

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ЗДОРОВЬЯ ДЕТЕЙ" МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

На правах рукописи

Пимбурский Иван Петрович

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

3.1.11. Детская хирургия

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Научный руководитель:

доктор медицинских наук, доцент

Челпаченко Олег Борисович

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ	
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	20
1.1. ВВЕДЕНИЕ.....	20
1.2 ЭПИДЕМИОЛОГИЯ, КЛИНИЧЕСКАЯ И СОЦИАЛЬНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЗВОНОЧНИКА.....	21
1.3 СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ХИРУРГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СКОЛИОЗА И РОЛЬ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНОЙ ФИКСАЦИИ.	22
1.4 ОСЛОЖНЕНИЯ В ХИРУРГИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЗВОНОЧНИКА. ...	23
1.5 ТЕХНИКА «FREE-HAND» ИМПЛАНТАЦИИ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ.....	26
1.6 МАЛЬПОЗИЦИИ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ: ЧАСТОТА, ОЦЕНКА, КЛИНИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ.....	27
1.6.1 МЕДИАЛЬНЫЕ МАЛЬПОЗИЦИИ.	29
1.6.2 ПЕРЕДНИЕ И ЛАТЕРАЛЬНЫЕ МАЛЬПОЗИЦИИ.	32
1.7 АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	35
1.8 КТ-НАВИГАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	37
1.9 ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ.....	42
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	46
2.1 Общая характеристика пациентов, дизайн исследования.	46
2.2 ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	50
2.2.1 Рентгенография	50
2.2.2 Компьютерная томография.....	51
2.3 ОЦЕНКА ПОЛОЖЕНИЯ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАЛЬПОЗИЦИЙ.	52
2.4 НЕЙРОМОНИТОРИНГ.....	54
2.5 МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО ЛЕЧЕНИЯ	56

2.5.1 Хирургическая коррекция деформации позвоночника с применением «free-hand» техники.	56
2.5.2 Хирургическая коррекция деформации позвоночника с применением КТ-навигации.	57
2.5.3 Хирургическая коррекция деформации позвоночника с применением аддитивных технологий.	59
2.6. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	61
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СПОНДИЛОСИНТЕЗА.	63
3.1 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ «FREE-HAND».	63
3.2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	73
3.3 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КТ-НАВИГАЦИИ.....	77
3.4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИМПЛАНТАЦИИ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ.....	82
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА РИСКА НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ, АССОЦИИРОВАННЫХ С МЕДИАЛЬНОЙ МАЛЬПОЗИЦИИ ВИНТОВ....	89
4.1 КЛИНИЧЕСКИЕ СЛУЧАИ НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ, АССОЦИИРОВАННЫХ С МЕДИАЛЬНОЙ МАЛЬПОЗИЦИЕЙ.....	89
4.2 АНАЛИЗ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГЛУБИНЫ МЕДИАЛЬНОЙ ПЕРФОРАЦИИ КАК ПРЕДИКТОРА НЕВРОЛОГИЧЕСКОГО ДЕФИЦИТА.	97
ГЛАВА 5. ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РИСКА МАЛЬПОЗИЦИЙ. ...	100
ГЛАВА 6. ОЦЕНКА РИСКА НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ И ТАКТИКА ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ МАЛЬПОЗИЦИЙ.....	104
6.1 ОЦЕНКА РИСКА НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ.....	104
6.2 ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ МАЛЬПОЗИЦИЙ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ. ...	108

6.3 ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ МАЛЬПОЗИЦИЙ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ. ...	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
ВЫВОДЫ.....	121
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:	125

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

2D - двумерный

3D - трехмерный

ABS - акрилонитрилбутадиенстирол

AP - Accurately Placed, точное положение винта

AR - augmented Reality, дополненная реальность

AUC - площадь под ROC кривой

BMP - Benign Misplacement, незначимая мальпозиция

CDI - Cotrel-Dubousset instrumentation, инструментарий Cotrel-Dubousset

DICOM - Digital Imaging and Communications in Medicine, стандарт хранения и передачи медицинских изображений

DJK - Distal Junctional Kyphosis, дистальный переходный кифоз

DJF - Distal Junctional Failure, дистальная переходная недостаточность

D-wave - D-волна, прямая волна кортикоспинального тракта

EMG - electromyography, электромиография

FDM - Fused Deposition Modeling, метод послойного наплавления полимера

IMP - Indeterminate Misplacement, сомнительная мальпозиция

LIV - lower instrumented vertebra, нижний инструментированный позвонок

MEP - motor evoked potentials, моторные вызванные потенциалы

MRC - Medical Research Council

O-arm - интраоперационная система компьютерной томографии O-arm

PJK - Proximal Junctional Kyphosis, проксимальный переходный кифоз

PJF - Proximal Junctional Failure, проксимальная переходная недостаточность

ROC - receiver operating characteristic, ROC кривая

SAR - Screw at Risk, опасная мальпозиция

SCOPUS - библиографическая и реферативная база данных

SRS - Scoliosis Research Society, регистр SRS

SSEP - somatosensory evoked potentials, соматосенсорные вызванные потенциалы

STL - stereolithography file format, формат STL

t-EMG - triggered electromyography, триггерная электромиография

TcMEP - transcranial motor evoked potentials, транскраниальные моторные вызванные потенциалы

UIV - upper instrumented vertebra, верхний инструментированный позвонок

UIV+2 - позвонок на два уровня выше верхнего инструментированного

wake-up тест - интраоперационный тест пробуждения (wake-up тест Стагнара)

cut-off - пороговое значение

Сокращения на кириллице

ВАК РФ - Высшая аттестационная комиссия Российской Федерации

ДИ - доверительный интервал

ИОМ - интраоперационный нейрофизиологический мониторинг (интраоперационный нейромониторинг)

ИП - инструментированный позвонок

ИС – идиопатический сколиоз

ЖКТ - желудочно-кишечный тракт

КТ - компьютерная томография

ЛМ - латеральная мальпозиция

ММ - медиальная мальпозиция

ПМ - передняя мальпозиция

МВП - моторные вызванные потенциалы

МРТ - магнитно-резонансная томография

НМ – незначительная мальпозиция

СМ - сомнительная мальпозиция

ОМ - опасная мальпозиция

ТП - точное положение

ОШ - отношение шансов

РФ - Российская Федерация

ССВП - соматосенсорные вызванные потенциалы

ТПВ - транспедикулярный винт

ТПФ - транспедикулярная фиксация

ТЭЛА - тромбоэмболия легочной артерии

ФГАУ НМИЦ здоровья детей Минздрава России - Федеральное государственное автономное учреждение Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей Министерства здравоохранения Российской Федерации

ЭМГ - электромиография

Т-ЭМГ - триггерная электромиография

ЭНМГ – электронейромиография

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Сколиотические деформации позвоночника у детей являются распространённой патологией, встречаясь в общей популяции с частотой от 0,47% до 5,2% [102], при этом примерно 0,2% пациентов нуждаются в хирургической коррекции деформации [15]. Хирургическое лечение на сегодняшний день остаётся единственным эффективным методом коррекции тяжелых прогрессирующих деформаций, позволяющим восстановить пространственный баланс позвоночника, улучшить функцию органов грудной клетки и предотвратить развитие инвалидизирующих осложнений [70]. Тяжёлые многоплоскостные деформации позвоночника приводят к развитию сколиотической болезни, что сопровождается нарушениями со стороны внутренних органов и ранней инвалидизацией: до 12% к 28-летнему возрасту, сокращением продолжительности и качества жизни пациентов (до 50% пациентов – нетрудоспособны), что диктует необходимость хирургической коррекции [16].

Основной целью хирургического лечения сколиоза является достижение сбалансированной коррекции деформации позвоночника во фронтальной и сагиттальной плоскостях и предотвращение дальнейшего прогрессирования. Появление стержней Харрингтона в 1950-х годах для заднего спондилодеза позволило осуществлять коррекцию преимущественно во фронтальной плоскости, однако не обеспечивало коррекции сагиттального профиля позвоночника [75]. В 1980-х годах был представлен инструментарий Cotrel–Dubousset (CDI), включающий полисегментарную фиксацию винтами, крючками и двойными стержнями, что позволило выполнять коррекцию сколиотической деформации во фронтальной, сагиттальной и аксиальной плоскостях (за счёт деротационного манёвра). Таким образом, CDI стала одной из первых систем, ориентированных на трёхплоскостную коррекцию деформаций при сколиозе [33].

В настоящее время задний инструментальный спондилодез с применением полисегментарной фиксации рассматривается как «золотой стандарт» лечения сколиоза. Методом выбора при оперативном лечении сколиозов у детей является трёхмерная полисегментарная транспедикулярная фиксация [24]. В ряде работ при сравнении крючковых систем с транспедикулярными большинство исследований приходят к выводу, что транспедикулярная фиксация (ТПФ) обеспечивает более выраженный корригирующий эффект и более стабильную фиксацию [80, 138].

Несмотря на преимущества ТПФ, сохраняется риск имплант-ассоциированных и других осложнений. Неврологические осложнения являются одними из наиболее тяжёлых в хирургии позвоночника: при идиопатическом сколиозе их риск варьирует от 0,3% до 4%, а имплант-ассоциированные осложнения встречаются с частотой до 1,37% [21]. При нейрогенных сколиозах отмечается более высокий уровень неврологических осложнений – до 10,6%, а осложнения, связанные с имплантатами, достигают 42% [52]. Средняя частота ревизионных вмешательств составляет 9,6% (до 39,4% у пациентов с миеломенингоцеле), причём 36% ревизий обусловлены имплант-ассоциированными осложнениями [52, 111].

Одной из причин имплант-ассоциированных осложнений является мальпозиция транспедикулярного винта. По данным литературы частота мальпозиций при использовании техники «free-hand» составляет от 1,5% до 50,0% [17,18,62,125,126]. При этом отсутствует единое мнение относительно того, в каких случаях мальпозиция требует ревизии при отсутствии клинических проявлений [56]. Доля мальпозиций, сопровождающихся клинически значимыми осложнениями, по данным литературы, варьирует от 0,2% до 21% [91]; также сообщается, что доля клинически значимых осложнений, связанных именно с неправильной установкой винтов, достигает 1,8% при идиопатическом сколиозе и до 21% в общей хирургической популяции [35].

Медиальная мальпозиция (ММ) возникает при прободении медиальной стенки корня дуги позвонка и выстоянии винта в позвоночный канал, что может приводить к повреждению или компрессии невральных структур, развитию эпидуральной гематомы; также возможно развитие радикулопатии при прохождении винта через корешковое отверстие [23]. Потенциально более опасными при сколиозе могут быть медиальные мальпозиции по вогнутой стороне деформации, поскольку спинной мозг смещается в вогнутую сторону деформации, что теоретически повышает риск контакта винта со спинным мозгом при перфорации медиальной стенки ножки дуги позвонка. Латеральные мальпозиции (ЛМ) возникают при выстоянии винта в латеральном направлении от корня дуги и тела позвонка и в грудном отделе позвоночника могут приводить к плевриту, гемо- и пневмотораксу, повреждению лёгкого [23]. Передние мальпозиции (ПМ) при прободении тела позвонка спереди могут приводить к кровотечению, образованию гематом, эрозии стенки сосуда или формированию псевдоаневризм, поскольку спереди от позвоночника располагаются крупные сосуды [111]. Повреждения магистральных сосудов при ТПФ встречаются с частотой около 0,01%; ещё реже наблюдаются повреждения аорты, однако летальность в таких случаях может достигать 65% [91].

Высокие риски имплант-ассоциированных осложнений в хирургии деформаций позвоночника требуют разработки и внедрения методов профилактики и повышения точности имплантации. Одним из таких методов является КТ-навигация, всё чаще используемая в хирургии деформаций позвоночника [95]. Интраоперационная КТ в сочетании с навигационной системой позволяет в режиме реального времени сопоставлять положение и траекторию инструмента относительно индивидуальной анатомии пациента в трёх плоскостях. По данным большинства исследований, КТ-навигация снижает частоту мальпозиций [27,55,69,145]. Однако, несмотря на преимущества КТ-навигации, рядом авторов ставится под сомнение эффективность её применения в отдельных клинических ситуациях. Singh и

соавт. (2024) пришли к выводу, что при лечении идиопатического сколиоза применение КТ-навигации не снижает риск послеоперационных осложнений, увеличивает кровопотерю и связано с повышением стоимости лечения [132]. Кроме того, КТ-навигация может давать погрешность (в пределах $2,8 \pm 1,9^\circ$) между виртуальным изображением и реальным положением винта во время операции, что связывают с техническими факторами (некорректная фиксация инструмента к импланту или нестабильная фиксация навигационной рамки с её смещением во время хирургических манипуляций) [110].

В последние годы активно развиваются аддитивные технологии в ортопедии. КТ позвоночника позволяет построить трёхмерную реконструкцию, которая используется для создания модели на 3D-принтере в масштабе 1:1. Трёхмерная модель позвоночника может служить наглядным макетом для лучшего пространственного понимания индивидуальной анатомии деформации и планирования траектории имплантации транспедикулярных винтов. Вместе с тем, несмотря на развитие КТ-навигации и аддитивных технологий, отсутствуют единые клинические критерии определения необходимости их применения, унифицированная клинически ориентированная классификация мальпозиций, модели риска, а также алгоритмы принятия решений при выявлении различных типов мальпозиций. Эти факторы подчёркивают необходимость комплексного исследования, направленного на оценку точности различных методик установки винтов и изучение факторов риска мальпозиций для повышения безопасности хирургической коррекции сколиоза у детей.

Степень разработанности темы исследования

Несмотря на развитие технологий хирургической коррекции деформаций позвоночника у детей, проблема точной и безопасной имплантации транспедикулярных винтов остаётся недостаточно решённой. Публикуемые данные демонстрируют широкий диапазон частоты мальпозиций при использовании техники «free-hand», что обусловлено отсутствием универсальных критериев оценки правильности установки,

разнородностью методов контроля и методологической неоднородностью исследований [17,20,24,25,62,77,125,126]. Дополнительной проблемой является то, что рутинный послеоперационный КТ-контроль применяется не во всех центрах, вследствие чего часть бессимптомных мальпозиций может оставаться недиагностированной [46]. Применяемые классификации нередко опираются преимущественно на величину выхода винта за пределы кортикального слоя, что ограничивает клиническую интерпретацию выявленных отклонений; сохраняется вариабельность оценки клинической значимости мальпозиции и тактики ведения при отсутствии симптоматики [24,56,129].

Современные технологии повышения точности – КТ-навигация и аддитивные решения, в большинстве работ позволяют снизить частоту мальпозиций по сравнению с техникой «free-hand» [67,69,71,81,88,89,93,94,101]. В отечественной литературе представлены данные по применению КТ-навигации при хирургии деформаций позвоночника, обсуждаются вопросы классификации мальпозиций и лучевой нагрузки, а также описываются варианты использования навигационных шаблонов у детей [2–7,12–14]. Вместе с тем сохраняется ограниченность сопоставимых клинических данных: значительная часть отечественных исследований посвящена отдельным нозологиям и техническим задачам, тогда как сравнительные работы по трём подходам на сопоставимых по тяжести группах детей представлены ограниченно [2–7,12–14].

