное решение должно учитывать не только риск самой мальпозиции, но и риск ревизионного вмешательства.

Экстрапедикулярное положение при сохранении винта в пределах тела позвонка соответствует НМ и при отсутствии симптомов требует наблюдения. Положение винта вне тела позвонка без контакта с критическими структурами соответствует СМ; допустимо динамическое наблюдение при стабильности конструкции. Контакт или прилежание винта к аорте, полым или сегментарным сосудам, трахее, пищеводу либо органам брюшной полости соответствует ОМ и требует плановой ревизии независимо от наличия жалоб.

Для медиальных мальпозиций менее 2 мм при отсутствии симптоматики показано наблюдение. Перфорации 2-4 мм требуют индивидуальной оценки по совокупности клинических и лучевых данных. При отсутствии неврологического дефицита и признаков компрессии по КТ допустима выжидательная тактика, однако при локализации по вогнутой стороне и в апикальной зоне необходима повышенная клиническая настороженность и низкий порог решения о ревизии. Перфорации более 4 мм расцениваются как клинически значимые; при наличии неврологической симптоматики показана неотложная ревизия, при её отсутствии вопрос о плановой коррекции решается индивидуально с учётом баланса риска и пользы. Любая медиальная мальпозиция, сопровождающаяся новой или прогрессирующей неврологической симптоматикой, относится к ОМ и требует ревизионного вмешательства.

ВЫВОДЫ

1. Применение «free-hand» техники установки транспедикулярных винтов при хирургической коррекции деформаций позвоночника у детей относительно безопасно,

и обеспечивает точность установки на уровне 78,7%, при средней величине угла деформации – 75,9° и ротации вершинного позвонка 27,8°. Частота мальпозиций возрастает с увеличением угла сколиотической дуги ($r=0,784$, $p<0,001$), ротации вершинного позвонка ($r=0,648$, $p<0,001$), уровня имплантации винта ($p<0,001$), расположения винта относительно вершины ($p<0,001$).

2. Внедрение аддитивных технологий позволило значимо повысить точность имплантации транспедикулярных винтов ($p<0,001$), не исключая влияния тяжести деформации на риск мальпозиций опорных элементов металлоконструкции. Отмечено повышение точности установки транспедикулярных винтов до 93,8% при исходно большей величине угла деформации (94,1°) и ротации вершинного позвонка (37,6°). Выявлено снижение влияния тяжести деформации на частоту мальпозиций в сравнении со стандартной техникой имплантации винтов, прямая корреляция умеренной тесноты между углом деформации и частотой мальпозиций ($r=0,419$, $p<0,05$), заметная прямая связь между частотой мальпозиций и ротацией апикального позвонка ($r=0,573$, $p<0,001$).
3. Анализ эффективности внедрения технологии КТ-навигации показал достоверное ($p<0,001$) повышение точности имплантации опорных элементов до 95% при исходно более тяжелых деформациях (92,9°; 37,7°) применение КТ-навигации позволило нивелировать влияние ротации вершинного позвонка на частоту мальпозиции ($r=0,057$, $p=0,709$) и значительно снизить влияние исходного угла деформации на частоту мальпозиций ($r=0,346$, $p=0,02$)
4. Высокий риск неврологических осложнений мальпозиции винта имеется при перфорации медиальной стенки корня дуги позвонка более 4 мм, расположение винта по вогнутой стороне сколиотической дуги или в непосредственной близости к апикальной зоне, что подтверждается данными интраоперационного нейрофизиологического мониторинга и контрольной компьютерной томографии.
5. Разработанная прогностическая модель на основании выявленных предикторов – фронтальный наклон позвонка и его ротация является статистически значимой ($p<0,001$), и по данным ROC анализа чувствительность и специфичность составили 70,5% и 62,5% соответственно. Псевдо-R^2 Найджелкерка составил 10,3%. Таким образом, увеличение угла фронтального наклона на 1° приводит к увеличению риска мальпозиции педикулярных винтов на 2,7% (ОШ 1,027; 95% ДИ 1,013–1,042), а увеличение ротации на 1° – на 5,0% (ОШ 1,050; 95% ДИ 1,030–1,070).

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При предоперационном планировании необходимо учитывать тяжесть деформации, выраженность ротации и анатомические особенности корней дуг позвонков. Угол фронтального наклона и ротации позвонка более 20° связаны с высоким риском мальпозиций опорных элементов и требует применения КТ-навигации или аддитивных технологий.