Отсутствуют унифицированные клинически ориентированные критерии опасности мальпозиции, учитывающие топографию деформации и особенности невральных структур, что подчёркивается в работах, посвящённых классификациям мальпозиций [12,24,56,129]. Недостаточно разработаны пороговые значения клинически опасной медиальной перфорации и тактические рекомендации по её коррекции [56,129]. Кроме того, в мировой литературе ограничены прогностические модели риска мальпозиции на основании объективных радиологических параметров

деформации, применимые к планированию тактики [24,25,77]. Не стандартизирован алгоритм действий при выявлении мальпозиции на интраоперационном и раннем послеоперационном этапах с учётом данных КТ-контроля, клиники и нейромониторинга, что ограничивает воспроизводимость тактики между центрами [3,12,24,46].

Таким образом, сохраняются существенные пробелы в стандартизации оценки мальпозиций, сравнительной эффективности технологий имплантации у детей и стратификации имплант-ассоциированных рисков, что определило цель и задачи настоящего исследования

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:

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

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 работы 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

Данное исследование проводилось на базе нейроортопедического отделения с ортопедией Федерального государственного автономного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации. Часть группы пациентов, оперированных с применением аддитивных технологий набраны в 7 отделении (патологии позвоночника) федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (в рамках соглашения о научно-практическом сотрудничестве).

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 ($n = 45$). Во всех группах операции выполнялись опытными спинальными хирургами, что позволило минимизировать влияние фактора кривой обучения на точность имплантации опорных элементов позвоночника.

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. Основными конечными точками исследования были частота, характер и клиническая значимость мальпозиций транспедикулярных винтов, структура осложнений и необходимость ревизионных вмешательств, а также анализ факторов риска мальпозиций по данным предоперационных лучевых исследований.

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.

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.

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.

Личный вклад автора

Непосредственное участие во всех ключевых этапах выполнения исследования. Определение целей, задач и общей концепции работы, а также разработка основных методологических подходов. Значительная часть пациентов, вошедших в исследуемые группы, была обследована и пролечена при непосредственном участии автора. Выполнение оперативных вмешательств, как в роли хирурга, так и ассистента.

Самостоятельное выполнение обработки медицинской документации, формирование электронной базы данных, выполнение расчётов исследуемых параметров и проведение полного цикла статистического анализа. Интерпретация полученных результатов совместно с научным руководителем, на основании которых подготовлены положения, выводы и практические рекомендации диссертационной работы, а также подготовлены публикации по её материалам.

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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При написании настоящего раздела использованы фрагменты собственного текста, впервые опубликованные ранее в работах: [8-11]

1.1. ВВЕДЕНИЕ.

Несмотря на значительный прогресс в инструментарии, нейромониторинге и методах коррекции, риск интраоперационных и послеоперационных осложнений остаётся значимым [41].

Центральным элементом хирургической коррекции является установка транспедикулярных винтов, обеспечивающих надёжную фиксацию и контроль деформации во всех трёх плоскостях. При этом точность установки винтов напрямую влияет не только на стабильность конструкции, но и на вероятность неврологических осложнений, механических сбоев и потребность в ревизии [67,81].

В связи с этим, сравнение различных техник имплантации винтов – «free-hand», навигационных систем, а также индивидуализированных 3D-шаблонов – представляет актуальный научный интерес. Однако оценка их эффективности невозможна без понимания общей клинической значимости деформаций позвоночника, анатомических условий, уровня технической сложности вмешательства и рисков, присущих хирургии деформаций у детей и подростков.

В настоящем обзоре литературы представлены данные не только по точности и безопасности различных техник установки транспедикулярных винтов, но и ключевые аспекты, влияющие на исход хирургии деформаций: эпидемиология и социальная значимость деформаций позвоночника, последствия отсутствия лечения, роль хирургической коррекции, частота и структура осложнений, особенности формирования мальпозиций, а также современные подходы к оценке и классификации технических ошибок. Такой подход позволяет комплексно оценить применимость той или иной технологии в клинической практике и определить её место в алгоритме коррекции сколиотических деформаций у пациентов молодого возраста.

1.2 ЭПИДЕМИОЛОГИЯ, КЛИНИЧЕСКАЯ И СОЦИАЛЬНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЗВОНОЧНИКА.

Деформации позвоночника широко распространены среди различных групп населения и представляют собой одну из ведущих причин хронических болевых синдромов и функциональных ограничений со стороны опорно-двигательного аппарата. По данным эпидемиологических исследований, клинически значимые деформации позвоночника у подростков выявляются с частотой от 0,47 до 5,2% [76,102], а у пожилых – с более высокой частотой, достигающей 13–68% [104]. Около 0,2% случаев имеют такую степень выраженности деформации, которая требует оперативного вмешательства для радикальной коррекции [15]. По мнению некоторых авторов, патология опорно-двигательного аппарата занимает одно из ведущих мест среди причин выхода на первичную инвалидность [15].

В Российской Федерации отсутствуют подробные данные по количеству пациентов с деформациями позвоночника, нуждающихся в хирургическом лечении; однако при экстраполяции мировых данных и исходя из численности населения (около 147 млн человек), потенциально нуждающихся в хирургической помощи может быть порядка 250 тыс. человек [15].

Сколиотическая деформация позвоночника – это не только проблема опорно-двигательного аппарата. В ответ на наличие тяжёлой деформации позвоночника и грудной клетки формируется симптомокомплекс с вовлечением внутренних органов и систем, что заставляет рассматривать сколиоз не только как деформацию позвоночника, но и, как сколиотическую болезнь организма в целом, характеризующуюся неуклонно прогрессирующим течением и приводящую к тяжёлым медицинским и социальным последствиям. Около 50% больных сколиозом нетрудоспособны, причём в 12% случаев отмечается ранняя инвалидизация пациентов уже к 28-летнему возрасту [16].

Возникающий хронический болевой синдром оказывает негативное влияние не только на локомоторную функцию, но и на психологическое

состояние пациента, способствуя развитию депрессивных реакций и тревожных расстройств. При локализации сколиотической дуги в грудном отделе могут наблюдаться дыхательные и гемодинамические нарушения (сдавление лёгких, ограничение экскурсии грудной клетки), а при выраженных поясничных деформациях - нарушения походки и статики. В ряде случаев деформации позвоночника сопряжены с компрессией невралных структур, что приводит к развитию неврологического дефицита (парестезии, слабость в конечностях, нарушения тазовых функций и т. д.). Таким образом, все перечисленные факты свидетельствуют о выраженном снижении качества жизни пациентов с тяжёлыми формами сколиоза [59,82,103].

Современная вертебрология является одной из самых динамично развивающихся отраслей ортопедии за последние десятилетия. Наиболее значимый технологический рост демонстрирует хирургия деформаций позвоночника у детей, что связано с внедрением транспедикулярных «растущих» и ригидных систем, которые позволяют эффективно корригировать тяжёлые формы сколиоза и связанный с ними фронтальный и сагиттальный дисбаланс туловища. Это, в свою очередь, позволяет остановить прогрессирование сколиотической болезни за счёт минимизации вертеброгенного влияния деформации позвоночника на внутренние органы и системы. Многочисленные клинические исследования подтверждают, что хирургическое лечение приводит к устойчивому улучшению функциональных показателей, повышению качества жизни, снижению уровня болевого синдрома и, как следствие, к улучшению физической и социальной адаптации пациентов [19,40,70].

1.3 СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ХИРУРГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СКОЛИОЗА И РОЛЬ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНОЙ ФИКСАЦИИ.

Основной целью хирургического лечения сколиоза является достижение сбалансированной коррекции деформации позвоночника во фронтальной и сагиттальной плоскостях и предотвращение дальнейшего прогрессирования. Появление стержней Харрингтона в 1950-х годах позволило осуществлять

коррекцию преимущественно во фронтальной плоскости, однако не обеспечивало коррекцию сагиттального профиля [75]. В 1980-х годах был представлен инструментарий Cotrel–Dubousset (CDI), основанный на полисегментарной фиксации и позволяющий выполнять трёхплоскостную коррекцию деформации (во фронтальной, сагиттальной и аксиальной плоскостях) [33].

Задний инструментальный спондилодез с использованием полисегментарной фиксации в настоящее время рассматривается как «золотой стандарт» хирургического лечения сколиоза. По данным большинства исследований, транспедикулярная фиксация (ТПФ) по сравнению с крючковыми системами обеспечивает лучший корригирующий эффект и более стабильную фиксацию [80,138].

Транспедикулярные винтовые системы и специализированный хирургический инструментарий позволяют корригировать компоненты деформации позвоночника, однако требования к точности имплантации опорных элементов в условиях деформированной анатомии и продолжающегося роста позвоночника неуклонно повышаются. Даже при современной инструментарии операции при деформациях позвоночника относятся к числу технически наиболее сложных вмешательств в ортопедии, а риск осложнений определяется как особенностями пациента и деформации, так и техническими аспектами вмешательства.

1.4 ОСЛОЖНЕНИЯ В ХИРУРГИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЗВОНОЧНИКА.

Несмотря на технологический прогресс, хирургическая коррекция деформаций позвоночника остаётся технически сложной и ассоциирована с риском осложнений, при этом их суммарная частота в литературе существенно варьирует (в диапазоне 1–40%) в зависимости от этиологии, возраста, величины деформации, сопутствующей патологии и квалификации хирурга [50,61,70,135]. По данным регистра SRS (Scoliosis Research Society) при подростковом идиопатическом сколиозе (ИС) осложнения зарегистрированы у 1,5% пациентов [79]. Во взрослой популяции ключевое значение имеют не

столько возрастные факторы, сколько объём и техническая сложность вмешательства (остеотомии, ревизии, комбинированные доступы), что ассоциировано с повышением риска осложнений [128]. Наиболее высокий риск осложнений характерен для нейромышечных сколиозов: средняя частота осложнений составляет около 35% (диапазон 17–68%) [45].

Осложнения при коррекции сколиоза включают инфекционные, сосудистые, висцеральные, псевдоартроз, механические осложнения и синдромы смежного уровня, хронический болевой синдром, неврологические осложнения и мальпозиции транспедикулярных винтов.

Инфекционные осложнения встречаются относительно редко при идиопатическом сколиозе (глубокая или поверхностная инфекция около 0,5% и 0,5% соответственно) [79], чаще у взрослых [128], и значительно чаще при нейромышечных сколиозах (в среднем 10,9%) [45]. Сосудистые осложнения у детей при заднем доступе редки; при протяжённых фиксациях переливание крови в ряде работ рассматривается, как наиболее частое «осложнение» (до 20%) [108], а кровотечение или гематома, требующая ревизии, у подростков встречается менее чем в 1% случаев [133]. У взрослых кровотечение или гематома, требующая ревизии, наблюдается примерно в 1–2% случаев [133], повреждение сосудов при переднем доступе в поясничном отделе оценивается в 2,9% [54], а риск тромбоэмболических осложнений без профилактики у пожилых достигает около 3% для тромбоза глубоких вен и 3% для ТЭЛА [133].

Висцеральные осложнения редки, но потенциально опасны; описаны единичные случаи абдоминального компартмент-синдрома, острого панкреатита, кишечной ишемии и ЖКТ-кровоотечений (<0,1%) [44,131]. Синдром верхней брыжеечной артерии после значимой коррекции деформации встречается с частотой 0,013–0,78% (до 4,7% по отдельным данным) [92,114,121], типично в первые две недели после операции [92,94], и описаны как ранние, так и поздние случаи [121]; клинические проявления и патогенез отражены в работах [53]. Частота псевдоартроза составляет 1,4% при идиопатическом сколиозе, 2,2% при нейромышечных сколиозах и до 6,3%

у взрослых; описаны факторы риска и влияние протяжённости фиксации [63]. Псевдоартроз является одной из причин ревизий [96] и тесно связана с механической нестабильностью конструкции, включая поломки стержней [30].

Синдромы смежного уровня также являются важным источником поздних осложнений. Проксимальный переходный кифоз (Proximal Junctional Kyphosis или PJK) определяется как увеличение проксимального переходного угла между верхним инструментированным позвонком (UIV - upper instrumented vertebra) и позвонком на два уровня выше (UIV+2) на $\geq 10^\circ$ по сравнению с дооперационным значением [147]; при подростковом идиопатическом сколиозе частота PJK составляет около 15,6% [34], у взрослых – 20–40% [86]. Проксимальная переходная недостаточность (Proximal Junctional Failure, PJF) – клинически значимый вариант PJK, включающий структурный отказ на проксимальном смежном уровне (например, перелом позвонка UIV/UIV+1, нестабильность металлоконструкции и др.) и нередко требующий ревизионного вмешательства [85,153]; у взрослых распространённость PJF варьирует от 1,4% до 19% (до 23% в отдельных сериях) [85,117], большинство случаев выявляется в первые 2 года наблюдения [117,120], тогда как у подростков PJF встречается редко (<3%) [68].

Дистальный переходный кифоз (Distal Junctional Kyphosis, DJK) и дистальная переходная недостаточность (Distal Junctional Failure, DJF) относятся к осложнениям на нижней границе фиксации; они определяются как изменения угловых параметров ниже нижнего инструментированного позвонка (LIV, Lower Instrumented Vertebra) [151]. Частота DJK при ИС варьирует от 0,2% до 15%, а суммарно по мета-анализу достигает около 14% [66]. Феномен «adding-on» (или синдром включения) – появление деформации вне зоны инструментарии, там, где ее ранее не отмечалось, также встречается примерно в 14% случаев [155]. Хроническая послеоперационная боль при ИС описана в диапазоне 12–42% [48,157]; при этом предоперационная боль

отмечалась более чем у 77% пациентов, а у части пациентов сохранялась и через год [83]. У взрослых хронический болевой синдром после коррекции деформаций сохраняется у 20–30% пациентов [26,39].

Далее в работе неврологические и имплант-ассоциированные осложнения, включая мальпозиции транспедикулярных винтов, рассматриваются более подробно.

1.5 ТЕХНИКА «FREE-HAND» ИМПЛАНТАЦИИ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ.

Техника «free-hand» является одним из наиболее распространённых подходов к установке транспедикулярных винтов и основана на использовании анатомических ориентиров и инструментальной пальпации при формировании канала в корне дуги позвонка. Её преимущества связаны с доступностью и независимостью от дополнительного оборудования; в то же время точность установки в значительной степени определяется анатомией, выраженностью деформации и опытом хирурга.

Ряд исследований показывает, что опыт хирурга и «кривая обучения» оказывают значимое влияние на точность установки транспедикулярных винтов, особенно на этапе освоения методики. В начале применения «free-hand» техники и навигационных технологий частота мальпозиций выше, затем по мере накопления опыта показатели точности выходят на плато и становятся стабильными. Показано, что наиболее опытные хирурги демонстрируют более низкую частоту медиальных перфораций при сопоставимой общей точности установки винтов по сравнению с менее опытными коллегами. После достижения определённого объёма операций (десятки–сотни вмешательств) дальнейшее снижение частоты мальпозиций в большей степени определяется анатомическими факторами и используемой технологией, чем стажем хирурга [88,97,126].

1.6 МАЛЬПОЗИЦИИ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ: ЧАСТОТА, ОЦЕНКА, КЛИНИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ.

Коррекция сколиоза с помощью задней полисегментарной транспедикулярной фиксации значительно улучшает результаты лечения, однако связана с риском различных имплант-ассоциированных осложнений. Мальпозиция винта может являться причиной имплант-ассоциированных осложнений и встречается по данным литературы с частотой от 1,5% до 50,0% при использовании «free-hand» техники [17,62,126]. Такой разброс данных может быть связан с тем, что в настоящее время не существует общепризнанного стандартизированного подхода к оценке точности установки транспедикулярных винтов, равно как и к определению того, что считать «неправильной установкой» винта [24].

Кроме того, КТ рутинно не используется для послеоперационного контроля, и многие бессимптомные мальпозиции могут быть не учтены, так как при стандартной рентгенографии в прямой и боковой проекциях не всегда удаётся достоверно оценить положение транспедикулярных винтов [46]. Известно, что риск мальпозиций прямо коррелирует с тяжестью деформации, в результате чего частота мальпозиций может быть высокой у отдельной категории пациентов, но оставаться относительно низкой в среднем [10].

В мета-анализе, проведённом Kosmopoulos и Schizas [77], обсуждался вопрос точности имплантации винтов: авторы выявили 35 различных методов – от рентгенологического контроля до КТ и секционных исследований на основании 130 статей. Позднее Aoude и соавт. выполнили систематический обзор аналогичной тематики, причём полученные ими результаты оказались более однородными [25]. Однако даже в этом обзоре из 68 проанализированных статей только в 37 (54%) использовалась единая методика оценки точности: компьютерная томография с расчётом степени выхода винта за пределы кортикального слоя корня дуги позвонка с шагом в 2 мм. При этом не учитывалось конкретное направление перфорации и дистанция от винта до критически важных анатомических структур. В

большинстве работ смещение до 2 мм считалось безопасным, а превышение данного значения нежелательным. Менее распространённым подходом (16 статей, 24%) являлось деление на две категории: винт «правильно установлен» (in) или «неправильно установлен» (out). Некоторые авторы относят винт к категории «in» лишь при полном его расположении внутри костного канала, тогда как другие допускают выход за границы канала не более чем на 25% диаметра винта.

Хотя подобные схемы относительно просты в применении (как при интраоперационной, так и при послеоперационной КТ), они не отражают клинической значимости мальпозиции, что в итоге и должно лежать в основе оценки безопасности. С этой целью Sarwahi и соавт. предложили иную классификацию, ориентированную на определение потенциальной клинической опасности при неправильном положении винта с учётом направления мальпозиции и близости к критическим структурам [129]. Авторы выделили четыре категории:

- Accurately Placed (AP) – винт полностью в пределах костных границ корня дуги позвонка;
- Benign Misplacement (BMP) – винт проходит за кортикальный слой, но не представляет угрозы для важных анатомических образований;
- Indeterminate Misplacement (IMP) – медиальное смещение на 2–4 мм либо латеральное или переднее с сохранением расстояния от 1 до 2 мм до структур риска;
- Screw at Risk (SAR) – медиальная перфорация более 4 мм или латеральное/переднее отклонение с зазором менее 1 мм до жизненно важных органов (аорты, пищевода, трахеи и др.).

Такой подход учитывает, что медиальное смещение до 2 мм обычно не приводит к неврологическим последствиям, а неврологический дефицит обычно описывается лишь при смещениях свыше 4 мм [56,62,91,111,126]. Кроме того, в данной системе предусмотрен учёт риска при переднелатеральном отклонении винта, если он оказывается близко к сосудам

или другим важным органам. Тем не менее пороговое значение <1 мм для включения в категорию SAR при латеральном или переднем выходе остаётся дискуссионным. Например, в одной из серии наблюдений, в девяти случаях 33 винта фактически соприкасались с крупными сосудами (аорта, подвздошные артерии, подвздошные вены), однако за 9 лет у пациентов не возникло сосудистых проблем, включая псевдоаневризмы [24]. С другой стороны, в литературе существуют единичные описания формирования псевдоаневризм или эрозий стенки аорты под давлением винта [27,69], указывающие, что полностью исключать тяжёлые сосудистые осложнения нельзя.

Таким образом, дальнейшая стандартизация методик оценки точности имплантации винтов является важной задачей для объективной оценки безопасности данной технологии. Идеальная классификация должна быть одновременно лёгкой в использовании, воспроизводимой и отражать клинически значимые аспекты неправильной установки, что в конечном итоге будет более полезным для принятия решений о необходимости коррекции положения винта при его выявлении.

1.6.1 МЕДИАЛЬНЫЕ МАЛЬПОЗИЦИИ.

Медиальная мальпозиция (ММ) развивается при повреждении винтом медиальной стенки корня дуги позвонка и выходе его в позвоночный канал, что может приводить к травме или компрессии невральных структур, а также к образованию эпидуральной гематомы. Если винт проходит через корешковое отверстие, возможно развитие радикулопатии (рис. 1.6.1.1).

Согласно данным литературы, частота нейрососудистых осложнений, связанных с мальпозицией при идиопатическом сколиозе, может достигать 1,8% [17,35,62]. Поскольку ряд исследований анализирует только ранние осложнения, существует вероятность недооценки поздних неврологических последствий, возникающих при медиальной мальпозиции. Так, в работе Mac-Thiong и соавт. [98] отмечается, что отсроченный неврологический дефицит

может развиваться вследствие ММ даже у пациентов, не имевших неврологических нарушений сразу после операции.

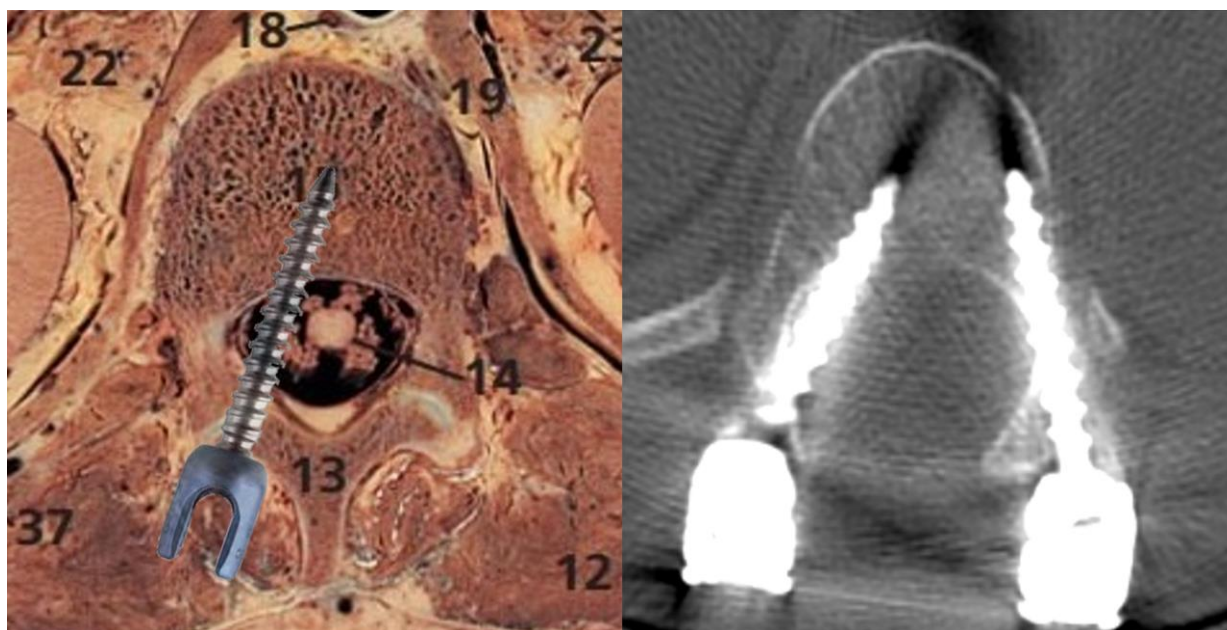


Рис. 1.6.1.1. Топография органов грудной клетки на уровне грудного отдела позвоночника. Пример ММ.

Parin и соавт. [113] описали клинический случай отсроченной неврологической симптоматики, ассоциированной с ММ до 4 мм на уровнях Th8 и Th10 у пациентки после операции по поводу идиопатического сколиоза (исходный Cobb 54°). Через 6 месяцев после первичной операции отмечались абдоминальный болевой синдром и неврологические нарушения (чувствительные расстройства и умеренная мышечная слабость 4-5 по шкале MRC). Ревизионное вмешательство выполнено через 8 месяцев: винты перепроведены; показательно, что соматосенсорные вызванные потенциалы (ССВП), отсутствовавшие до вмешательства на правой стороне, восстановились уже через 45 минут после удаления винтов, а клиническая симптоматика полностью регрессировала. Примечательно, что в данном наблюдении винты располагались на вогнутой стороне деформации вблизи вершины дуги, что потенциально повышает риск невралгических осложнений.

Leroy и соавт. [87] описали пример выраженных отсроченных неврологических осложнений, обусловленных выраженной ММ у 19-летнего пациента с тяжёлым правосторонним грудным сколиозом (Cobb 95°),

мальформацией Киари I типа и сирингомиелией (С6–Т7). Коррекция выполнялась с применением «free-hand» техники. Интраоперационно на этапе установки стержней и корригирующих манёвров отмечено выраженное падение ССВП (до 95%); после частичного сброса коррекции показатели улучшились, однако сохранялось значимое снижение. В раннем послеоперационном периоде неврологического дефицита не отмечалось; контроль проводился только стандартной рентгенографией, на которой ММ не была диагностирована. Через шесть месяцев появились нарушения походки, эпизоды падений и задержка мочи; при осмотре выявлялась умеренная слабость (4-5 по MRC) и пирамидная симптоматика. КТ выявила выраженную медиальную мальпозицию винта на уровне Th5 с выстоянием в позвоночный канал, МРТ – увеличение сирингомиелической полости. Выполнено ревизионное вмешательство с удалением винта; в течение трёх месяцев наблюдался полный регресс неврологической симптоматики и восстановление нейрофизиологических показателей. Случай подчёркивает риск ММ и ограничения стандартной рентгенографии для диагностики подобных нарушений, особенно у пациентов группы высокого риска.

Вопрос о допустимой степени медиальной мальпозиции остаётся дискуссионным. Gertzbein, Robbins и соавт. относили ММ менее 4 мм к «безопасной зоне», поскольку не отмечали в таких случаях клинически значимых осложнений; однако их исследование выполнялось преимущественно у пациентов с травмами позвоночника [57]. Другие авторы предлагали иные пороговые значения: Kim и соавт. [74] выделяли «безусловно безопасную зону» при перфорации медиальной стенки до 2 мм, «вероятно безопасную зону» при смещении 2–4 мм и «сомнительную безопасную зону» при выходе 4–8 мм.

Во многих исследованиях не учитывается смещение спинного мозга на различных уровнях деформации, что может играть решающую роль в развитии неврологических осложнений (рис. 1.6.1.2). Burger и соавт. на основании МРТ 73 пациентов со сколиотической деформацией установили, что у большинства

(69,9%) на вогнутой стороне вершинного грудного позвонка расстояние от спинного мозга до медиальной стенки корня дуги составляло менее 2 мм. Более чем у половины таких пациентов схожие показатели выявлялись и на уровне, расположенном выше или ниже вершины искривления, а у более чем 25% на двух уровнях выше и ниже [35].

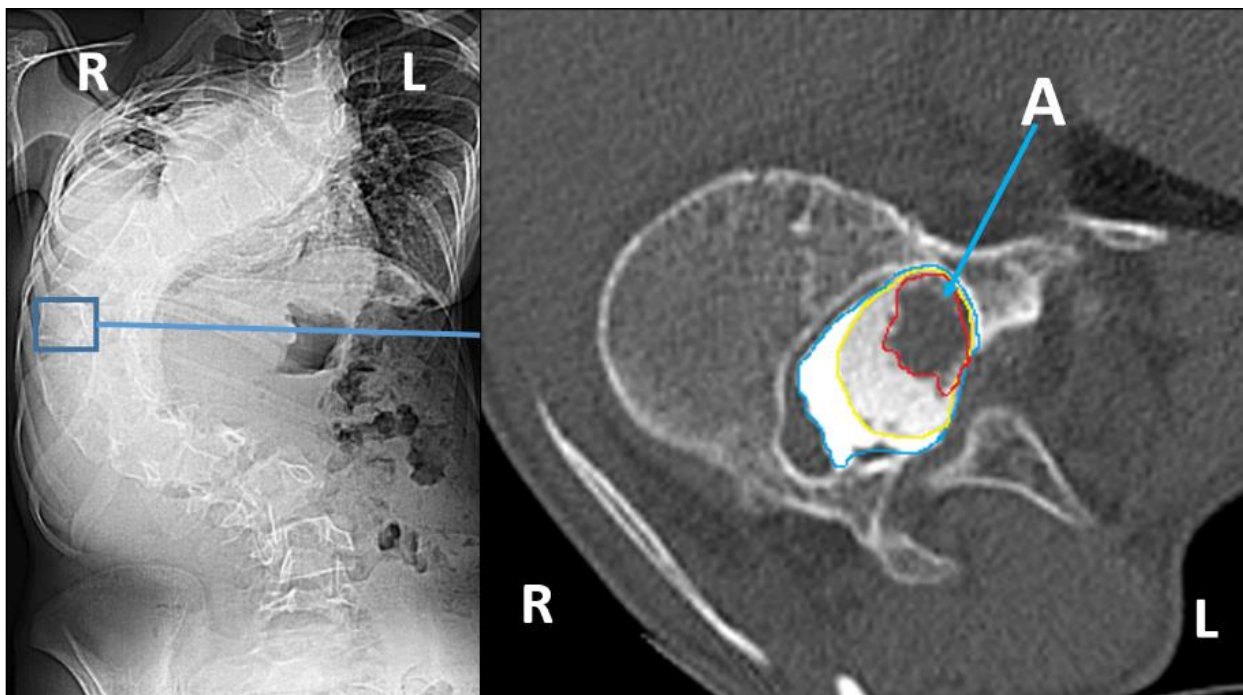


Рис. 1.6.1.2. Смещение структур позвоночного канала в вогнутую сторону деформации. А - спинной мозг на уровне Th11 позвонка (миелография).

1.6.2 ПЕРЕДНИЕ И ЛАТЕРАЛЬНЫЕ МАЛЬПОЗИЦИИ.

Передние мальпозиции (ПМ) при прободении винтом тела позвонка спереди могут приводить к кровотечению, образованию гематом, эрозии стенки сосуда или формированию псевдоаневризм, поскольку спереди от позвоночника располагаются крупные сосуды [111] (примеры рис. 1.6.2.1; 1.6.2.2). Повреждения магистральных сосудов при ТПФ встречаются с частотой 0,01%; ещё реже встречаются повреждения аорты, однако летальность в этом случае может достигать 65% [91]. Jiang и соавт. (2012) провели анализ взаиморасположения аорты с телом позвонка при сколиозе на различных уровнях и сообщили, что наибольший риск повреждения аорты был на уровне Th5 и Th11 позвонков [25].