2. При отсутствии КТ-навигации или аддитивных технологий рекомендуется избегать имплантации винтов на уровне вершины деформации, особенно по вогнутой стороне.
3. При интраоперационном выявлении медиальной мальпозиции более 4 мм винт подлежит немедленной переустановке. В послеоперационном периоде медиальная мальпозиция более 4 мм, особенно – по вогнутой стороне сколиотической дуги требует ревизии, даже при отсутствии клинических проявлений.
4. При обнаружении прилегания винта к аорте (при расстоянии ≤1–2 мм) или органами грудной клетки рекомендуется незамедлительная переустановка винта.
5. Незначительные латеральные мальпозиции допускают динамическое наблюдение при отсутствии клинических проявлений и при отсутствии контакта с плеврой, лёгким или сосудами.
6. В верхнегрудном отделе, учитывая малый диаметр и асимметрию корней дуг позвонков, рекомендуется применять навигационные методы. При недоступности навигации следует рассмотреть использование крючковой системы или экстрапедикулярную имплантацию винтов, как более безопасные способы спондилосинтеза в условиях сложной анатомии.
7. При планировании тактики металлофиксации позвоночника при сколиозе следует избегать «free-hand» имплантации винтов на уровнях, где планируемая ротация позвонка превышает 20°. В таких ситуациях предпочтительно использование навигации или применение гибридной, в том числе - крючковой системы в зонах риска. При установке винтов по вогнутой стороне основной дуги обязательно применение интраоперационного нейрофизиологического мониторинга (МВП). Снижение амплитуды МВП является основанием для немедленной проверки и переустановки винта.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Пимбурский И. П., Челпаченко О.Б., Яцык С.П., Жердев К.В., Бутенко А.С. Стратификации риска мальпозиции транспедикулярных винтов при «free-hand» технике имплантации в хирургии сколиоза. Педиатрия. Consilium Medicum. 2026; 1:12-17.**
2. **Пимбурский, И. П., Домрачев, И. Е., Челпаченко, О. Б., Колесов, С. В., Жердев, К. В., Яцык, С. П., Бутенко А.С., Казьмин, А. И. Снижение имплант-ассоциированных осложнений в хирургии сколиоза путем применения O-arm-навигации и аддитивных технологий. Вестник Российской академии медицинских наук. 2025; 80(2):146-154.**
3. **Пимбурский И.П., Бутенко А.С., Самохин К.А., Челпаченко О.Б., Жердев К.В., Яцык С.П., Емельянов А.А. Применение нейронавигационных технологий при тяжелых формах сколиоза у детей. Педиатрия. Consilium Medicum. 2024;(2):130-137.**

4. **Пимбурский И.П., Бутенко А.С., Самохин К.А., Челпаченко О.Б., Жердев К.В., Яцык С.П., Зубков П.А., Петельгузов А.А. Обеспечение безопасности хирургической коррекции сколиозов у детей с применением нейромониторинга и O-arm -навигации. Педиатрия. Consilium Medicum. 2023;(4):269-274.**
5. **Chelpachenko O.B., Gusev I.P., Pimburskiy I.P., Butenko A.S., Samokhin K.A., Zherdev K.V., Yatsyk S.P., Fisenko A.P., Dyakonova E.Yu. The use of thoracoscopic release in the surgical correction of thoracic scoliosis in children. Journal of pediatric surgery. 2024; 60(2):161913**
6. **Самохин К.А., Пимбурский И.П., Бутенко А.С., Челпаченко О.Б., Давыдов Д.М., Давлетгалеев Г.Т., Суменко В.В., Жердев К.В., Яцык С.П. Анализ эффективности двухэтапного и одноэтапного оперативного лечения идиопатического сколиоза у детей с применением различных методов мобилизации деформации. Российский педиатрический журнал. 2024;27(5): 340-349.**
7. Пимбурский И.П. Применение "O-ARM" навигации и аддитивных технологий при хирургической коррекции сколиозов у детей. Российский педиатрический журнал. 2024;27(S4):43.
8. Пимбурский И.П., Челпаченко О.Б., Бутенко А.С., Жердев К.В. Профилактика имплант-ассоциированных осложнений при хирургической коррекции сколиотической деформации у детей. Российский педиатрический журнал. 2024; 27(S4):58.
9. Самохин К.А., Пимбурский И.П., Бутенко А.С., Челпаченко О.Б., Басов А.В., Самохина И.В., Давлетгалеев Г.Т. Предоперационный нейрофизиологический мониторинг и 3D-моделирование как профилактика осложнений при коррекции деформаций позвоночника у детей. Российский педиатрический журнал. 2024; 27(S4):59-60.
10. Пимбурский И.П., Челпаченко О.Б. Эффективность и безопасность хирургической коррекции сколиозов при применении нейромониторинга и O-ARM навигации. Российский педиатрический журнал. 2023;26(S3):48-49.
11. Пимбурский И.П. Профилактика неврологических осложнений при хирургической коррекции сколиозов у детей. Российский педиатрический журнал. 2023;26(S5):51.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КТ – компьютерная томография
ЛМ – латеральная мальпозиция
ММ – медиальная мальпозиция
НМ – незначительная мальпозиция
ОМ – опасная мальпозиция
ПМ – передняя мальпозиция
СМ – сомнительная мальпозиция
ТП – точное положение