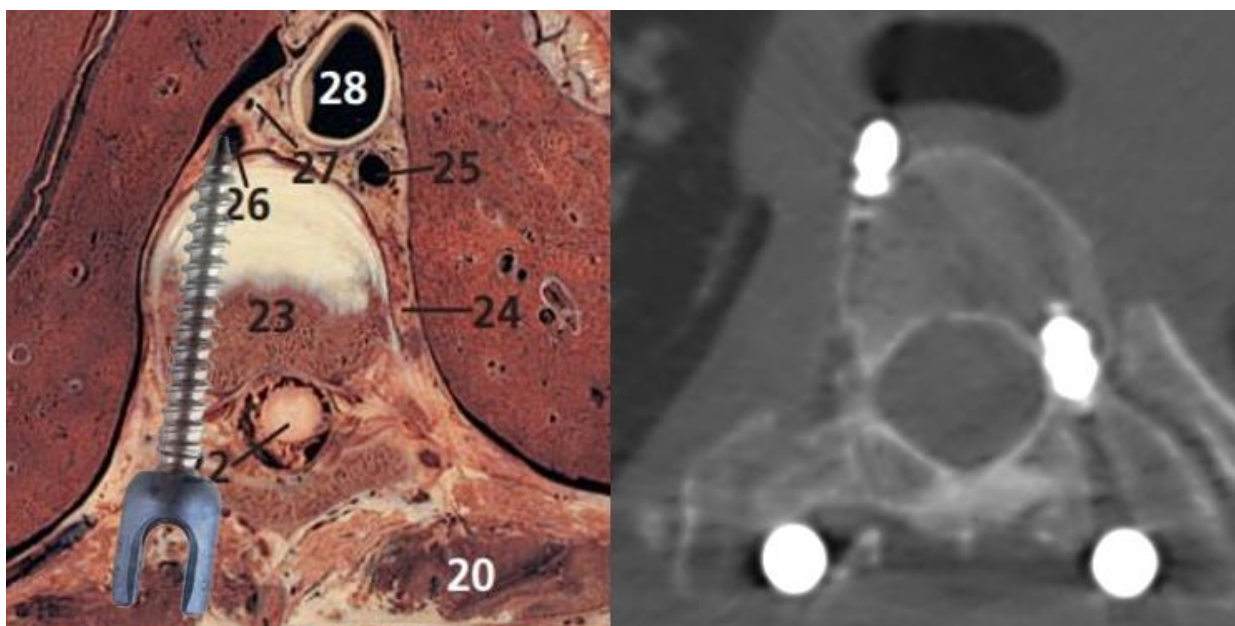


Рис. 1.6.2.1. Топография органов грудной клетки на уровне грудного отдела позвоночника. Пример ПМ.

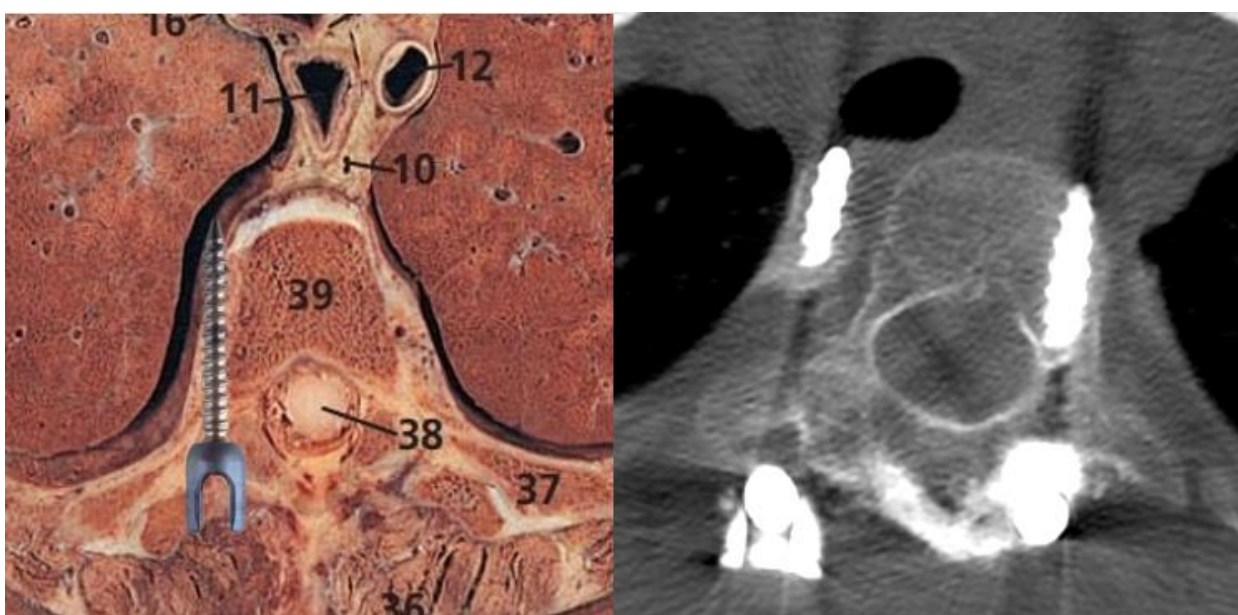


Рис. 1.6.2.2. Топография органов грудной клетки на уровне грудного отдела позвоночника. Пример ЛМ.

Изменения анатомии, а также смещение грудной аорты кзади и в латеральном направлении при правосторонних дугах способствуют тому, что даже умеренная или тяжёлая мальпозиция винта может привести к контакту с сосудом или его перфорации [94,130,136]. Несмотря на то что подобные имплант-ассоциированные поражения аорты в спинальной хирургии наблюдаются нечасто (до 0,01%), летальность при этом доходит до 65%

[72,127,140]. Как указывают Кауаси и соавт., доступные сведения по данной теме ограничены, а терминология, используемая для описания взаимоотношений между винтом и стенкой аорты, остаётся неоднозначной [72]. В литературе встречаются определения «aortic abutment» (соприкосновение), «impingement» (сдавление), «encroaching» (вторжение) и «penetration» (перфорация) [148].

Marouby и соавт. [99] приводят пример тяжёлого потенциального осложнения при передне-латеральном смещении винта у пациентки с выраженной коморбидностью (синдром Ретт, ранее выполненная фундопликация по Ниссену). В 12-летнем возрасте выполнена коррекция нейрогенного сколиоза с установкой винтов по технике «free-hand». В раннем периоде осложнений не отмечалось; контрольная рентгенография была выполнена только в прямой проекции. Спустя 3 года при эндоскопическом исследовании, проводившемся по другому поводу, выявлено, что один из винтов (Th4 справа) перфорирует пищевод, а винты на уровнях Th5 и Th6 располагаются в опасной близости к аорте; при этом клинические признаки медиастинита, инфекционных осложнений или дисфагии отсутствовали. С учётом тяжести общего состояния принято решение о консервативном ведении (антибиотикопрофилактика, наблюдение); в последующем длительном периоде выраженных осложнений не зарегистрировано. Данное наблюдение демонстрирует, что передне-латеральные мальпозиции могут длительно протекать бессимптомно, особенно у пациентов, ограниченно предъявляющих жалобы, однако потенциальный риск жизнеугрожающих осложнений сохраняется.

Таким образом, даже при отсутствии явной клинической симптоматики передние и латеральные мальпозиции могут представлять потенциально опасное состояние, способное приводить к сосудистым и висцеральным осложнениям. Это подчёркивает необходимость точного планирования траектории и длины винтов и объективного контроля их положения у пациентов из групп риска.

Таким образом, значимость мальпозиций определяется не только величиной выхода винта за пределы кортикального слоя корня дуги и тела позвонка, но и направлением отклонения, уровнем фиксации, стороной деформации и близостью к критически важным структурам. Отсутствие симптомов в ранние сроки не исключает поздней клинической манифестации осложнений, что усиливает требования к точности имплантации и объективности контроля положения винтов. В связи с этим дальнейший анализ литературы закономерно переходит к рассмотрению подходов, направленных на повышение точности установки транспедикулярных винтов и снижение частоты клинически значимых мальпозиций.

1.7 АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Аддитивные технологии (3D-печать) в хирургии позвоночника рассматриваются как одно из направлений повышения точности и воспроизводимости вмешательств за счёт создания пациент-специфических физических объектов, полученных на основании данных КТ. В контексте хирургической коррекции деформаций позвоночника у детей и подростков наибольшее практическое значение имеют два подхода: печать анатомических 3D-моделей для предоперационного планирования и интраоперационной ориентации, а также изготовление пациент-специфических направляющих шаблонов, задающих планируемую траекторию прохождения канала в области корней дуг и введения транспедикулярных винтов [158].

Печать анатомических моделей позвоночника при деформациях решает прежде всего задачу улучшения пространственного понимания индивидуальной патологической анатомии: выраженной ротации позвонков, асимметрии корней дуг, особенностей дуг и отростков, а также взаимоотношений элементов заднего опорного комплекса. На практике модели используют для: уточнения уровней фиксации, предварительного подбора длины и диаметра винтов, планирование предполагаемых траекторий (в том числе с использованием спиц или макетов направителей), симуляции этапов установки, обучения и командного обсуждения плана операции.

Принципиально важно, что модели могут быть полезны именно в тех клинических ситуациях, где визуальная оценка по 2D-изображениям недостаточна (тяжёлые и ригидные деформации, выраженная торсия, аномалии развития) [37].

Отдельного упоминания заслуживает вопрос точности самих распечатанных моделей: в исследованиях, где сравнивали параметры цифровой модели и физического изделия, показана высокая геометрическая воспроизводимость при соблюдении корректной сегментации и настроек печати (погрешности обычно измеряются в долях миллиметра), что поддерживает их применение как инструмента предоперационного планирования и демонстрации анатомии [37].

Ограничения подхода связаны с тем, что модель не учитывает интраоперационные изменения после мобилизации, остеотомий и деротационных манёвров, а также не заменяет контроль фактической траектории канала в корне дуги [137].

Пациент-специфические шаблоны создаются по данным КТ с учётом планируемых траекторий винтов и проектируются таким образом, чтобы точно соответствовать задним костным структурам, задавая направление инструмента через направляющие каналы. В классических работах описаны “fit-and-lock” конструкции, предназначенные для жёсткой фиксации шаблона на костных структурах и пошагового формирования канала под винт.

Данные литературы демонстрируют, что применение 3D-печатных шаблонов повышает точность установки винтов и снижает частоту значимых мальпозиций, особенно в анатомически сложных сегментах и при деформациях [89,101]. В проспективном рандомизированном исследовании у пациентов с деформациями позвоночника показано преимущество пациент-специфических 3D-печатных направителей по сравнению с «free-hand» техникой имплантации ТПВ [93].

Таким образом, аддитивные технологии в хирургии деформаций позвоночника решают две взаимодополняющие задачи: улучшение

предоперационного планирования и пространственной ориентации (3D-модели) и повышение воспроизводимости траекторий введения винтов (пациент-специфические шаблоны). При этом наибольший потенциальный эффект ожидается при тяжёлых деформациях. Ограничения метода определяют необходимость селективного применения и сопоставления с другими подходами повышения точности, которые будут рассмотрены в следующих разделах обзора литературы.

1.8 КТ-НАВИГАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Для снижения риска неправильного позиционирования транспедикулярных винтов и минимизации числа осложнений всё шире применяются интраоперационная КТ-навигация, позволяющая хирургу в реальном времени контролировать траекторию введения имплантов [95]. Во время операции используется мобильная КТ (O-arm или аналог), делающая серию снимков оперируемой зоны. На основании полученных данных строится трёхмерная реконструкция позвоночника в режиме реального времени. На пациента (чаще всего на остистые отростки) крепится референтная метка. Навигационная система улавливает положение этой метки и инструментов с помощью инфракрасных камер (технология «motion capture»). Таким образом, компьютер отображает координаты позвоночника и инструмента в реальном времени. Хирург на экране видит виртуальную модель позвоночника и позицию инструмента в трёхмерном пространстве. При установке винта система показывает предполагаемую траекторию его введения в реальном времени, позволяя избежать критического выхода за границы позвонка. В случае обнаружения отклонений, хирург может мгновенно скорректировать направление инструмента.

Множество исследований показывают, что интраоперационная КТ-навигация значительно повышает точность установки ТПВ по сравнению с традиционной установкой под контролем флюороскопии или «free-hand». В работе Li и соавт. (2024) , 96,3% винтов, установленных с навигацией, были в пределах ножки дуги позвонка против 88,6% при применении «free-hand» ($p <$

0,005) [88]. Другие исследования подтверждают эти цифры по данным Rawicki и соавт. (2021), при навигации лишь около 4,6% винтов имеют мальпозицию >2 мм, тогда как без навигации частота мальпозиций порядка 16% ($p < 0,001$) [122]. В систематическом обзоре Baldwin и соавт. (2021) также был сделан вывод о повышении точности положения ТПВ при использовании КТ-навигации в 3 раза [28]. По данным Suri и соавт. (2024) применение КТ-навигации позволяет достичь существенно более высокой точности положения ТПВ по сравнению с традиционными методиками (2D-флюороскопией и техникой «free-hand») – 94,0% против 84,47% соответственно ($p=0,03$) [139]. В отдельных сериях при КТ-навигации сообщается о крайне высокой точности установки винтов [109].

Влияние навигации на длительность операции оценивается по-разному. Большинство источников указывают, что использование КТ-навигации несколько увеличивает время вмешательства из-за дополнительного этапа сканирования и регистрации. По данным литературы, навигация удлиняет среднее время операции примерно на 30 минут по сравнению с традиционными методами (без существенной разницы в кровопотере) [28]. В исследовании Suri и соавт средняя продолжительность операций с использованием КТ-навигации составила 256,1 мин., тогда как в группе сравнения («free-hand» и 2D-флюороскопия) этот показатель был несколько ниже – 238,4 мин., однако разница не была статистически значимой ($p=0,66$) [139]. Основной причиной увеличения времени является подготовка и регистрация навигационной системы, установка и контроль референсных маркеров, что нивелирует потенциальное сокращение времени на непосредственную установку винтов. Однако имеются данные, что при освоённой технике навигация может ускорять установку каждого винта и даже сокращать общее операционное время [122]. Эти различия могут объясняться уровнем опыта бригады и использованием навигации в сложных случаях – навигация экономит время при трудной анатомии, несмотря на затраты времени на подготовку. Также КТ-навигации описаны факторы риска

отклонения траектории винтов (уровень, морфология, сложность сегмента) [71].

Доза облучения, получаемая пациентом, при навигации на основе КТ может отличаться от таковой при традиционной флюороскопии. Интраоперационный 3D-скан даёт разовую относительно высокую дозу, тогда как при флюороскопии пациент подвергается серии менее мощных экспозиций. В результате одни исследования отмечают, что суммарная эффективная доза при навигации немного выше (хотя разница статистически незначима) [28,139] или значимо выше, особенно в случаях, когда при «free-hand» используется минимальное количество снимков [88]. С другой стороны, при большом количестве винтов навигация способна уменьшить общее облучение за счёт отказа от множества отдельных рентген-снимков. В целом, для пациента КТ-навигация обеспечивает сопоставимую либо несколько повышенную лучевую нагрузку по сравнению с обычной флюороскопией, в зависимости от протокола и сложности случая.

Для оперирующей бригады применение навигации однозначно выгодно с точки зрения радиационной безопасности. При традиционной флюороскопии хирург и ассистенты подвергаются рассеянному излучению при каждом рентген-контроле, что приводит к накоплению дозы. В то же время навигация позволяет персоналу покинуть операционную на время 3D-сканирования, практически устраняя их прямое облучение. Данные Li и соавт. подтверждают резкое снижение дозы для хирургов: в группе где применялась КТ-навигация зафиксирована в разы меньшая экспозиция, чем при работе с обычной С-дугой ($p < 0,005$) [88]. Таким образом, КТ-навигация значительно повышает безопасность проведения оперативного вмешательства для операционной бригады за счет практически полного отсутствия лучевой нагрузки.

Экономическая целесообразность внедрения КТ-навигации в хирургии позвоночника является предметом дискуссий. С одной стороны, навигационные системы требуют дорогостоящего оборудования и обучения,

что увеличивает прямые затраты на операцию. По оценкам, закупка интраоперационного КТ (O-arm) и навигационной станции – крупная инвестиция, которая не окупится при малом объёме операций. С другой стороны, повышение точности установки винтов может сокращать расходы в долгосрочной перспективе за счёт уменьшения осложнений, повторных ревизионных операций и госпитализаций. Существуют данные об экономии около 71 тыс. долл. на 100 пациентов при использовании навигации по сравнению с традиционной техникой, благодаря снижению частоты ревизий и осложнений [112].

Таким образом, несмотря на очевидные преимущества КТ-навигации в повышении точности хирургических вмешательств, остаются нерешёнными вопросы, касающиеся влияния данных систем на продолжительность операций и суммарную лучевую нагрузку. Более того, отсутствие значимых различий в частоте осложнений и ревизий указывает на необходимость дальнейших исследований, направленных на определение групп пациентов, которые получают максимальную пользу от применения данных технологий, а также на совершенствование систем навигации с целью сокращения времени их подготовки и регистрации.)

Дополненная реальность (ДР, Augmented Reality - AR) рассматривается как дальнейший этап развития интраоперационной КТ-навигации: технология накладывает виртуальные объекты на реальное операционное поле и потенциально улучшает ориентировку хирурга и точность манипуляций. В обзоре Ghaednia и соавт. (2021) подчёркнуто, что интеграция ДР с машинным зрением и ИИ может упростить регистрацию и повысить точность вмешательств в спинальной хирургии [58,149].

В отличие от виртуальной реальности, ДР отображает подсказки (траектории винтов, анатомические ориентиры) непосредственно в зоне вмешательства, снижая необходимость отвлекаться на отдельные мониторы, что особенно важно при малоинвазивных операциях с ограниченной

визуализацией и повышенными требованиями к точности установки транспедикулярных винтов [36].

К ограничениям относят высокую стоимость оборудования и систем трекинга [65,100], а также зависимость эффективности от процедуры регистрации и времени настройки; также описывается дискомфорт при длительном ношении ДР-гарнитур [119]. Данные о влиянии на длительность операции противоречивы: отмечаются как потенциальное сокращение за счёт уменьшения числа контрольных снимков, так и увеличение времени из-за настройки системы [51,106]. Перспективным направлением являются комбинации ДР с роботизированными платформами [65], а также применение ДР для планирования остеотомий, симуляции резекций опухолей и обучения [42,64].

По данным Zhang и соавт. (2022), «free-hand» техника связана с риском мальпозиций, 2D-флюороскопия ограничена по точности и сопровождается лучевой нагрузкой, тогда как роботизированные и компьютер-ассистированные системы точны, но дороги, громоздки, требуют подготовки и вынуждают хирурга переключать взгляд на внешний монитор [160]. Таким образом, ДР потенциально способна повысить точность установки транспедикулярных винтов и снизить лучевую нагрузку, однако высокая стоимость оборудования, требования к регистрации и обучение персонала пока ограничивают её широкое внедрение. Вместе с тем в РФ уже предпринимаются попытки внедрения ДР-решений в хирургическую практику; при этом в хирургии деформаций позвоночника у детей и подростков данная технология не применялась. В перспективе ДР может рассматриваться как возможная альтернатива (или дополнение) существующим навигационным подходам, в том числе с учётом потенциально меньших затрат по сравнению с системами интраоперационной КТ-навигации.

1.9 ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ.

Неврологические осложнения относятся к наиболее тяжёлым в хирургии позвоночника и могут варьировать от транзиторных чувствительных нарушений до выраженного моторного и сенсорного дефицита вплоть до параличей. При идиопатических деформациях риск неврологических осложнений составляет 0,3–4% [21], тогда как при нейрогенных – до 10,6% [52].

Исторически до внедрения интраоперационного нейрофизиологического мониторинга (ИОМ) основным способом контроля функции спинного мозга являлся «wake-up тест» Стагнара (описан в 1973 г., С. Vauzelle, P. Stagnara, P. Jouvinroux). Метод основан на кратковременном пробуждении пациента с выполнением простых двигательных команд и позволяет оценить сохранность грубой моторной функции, однако не обеспечивает сегментарной и мышечно-специфической оценки, не контролирует сенсорные пути и связан с организационными и анестезиологическими ограничениями.

С учётом ограничений wake-up теста и потребности в раннем выявлении угрожающих изменений в 1970-х годах получил развитие интраоперационный нейромониторинг (ИОМ) – комплекс методик оценки функции нервной системы во время операции, когда стандартный неврологический осмотр невозможен [73,134]. Основная цель ИОМ при коррекции сколиоза – раннее обнаружение признаков ишемии и повреждения спинного мозга, а также периферических нервов с возможностью немедленной коррекции тактики и профилактики необратимого дефицита [43,158]. ИОМ включает регистрацию активности проводящих путей спинного мозга, корешков и мышц [134]. Широкое внедрение ИОМ, прежде всего ССВП, связывают со снижением частоты необратимых неврологических осложнений при операциях по поводу сколиоза [116]. В многоцентровых исследованиях 1990-х годов применение только ССВП ассоциировалось со снижением частоты параплегии с 4–7% до

менее 1% [1]. В настоящее время при коррекции выраженных деформаций мультимодальный ИОМ, включающий несколько методик одновременно, рассматривается как стандарт, поскольку обеспечивает более надёжный контроль различных функциональных систем и демонстрирует высокую диагностическую эффективность [78].

Ключевые протоколы ИОМ включают следующие методики.

- SSEP (somatosensory evoked potentials, соматосенсорные вызванные потенциалы; ССВП) обеспечивают контроль преимущественно чувствительных путей, главным образом задних столбов. На практике критерием тревоги традиционно считают снижение амплитуды не менее чем на 50% и увеличение латентности не менее чем на 10% относительно исходных значений [116]. Ограничение метода заключается в том, что ССВП не контролируют напрямую двигательные проводники, поэтому при изолированном поражении передних отделов и пирамидных трактов изменения могут отсутствовать, несмотря на риск моторного дефицита [116,141]. При этом специфичность ССВП, как правило, высокая, а ложноположительные реакции относительно редки [78,141,142,146]. Чувствительность ССВП существенно варьирует: от 44% в общей популяции некоторых вмешательств до 95% в выборках подростков с идиопатическим сколиозом [84,123].
- Транскраниальные МЕР (motor evoked potentials, моторные вызванные потенциалы; МВП) являются основным инструментом контроля двигательных, в том числе пирамидных, путей [134,143,144]. Клинически значимыми изменениями обычно считают снижение амплитуды МВП более чем на 50–80% от исходного уровня или полную потерю ответа [31,49,124,144]. МВП, как правило, более чувствительны к угрожающему моторному дефициту, чем ССВП, и могут сигнализировать до формирования необратимой ишемии [78,134], что подчёркивается как ключевое преимущество метода [159,60]. По данным мета-анализов МВП демонстрируют высокие показатели

диагностической эффективности, включая чувствительность около 90% и специфичность более 90% [38]. В современной практике транскраниальные МВП часто рассматриваются как золотой стандарт мониторинга двигательной функции при коррекции деформаций [31,150]. ТсМЕР (transcranial motor evoked potentials, транскраниальные моторные вызванные потенциалы) является распространённым обозначением транскраниальной методики регистрации МВП.

- D-wave (D-волна, прямая волна кортикоспинального тракта) представляет собой регистрацию прямого ответа от кортикоспинальных трактов с использованием эпидурального электрода и позволяет оценивать структурную целостность пирамидных путей; метод менее зависим от состояния мышц и устойчивее к влиянию анестезии [161]. Однако из-за технической сложности он применяется ограниченно и чаще в нейрохирургии; при коррекции деформаций используется в отдельных центрах как дополнение к МЕР [22,47].
- Спонтанная ЭМГ (electromyography, электромиография) применяется для выявления раздражения корешков при манипуляциях и установке винтов, однако характеризуется низкой специфичностью и частыми ложноположительными сигналами, поэтому в качестве единственного метода не может рассматриваться как надёжный диагностический критерий клинически значимой мальпозиции [32].
- Триггерная ЭМГ (triggered electromyography, t-EMG, триггерная электромиография, Т-ЭМГ) и nerve-proximity тест (тест близости к нервным структурам) основаны на стимуляции зонда или винта с регистрацией мышечного ответа [29]; в мета-анализе Mikula и соавт. (2016) чувствительность метода составила около 78%, а специфичность – 94% [105]. В качестве практического порога часто рассматривают диапазон 10–12 мА для выявления медиального прободения при стандартной длительности импульса [105]; дополнительные данные подтверждают диагностическую значимость низких порогов, в

частности 8–10 мА в поясничном отделе, как маркера опасной близости к корешку [156]. В ряде наблюдательных серий применение Т-ЭМГ ассоциировано со снижением частоты медиальных прободений и повторных вмешательств [105,115,118].

Наиболее эффективным является мультимодальный подход, по крайней мере сочетание ССВП и МВП, поскольку методы взаимодополняют друг друга и снижают риск ложноотрицательных результатов [78].

Анализ литературы показывает, что транспедикулярная фиксация остаётся основой хирургической коррекции сколиоза у детей и подростков, а безопасность вмешательства во многом определяется точностью формирования канала в корне дуги и позиционирования винтов. При этом данные о частоте мальпозиций и их клинической значимости неоднородны, что связано с различиями в методах контроля, критериях оценки и используемых классификациях, а также неполным учётом направления отклонения и близости к критически важным структурам.

Вместе с тем, несмотря на развитие КТ-навигации и аддитивных технологий, отсутствуют единые клинические критерии определения необходимости их применения, унифицированная клинически ориентированная классификация мальпозиций, модели риска и алгоритмы принятия решений при выявлении различных типов мальпозиций. Эти обстоятельства определили необходимость комплексного исследования, направленного на оценку точности различных методик установки винтов и изучение факторов риска мальпозиций для оптимизации тактики спондилодеза при хирургической коррекции сколиотических деформаций у детей.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Общая характеристика пациентов, дизайн исследования.

Данное исследование проводилось на базе нейроортопедического отделения с ортопедией (зав. отделением – д.м.н., Жердев К.В.) Федерального государственного автономного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр здоровья детей» Министерства здравоохранения Российской Федерации (директор – д.м.н., профессор Фисенко А.П.). А также на базе 7 отделения патологии позвоночника (зав. отделением – д.м.н. Швецов В.В.) Федерального Государственного Бюджетного Учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (директор – д.м.н., член корреспондент РАН Назаренко А.Г.) согласно соглашению о научно-практическом сотрудничестве.

Для исследования нами было проанализировано 120 детей (2193 транспедикулярных винта), прооперированных с применением транспедикулярной фиксации в период с 2010 по 2025 год, средний срок наблюдения составил 32 ± 3 послеоперационных месяца.

Критерии включения:

- сколиотическая деформация грудного и поясничного отделов позвоночника, требующая оперативного лечения;
- возраст с 8 до 17 лет;
- неэффективность консервативных методов лечения сколиотической деформации;
- отсутствие противопоказаний к хирургической коррекции деформации позвоночника.

Критерии невключения:

- отсутствие послеоперационной рентгенологической картины;
- тяжелое соматическое состояние пациента, не позволяющее выполнить оперативное лечение.

В соответствии с дизайном двунаправленного (ретро- и проспективного) исследования, представленному на рисунке 2.1.3. нами были набраны три группы пациентов:

- контрольная группа («free-hand») включала 45 пациентов, оперированных с применением стандартной техники установки транспедикулярных винтов.
- I группа («3D-технологии») состояла из 30 пациентов, у которых установка транспедикулярных винтов проводилась с использованием индивидуально изготовленных на основе КТ-данных пациентов 3D моделей позвоночника/шаблонов для имплантации ТПВ, полученных методом аддитивных технологий (3D-печати).
- II группа («КТ-навигация») включала 45 пациентов, которым оперативное лечение выполнялось с применением интраоперационной компьютерной томографической навигации для контроля точности установки винтов.

Как отмечено в разделе 1.5 влияние опыта хирурга на точность установки винтов наиболее выражено на этапе формирования «кривой обучения» и существенно уменьшается после накопления достаточного числа вмешательств. В настоящем исследовании в контрольной группе («free-hand») и в группе с применением аддитивных технологий и КТ-навигации, операции выполнялись опытными спинальными хирургами со стажем более 20 лет, находящимися далеко за пределами начального этапа освоения техники имплантации ТПВ. Таким образом, различия между группами обусловлены преимущественно используемой технологией имплантации, а не стадией кривой обучения или уровнем базового опыта хирургов.

В контрольной группе доля лиц женского пола составила 73,3% (n = 33), мужского – 26,7% (n = 12). В группе I доля пациентов женского пола составила 73,3% (n = 22), мужского – 26,7% (n = 8). В группе II пациенты женского пола – 53,3% (n = 24), мужского – 46,7% (n = 21). Статистически значимых

различий по половому составу между группами выявлено не было ($p = 0,082$, рис. 2.1.1).

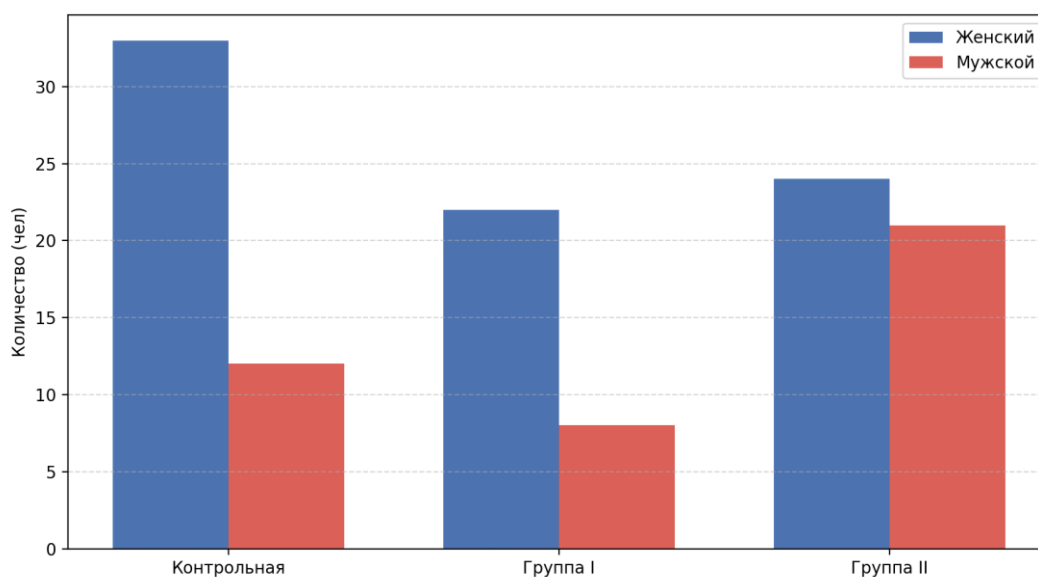


Рис. 2.1.1. Распределение пациентов по полу в исследуемых группах.

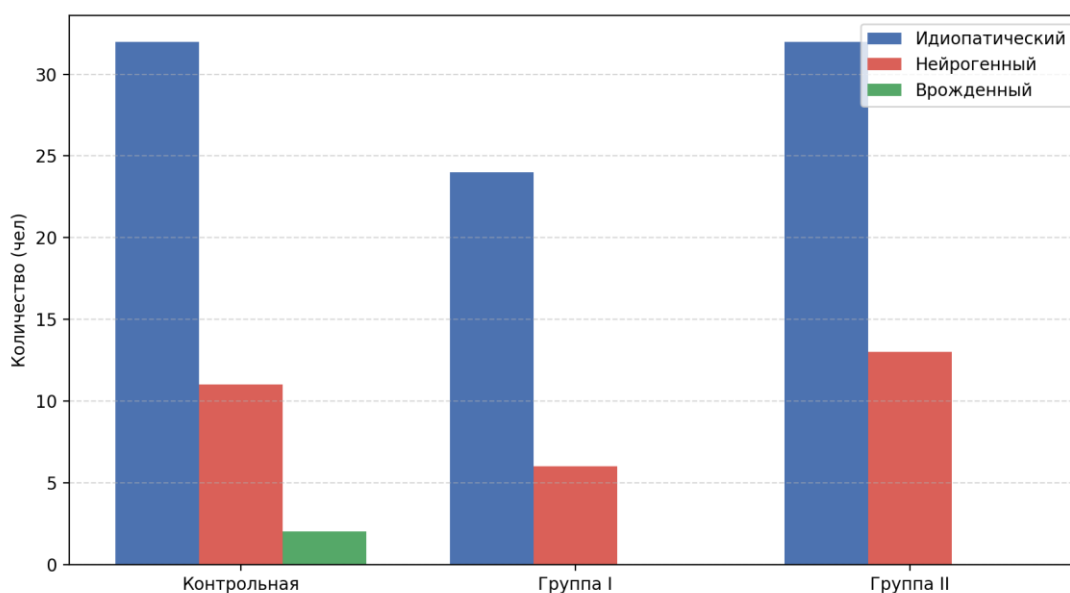


Рис. 2.1.2. Распределение пациентов по этиологии деформации в исследуемых группах.

По этиологии деформации во всех группах преобладал идиопатический сколиоз: 71,1% ($n = 32$) в контрольной группе, 80,0% ($n = 24$) в группе I и 71,1% ($n = 32$) в группе II. 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 исследуемыми группами не было выявлено ($p = 0,386$, рис. 2.1.2).

Медианный возраст пациентов в контрольной группе составил 14,0 [12,0; 16,0] лет, в группе I – 16,0 [12,0; 17,0] лет, в группе II – 14,0 [13,0; 16,75] лет. Достоверных различий по возрасту между группами также не выявлено ($p = 0,583$).

Таким образом, сформированные группы были статистически сопоставимы по основным демографическим и клинико-этиологическим характеристикам. Всем пациентам выполнено комплексное предоперационное обследование, включавшее клинический осмотр, МРТ, КТ, рентгенографию позвоночника в прямой и боковой проекциях. В послеоперационном периоде проводилась стандартная рентгенография позвоночника, а также выполнялась компьютерная томография для оценки точности установки винтов и выявления возможных осложнений. Основными параметрами оценки являлись частота, характер и клиническая значимость мальпозиций винтов, структура осложнений, а также необходимость ревизионных вмешательств.



Рис. 2.1.3. Дизайн исследования.

2.2 ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.2.1 Рентгенография

Всем пациентам выполнялись стандартные спондилограммы позвоночника от С1 до S5 позвонка в положении стоя (при невозможности – в положении сидя). Для оценки мобильности деформации и сопоставления с интраоперационными условиями дополнительно проводились рентгенограммы в положении лёжа (рис. 2.2.1.1).

Основным показателем являлся угол деформации по Cobb. В прямой проекции определялись верхний и нижний нейтральные позвонки основной дуги сколиоза; через их замыкательные пластинки проводились линии и перпендикуляры, угол между которыми фиксировался как величина деформации.

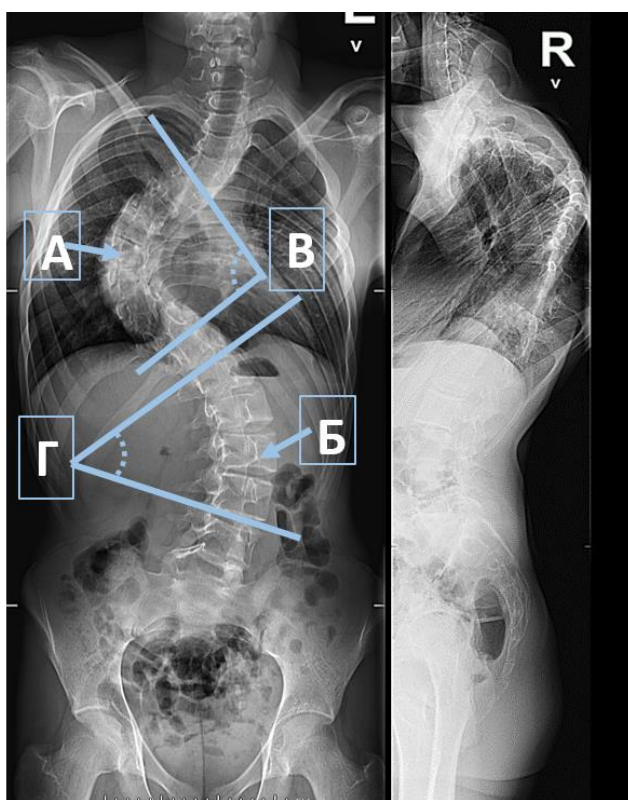


Рис. 2.2.1.1. А – вершина основной дуги; Б – вершина дополнительной дуги; В – величина деформации основной дуги по Cobb; Г – величина деформации дополнительной дуги по Cobb

В анализ включались:

- величина основной дуги до и после операции,

- локализация и характеристики вершин деформации
- изменение углов Cobb в послеоперационном периоде как критерий эффективности коррекции.

Сагиттальные параметры (грудной кифоз, поясничный лордоз, глобальный баланс туловища) также оценивались рутинно, однако в данное исследование они не были включены как отдельный объект статистического анализа.

2.2.2 Компьютерная томография.

Всем пациентам выполнялась компьютерная томография (КТ) позвоночника от C7 до S5 позвонка в положении лёжа на спине.

Дооперационная КТ использовалась для детальной оценки анатомии позвоночника и параметров, потенциально влияющих на риск мальпозиций. Положение пациента лёжа наиболее близко соответствует интраоперационным условиям, поэтому измеренные параметры отражают реальные анатомические взаимоотношения в момент установки винтов.

Ротация вершинного позвонка определялась на аксиальных срезах как угол между перпендикуляром, восстановленным от остистого отростка, и линией, проведённой через центр тела позвонка (рис. 2.2.2.1).

- Для выполнения углубленного анализа в контрольной группе, для каждого позвонка, в который устанавливались транспедикулярные винты, фиксировались дополнительные параметры:
- сагиттальный наклон позвонка (угол отклонения замыкательной пластинки от горизонтальной линии);
- фронтальный наклон (угол во фронтальной плоскости);
- ротация (по вышеописанной методике);
- локализация относительно вершины основной или компенсаторной дуги;
- расположение винта по вогнутой или выпуклой стороне.

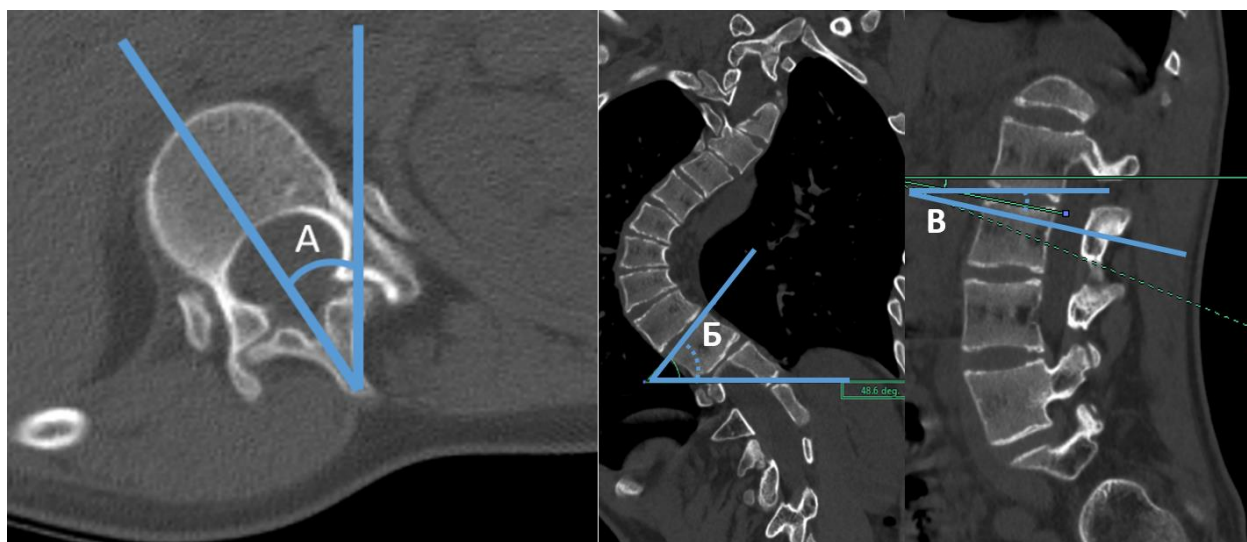


Рис. 2.2.2.1. А – определение ротации вершинного позвонка; Б – определение фронтального наклона позвонка; В – определение сагиттального наклона.

Послеоперационная КТ выполнялась для оценки положения транспедикулярных винтов, верификации наличия мальпозиций и их классификации.

Такой протокол позволял с одной стороны оценить предоперационные анатомические факторы, потенциально усложняющие установку винтов (ротация, наклон во фронтальной и сагиттальной плоскости), а с другой – объективно зафиксировать результат установки имплантов и сопоставить его с исходными параметрами.

2.3 ОЦЕНКА ПОЛОЖЕНИЯ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ И КЛАССИФИКАЦИЯ МАЛЬПОЗИЦИЙ.

Всем пациентам выполняли оценку положения транспедикулярных винтов по данным послеоперационной компьютерной томографии. Несмотря на то что в литературе предложено множество подходов к описанию точности имплантации, наиболее распространённые классификации основаны преимущественно на величине выхода винта за пределы костных границ корня дуги и тела позвонка, как правило с градацией по расстоянию перфорации (например, до 2 мм, 2–4 мм, более 4 мм) и без учёта клинического контекста мальпозиции. Такой подход удобен для количественного описания, однако при сколиотических деформациях у детей и подростков он не всегда отражает

потенциальную клиническую значимость отклонения, поскольку риск определяется не только величиной выхода, но и направлением перфорации, уровнем фиксации, стороной деформации и близостью к критически важным анатомическим структурам.

С учётом указанных ограничений для унифицированной оценки клинической значимости мальпозиций в настоящем исследовании использовали классификацию Sarwahi и соавт. [129], ориентированную на потенциальную опасность мальпозиции винта с учётом направления мальпозиции и расстояния до структур риска. Для удобства восприятия в тексте диссертации категории данной классификации приводятся с русскими названиями, при сохранении исходных обозначений авторов.

Классификация включала четыре категории:

- Точное положение – ТП (Accurately Placed, AP) – винт полностью расположен в пределах костных границ корня дуги и тела позвонка, без перфорации кортикального слоя.
- Незначительная мальпозиция – НМ (Benign Misplacement, BMP) – винт перфорирует кортикальный слой, однако по данным КТ не представляет угрозы для критически важных анатомических образований.
- Сомнительная мальпозиция – СМ (Indeterminate Misplacement, IMP) – медиальная перфорация в пределах 2–4 мм либо латеральное или переднее отклонение при сохранении расстояния 1–2 мм до структур риска.
- Опасная мальпозиция – ОМ (Screw at Risk, SAR) – медиальная перфорация более 4 мм или латеральное либо переднее отклонение при расстоянии менее 1 мм до жизненно важных структур (в частности, крупных сосудов и органов средостения и других анатомических образований в зоне риска).

Оценку выполняли на мультипланарных реконструкциях КТ с анализом аксиальных, сагиттальных и фронтальных срезов. Для каждого винта дополнительно регистрировали количественные и топографические

характеристики мальпозиции, которые использовали в последующем сравнительном и факторном анализе:

- направление отклонения - медиальное, латеральное или переднее;
- величину выхода за пределы кортикального слоя (в мм) как максимальное значение по данным КТ;
- уровень фиксации;
- сторону относительно деформации - вогнутая или выпуклая.

2.4 НЕЙРОМОНИТОРИНГ

С целью профилактики и раннего выявления неврологических осложнений у всех пациентов исследования применялся интраоперационный нейрофизиологический мониторинг (ИОМ).



Рис. 2.4.1. Интраоперационный нейрофизиологический мониторинг.

Основным методом являлись транскраниальные моторные вызванные потенциалы, которые применялись во всех случаях (100%). МВП позволяли контролировать проводимость по пирамидным путям и двигательную функцию спинного мозга в реальном времени. Сигналы регистрировались с дистальных групп мышц нижних и верхних конечностей. Критерием тревоги

считалось снижение амплитуды более чем на 50–80% либо полная утрата ответа. Анестезиологический протокол предусматривал исключение применения миорелаксантов после интубации для обеспечения адекватной регистрации моторных ответов.

Соматосенсорные вызванные потенциалы использовались ограниченно – приблизительно у 20% пациентов. Их включение было обусловлено возможностью комплексной оценки проводимости задних столбов спинного мозга, однако в условиях стандартных операций по поводу идиопатического сколиоза рутинное использование ССВП не являлось необходимым. В клиническом аспекте наибольшую ценность представляли МВП, поскольку они обладают более высокой чувствительностью к ишемическим и компрессионным нарушениям на этапе коррекции деформации.

Электромиография (ЭМГ) применялась в режиме «nerve proximity» (триггерная ЭМГ, Т-ЭМГ). Стимуляция винта или зонда в диапазоне 2–20 мА позволяла выявлять медиальные мальпозиции и опасную близость к нервным структурам. Критическими считались значения $\leq 8-10$ мА, что свидетельствовало о риске контакта с нервным корешком.

В случае значимого снижения или утраты МВП или ССВП, хирургическая бригада придерживалась стандартного протокола реагирования. Первым этапом являлась немедленная остановка манёвров и проверка технических факторов: исправность электродов, контактов, параметров стимуляции, а также исключение влияния анестезии (болюсы, миорелаксанты). Одновременно проводилась оптимизация физиологических параметров: повышение среднего артериального давления до $\geq 80-90$ мм рт. ст., нормализация сатурации и газообмена, коррекция анемии, электролитных нарушений и температуры тела. При отсутствии восстановления сигналов выполнялось снятие или ослабление последних корригирующих манёвров (дистракции, деротации, тракции), временное удаление или перепроведение последнего установленного винта; при подозрении на компрессию – декомпрессия. После повторной оценки сигналов, при их восстановлении,

операция продолжалась с модификацией тактики; при стойком отсутствии восстановления выполнялся «wake-up»-тест. Подтверждённый двигательный дефицит являлся основанием для снятия части фиксации, отказа от дальнейшей коррекции или стадирования вмешательства

Таким образом, основой протокола являлись МВП, обеспечивавшие максимально высокий уровень безопасности. Дополнительное использование ССВП ограничивалось отдельными случаями, а ЭМГ в режиме «nerve proximity» применялась в качестве вспомогательного метода контроля правильности установки винтов. Такой мультимодальный подход позволил своевременно выявлять угрозу повреждения спинного мозга или корешков и корректировать хирургическую тактику.

2.5 МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО ЛЕЧЕНИЯ

2.5.1 Хирургическая коррекция деформации позвоночника с применением «free-hand» техники.

В группе «free-hand» использовался стандартный задний срединный доступ с поднадкостничным выделением остистых и поперечных отростков, а также дуг позвонков. После выделения анатомических ориентиров определялись точки введения винтов. Канал формировался шилом с обязательной пальпацией зондом для контроля сохранности стенок ножки дуги, затем проводилось метрование и установка винта соответствующего диаметра и длины.

В поясничном отделе начальной точкой введения винта служила область пересечения линии латерального края верхней суставной фасетки и середины поперечного отростка. В грудном отделе применялись уровне-специфические ориентиры:

- Th1–Th3 – пересечение линии, проведённой через латеральный край верхней суставной фасетки, с серединой поперечного отростка;
- Th4–Th8 – пересечение линии, проведённой через латеральный край верхней суставной фасетки, с верхней третью поперечного отростка;

- Th9–Th12 – точка определялась на пересечении латерального края вышележащей фасетки и серединой поперечного отростка.

Такая ориентировка позволяла безопасно войти в ножку дуги и имплантировать винт в тело позвонка по правильной траектории. Для профилактики медиальных мальпозиций особое внимание уделялось точному выбору стартовой точки и направлению инструмента с учётом анатомии конкретного уровня.

У пациентов с тонкими или диспластичными ножками дуг грудных позвонков применялась экстрапедикулярная техника имплантации. В этом случае стартовая точка смещалась латеральнее к основанию поперечного отростка и винт проводился в тело между ножкой дуги позвонка и шейкой ребра, что позволяло безопасно фиксировать конструкцию даже при очень узких корнях дуг позвонков. Экстрапедикулярная траектория является допустимой в грудном отделе, поскольку головка винта в этом сегменте прикрыта ребром.

По завершении имплантации всех винтов осуществлялась установка стержней и выполнение корригирующих манёвров. В завершении операции выполнялась контрольная рентгенография конечного положения имплантов и оценки степени коррекции деформации. Затем выполнялся задний спондилодез с использованием ауто- и аллоимплантатов, послойное ушивание раны и ее дренирование.

2.5.2 Хирургическая коррекция деформации позвоночника с применением КТ-навигации.

Хирургическая коррекция деформации позвоночника с использованием интраоперационной КТ-навигации выполнялась следующим образом: После стандартной подготовки операционного поля и укладки пациента на операционный стол в положении на животе выполнялся задний срединный доступ к позвоночнику с обнажением задних элементов (остистые отростки, дуги и суставные отростки), после чего осуществлялась установка референтной рамки на костные структуры пациента – чаще всего на остистый

отросток, который располагался в зоне сканирования и предполагаемой установки ТПВ, для максимального снижения возможных погрешностей навигации, ввиду подвижности позвонков. После этого выполнялась интраоперационная компьютерная томография оперируемой зоны позвоночника с использованием мобильного КТ-сканера (O-arm). Полученные изображения загружались в навигационную станцию, где создавалась трёхмерная реконструкция позвоночника.

После проведения регистрации референтной рамки и сопоставления анатомических структур пациента с виртуальной трёхмерной моделью, хирург получал возможность в режиме реального времени отслеживать на экране точное положение хирургических инструментов относительно анатомических ориентиров. На экране системы КТ-навигации хирургом выбиралась оптимальная траектория введения транспедикулярных винтов на каждом уровне позвоночника с учетом особенностей анатомии и деформации. С использованием навигационного шила предварительно идентифицировалась точка входа и траектория винта. После выбора оптимальной траектории осуществлялась разметка входного отверстия.

Далее, с помощью навигируемого пробойника производилось формирование канала в корне дуги позвонка. Точность траектории контролировалась в реальном времени на экране монитора навигационной станции, и ее корректировка выполнялась немедленно в случае выявления отклонений.

После подготовки костного канала, по той же траектории вводился навигируемый зонд для подтверждения правильного расположения винтового канала, отсутствия перфораций кортикальных стенок и точного соответствия предварительно выбранному направлению. Далее устанавливался транспедикулярный винт соответствующего размера с использованием отвертки.

По завершении имплантации всех винтов осуществлялся КТ контроль положения ТПВ, в случае неудовлетворительного положения выполнялась

переустановка винтов также с использованием навигации. Затем выполнялась установка стержней и выполнение корректирующих манёвров.

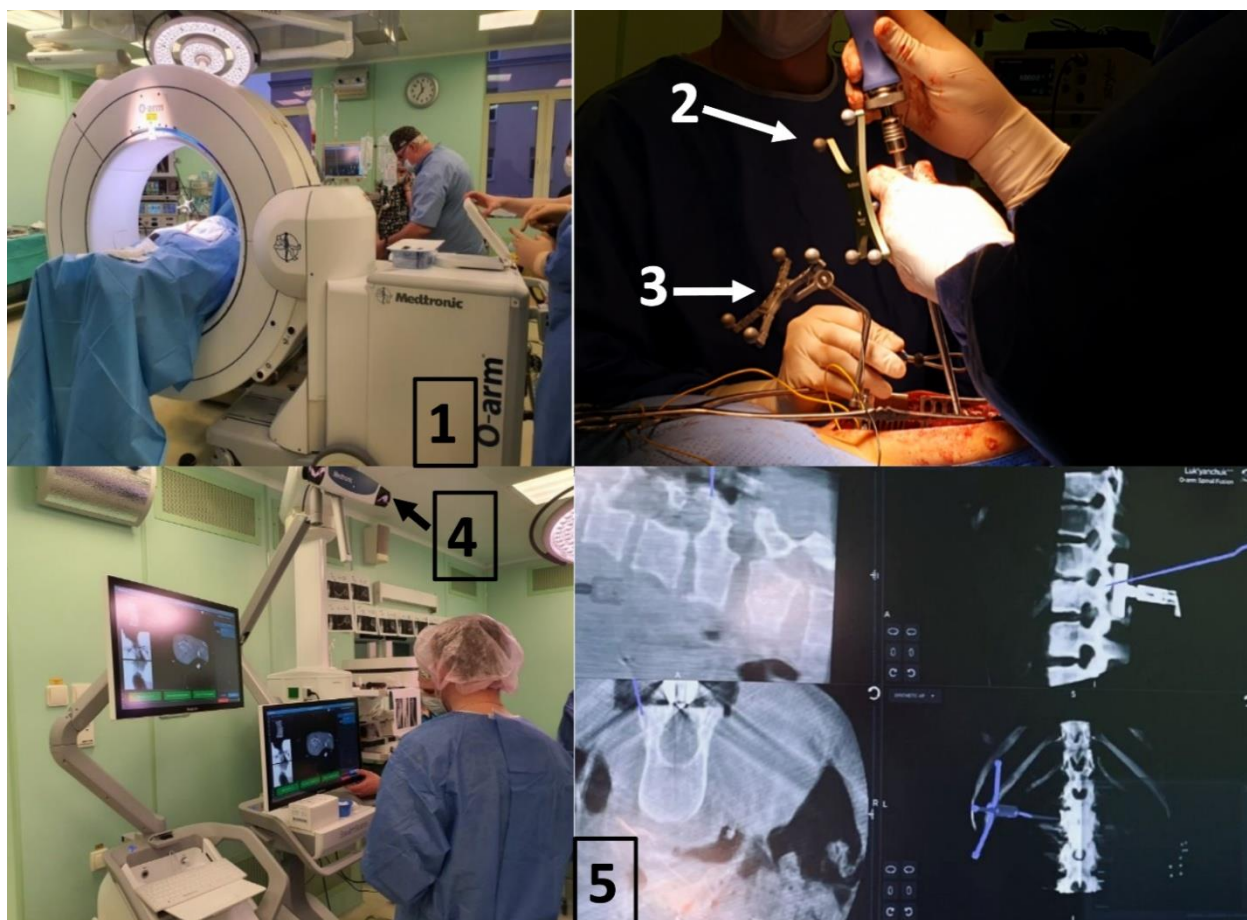


Рис. 2.5.2.1. КТ-навигация. 1- Мобильный КТ-томограф, совмещённый с навигационной системой. 2 – инструмент с инфракрасными метками. 3 – референтная метка. 4- инфракрасная камера. 5 – итоговое изображение на мониторе навигационной системы, с отображением положения инструмента относительно пациента в реальном времени.

2.5.3 Хирургическая коррекция деформации позвоночника с применением аддитивных технологий.

Для изготовления индивидуальных анатомических 3D-моделей позвоночника пациентам выполнялась компьютерная томография на уровнях от С1 до S5 позвонка, включая крылья подвздошных костей. Исходные данные КТ, сохранённые в формате DICOM, обрабатывались в специализированном программном обеспечении RadiAnt DICOM Viewer. В программе выполнялась сегментация позвоночника с выделением костных структур, удалением мягких тканей и формированием высокоточной трёхмерной виртуальной модели.

Полученная цифровая 3D-модель тщательно проверялась на отсутствие дефектов, полноту визуализации анатомических ориентиров и достаточную точность отображения особенностей деформации.

Подготовленная таким образом модель экспортировалась и сохранялась в формате STL (stereolithography file format), подходящем для последующего этапа печати. В зависимости от сложности деформации и необходимой детализации выбирался тип аддитивной технологии и печатный материал. Для печати моделей использовались биосовместимые, не обладающие токсичностью и способные выдерживать механические нагрузки полимеры, такие как акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полиэтилентерефталат с добавлением гликоля (PET-G) или полилактид (PLA).

Непосредственно печать трёхмерных моделей позвоночника проводилась на принтере методом послойного наплавления полимера (Fused Deposition Modeling, FDM). Среднее время, затрачиваемое на изготовление одной модели, варьировало от 10 до 36 часов, в зависимости от размера и детализации модели. После окончания печати производилась окончательная обработка модели: удаление опорных структур, зачистка краёв и отверстий для более удобной навигации инструментов во время операции.

После получения физической модели позвоночника на ней осуществлялось предварительное планирование операции. Используя модель, хирург отмечал точки входа и оптимальные траектории введения транспедикулярных винтов с учётом анатомических особенностей и степени деформации. В качестве маркеров для визуализации оптимального хода канала внутри костной структуры применялись металлические стилеты, которые устанавливались в модель по предварительно отмеченным точкам и фиксировались в нужном направлении.

Во время операции подготовленная 3D-модель находилась в операционной в непосредственной близости к хирургу, служа дополнительным анатомическим ориентиром и улучшая пространственное представление о сложной трёхмерной анатомии деформированного

позвоночника. При установке каждого транспедикулярного винта хирург имел возможность сверять реальное положение и направление инструментов с ранее размеченными на модели траекториями (рис. 2.5.3.1).



Рис. 2.5.3.1. 3D модель позвоночника пациента с размеченными точками введения винтов и направляющими.

2.6. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Количественные показатели оценивались на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Шапиро-Уилка (при числе исследуемых менее 50) или критерия Колмогорова-Смирнова (при числе исследуемых более 50). Количественные показатели, выборочное распределение которых соответствовало нормальному, описывались с помощью средних арифметических величин (M) и стандартных отклонений (SD). В качестве меры репрезентативности для средних значений указывались границы 95% доверительного интервала (95% ДИ). В случае отсутствия

нормального распределения количественные данные описывались с помощью медианы (Me) и нижнего и верхнего квартилей (Q1 – Q3). Категориальные данные описывались с указанием абсолютных значений и процентных долей. 95% доверительные интервалы для процентных долей рассчитывались по методу Клоппера-Пирсона.

Сравнение двух групп по количественному показателю, распределение которого отличалось от нормального, выполнялось с помощью U-критерия Манна-Уитни. Направление и теснота корреляционной связи между двумя количественными показателями оценивались с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена (при распределении показателей, отличном от нормального).

Сравнение трех и более групп по количественному показателю, распределение которого отличалось от нормального, выполнялось с помощью критерия Краскела-Уоллиса, апостериорные сравнения – с помощью критерия Данна с поправкой Холма. Сравнение процентных долей при анализе многопольных таблиц сопряженности выполнялось с помощью критерия хи-квадрат Пирсона. Апостериорные сравнения выполнялись с помощью критерия хи-квадрат Пирсона с поправкой Холма. Различия в исследуемых группах пациентов считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Построение прогностической модели вероятности определенного исхода выполнялось при помощи метода логистической регрессии. Мерой определенности, указывающей на ту часть дисперсии, которая может быть объяснена с помощью логистической регрессии, служил коэффициент R^2 Найджелкерка. Для оценки дискриминационной способности количественных признаков при прогнозировании определенного исхода, применялся метод анализа ROC-кривых. Разделяющее значение количественного признака в точке «cut-off» определялось по наивысшему значению индекса Юдена.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СПОНДИЛОСИНТЕЗА.

При написании настоящего раздела использованы фрагменты собственного текста, впервые опубликованные ранее в работах: [8-11]

3.1 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ «FREE-HAND».

В контрольной группе, включающей 45 пациентов, оперированных с 2010 по 2025 годы с применением «free-hand» техники имплантации ТПВ. Медиана исходного угла деформации по Cobb составил 69° [61° ; 93°], послеоперационно среднее значение – $28 \pm 12^\circ$, что соответствует статистически значимой ($p < 0,001$) средней коррекции на 59% (рис. 3.1.1).

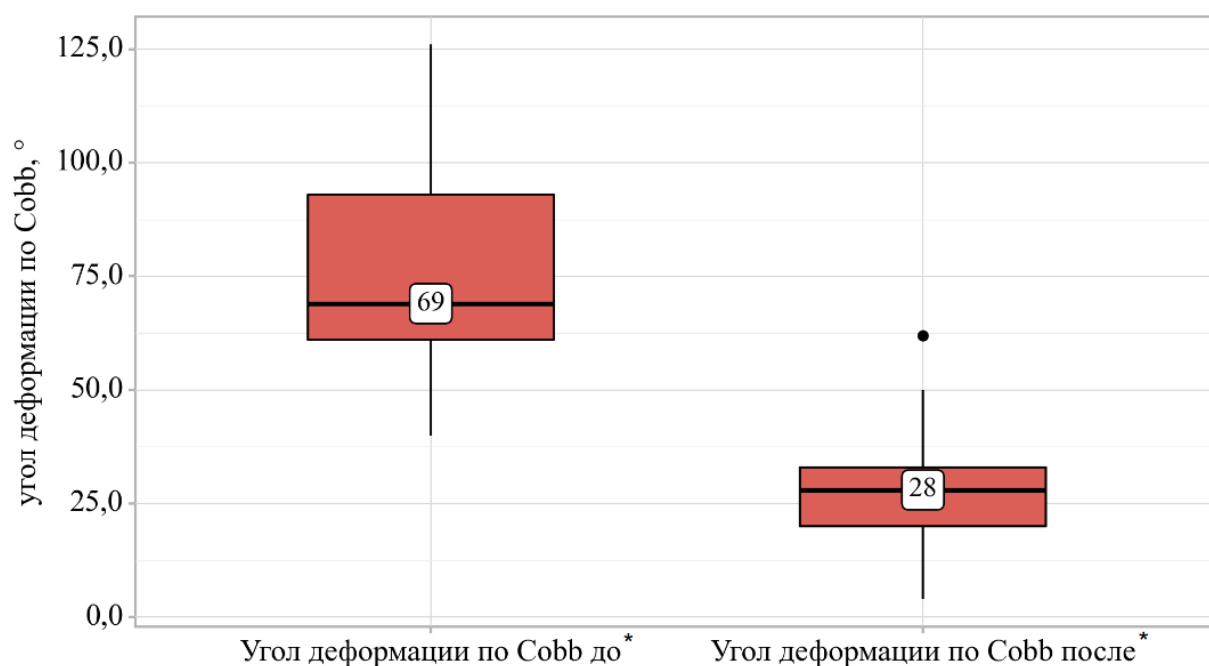


Рис. 3.1.1. Результаты коррекции деформации в контрольной группе. (* – $p < 0,001$)

Медиана ротации апикального позвонка составила 25° [19° ; 35°], достигая максимума в 56° . Всего было установлено 696 транспедикулярных винтов, в среднем $15,47 \pm 4,12$ на одного пациента, из которых на послеоперационной КТ были выявлены 148 мальпозиций, что составляет 21,3% от общего числа. Совокупная частота мальпозиций представлена на рисунке 3.1.2 и по типу составила: незначительная – 10,8%, сомнительная –

6,6%, опасная – 3,9%. По направлению перфораций распределение было следующим: медиальные – 9,2%, латеральные – 7,6%, передние – 4,5%.

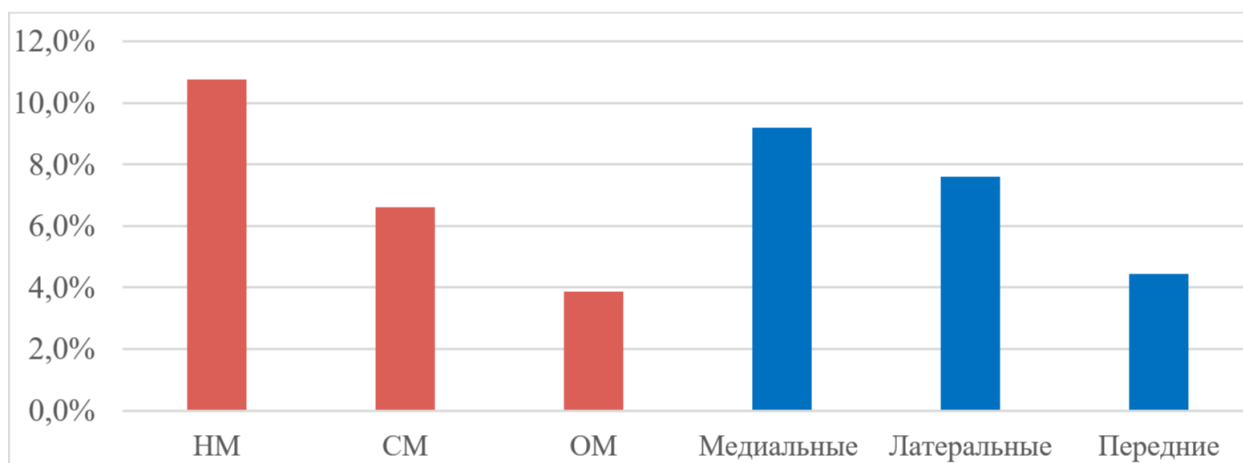


Рис. 3.1.2. Совокупная частота мальпозиций контрольной группе.

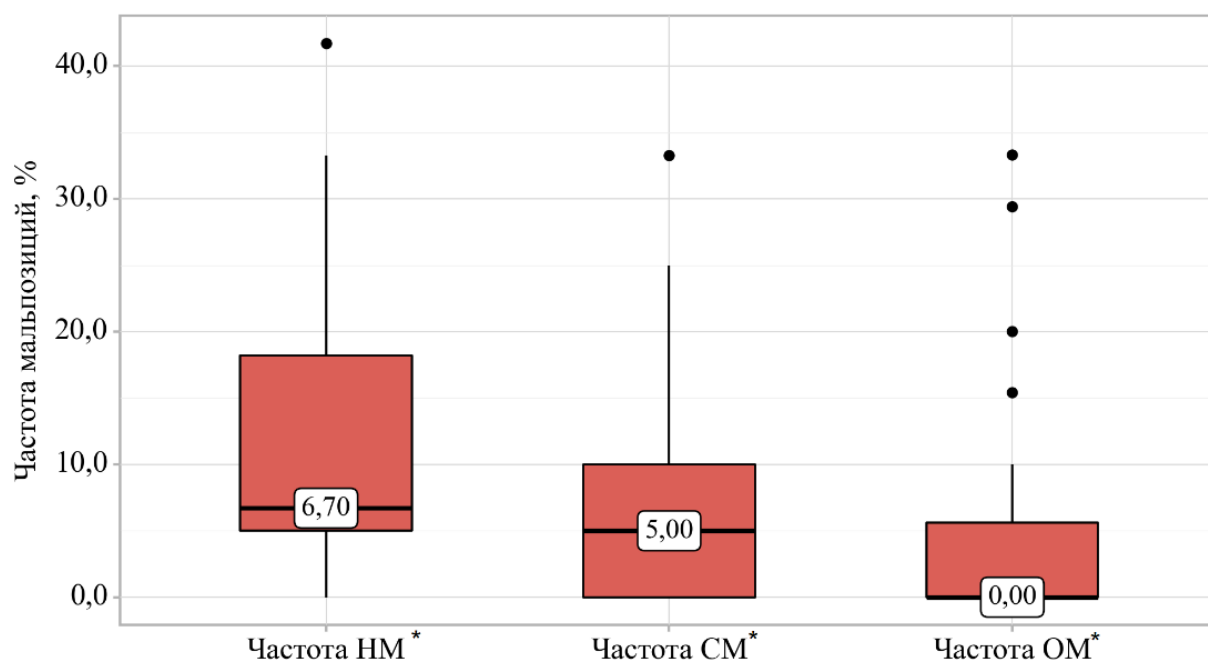


Рис. 3.1.3. Распределение частоты мальпозиций по типу в контрольной группе (* – p НМ – СМ = 0,009; p НМ – ОМ < 0,001).

Распределении частоты мальпозиций по типу представлены на 3.1.3. В процессе анализа отмечены статистически значимые различия ($p < 0,001$). Распределение частоты мальпозиций по направлению перфорации представлены на рисунке 3.1.4. В процессе анализа частоты мальпозиций по направлению не удалось выявить статистически значимых изменений ($p = 0,481$).

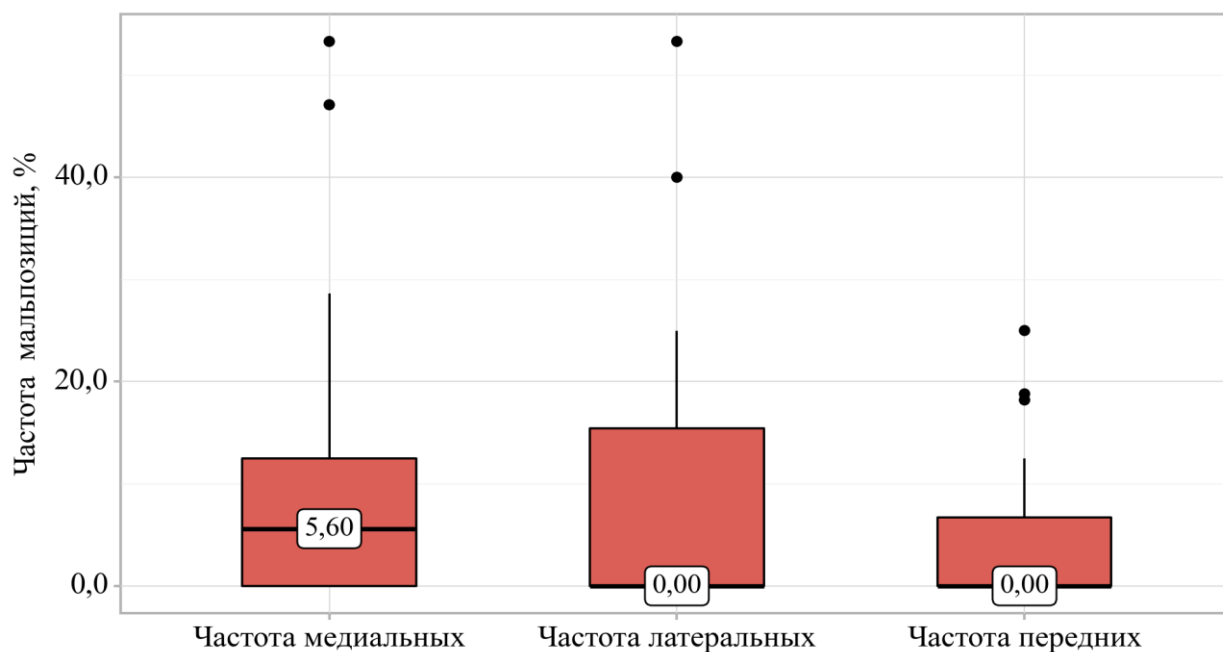


Рис. 3.1.4. Распределение частоты мальпозиций по направлению в контрольной группе ($p = 0,481$).

В контрольной группе также было выполнено 3 ревизионных вмешательства (6,7% пациентов) в связи с выявленным по данным послеоперационной КТ непосредственным прилежанием дистального отдела винта к аорте. Во всех этих случаях ревизия носила профилактический характер и проводилась при отсутствии клинических сосудистых осложнений.

Кроме того, в данной группе зафиксировано два случая послеоперационных неврологических осложнений (4,4% пациентов) ассоциированных с медиальной мальпозицией транспедикулярных винтов. Подробный анализ этих наблюдений и обсуждение пороговых значений медиальной перфорации представлены в главе 4.

Нами выполнен корреляционный анализ между исходными значениями угла деформации основной сколиотической дуги, ротацией вершинного позвонка и частотой мальпозиций. При оценке связи угла деформации и частоты мальпозиций была установлена высокой тесноты прямая связь ($r=0,784$, $p < 0,001$), график зависимости продемонстрирован на рис. 3.1.5. При исследовании взаимосвязи ротации вершинного позвонка от частоты

мальпозиций была установлена заметной тесноты прямая связь ($r=0,648$, $p<0,001$), график зависимости на рис. 3.1.6.

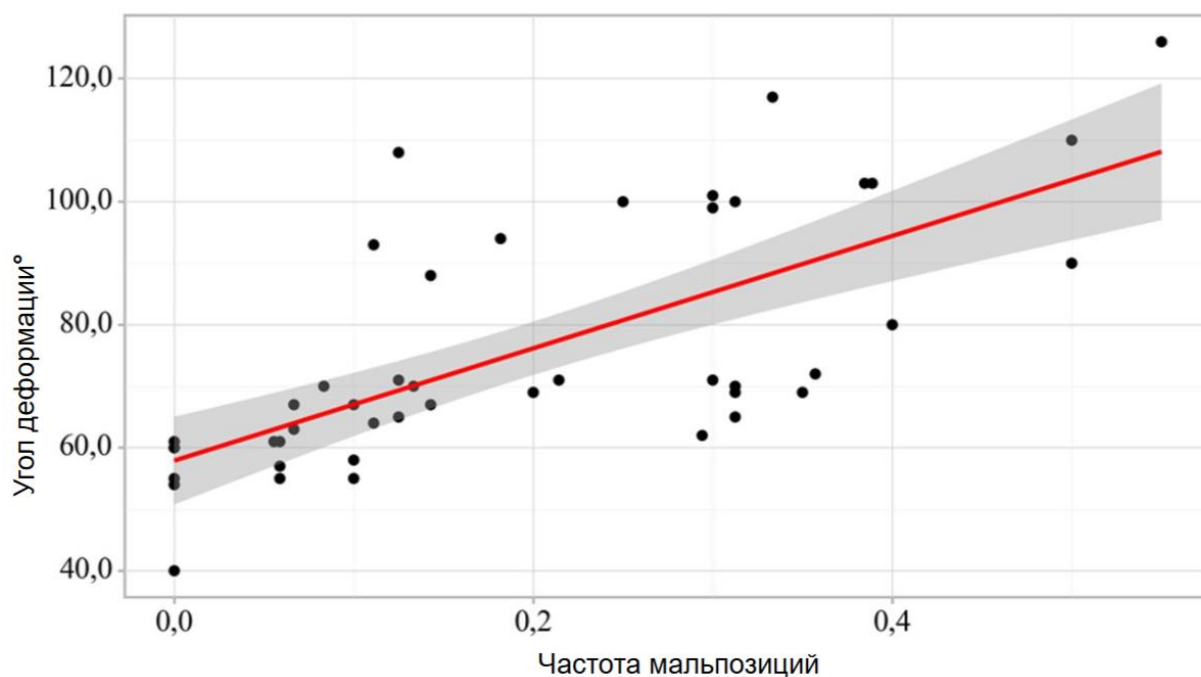


Рис. 3.1.5. График регрессионной функции, характеризующий зависимость исходного угла деформации от частоты мальпозиций ($r=0,784$, $p<0,001$).

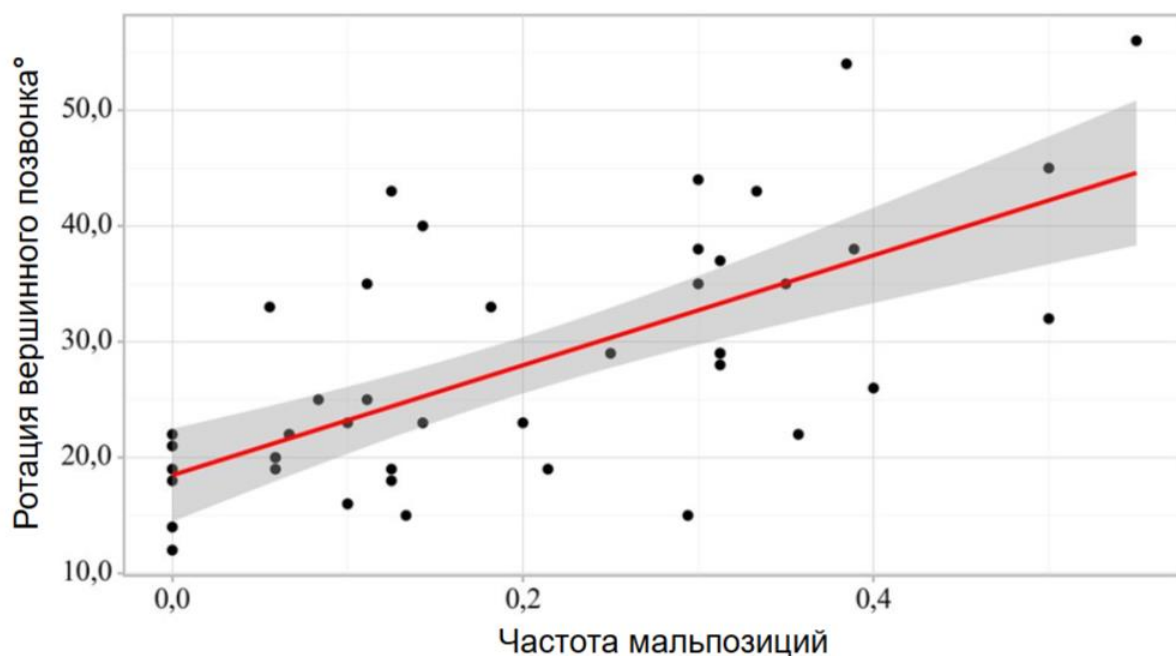


Рис. 3.1.6. График регрессионной функции, характеризующий зависимость ротации верхинного позвонка от частоты мальпозиций ($r=0,648$, $p<0,001$).

В контрольной группе проведён углубленный анализ параметров каждого инструментированного позвонка (ИП) у каждого из 45 пациентов,

включая наличие мальпозиции, ее тип, направление перфорации, фронтальный наклон, ротацию, сагиттальный наклон, уровень ИП, его расположение относительно вершины, а также имплантация винта на вогнутой стороне деформации.

Распределения совокупной частоты мальпозиций в зависимости от уровня инструментируемого позвонка продемонстрировано на рис. 3.1.7. На рис. 3.1.8 представлено Распределение частоты мальпозиций по уровням инструментации в зависимости от типа по классификации. На рис. 3.1.9 представлено распределение направления перфорации в зависимости от уровня инструментируемого позвонка.

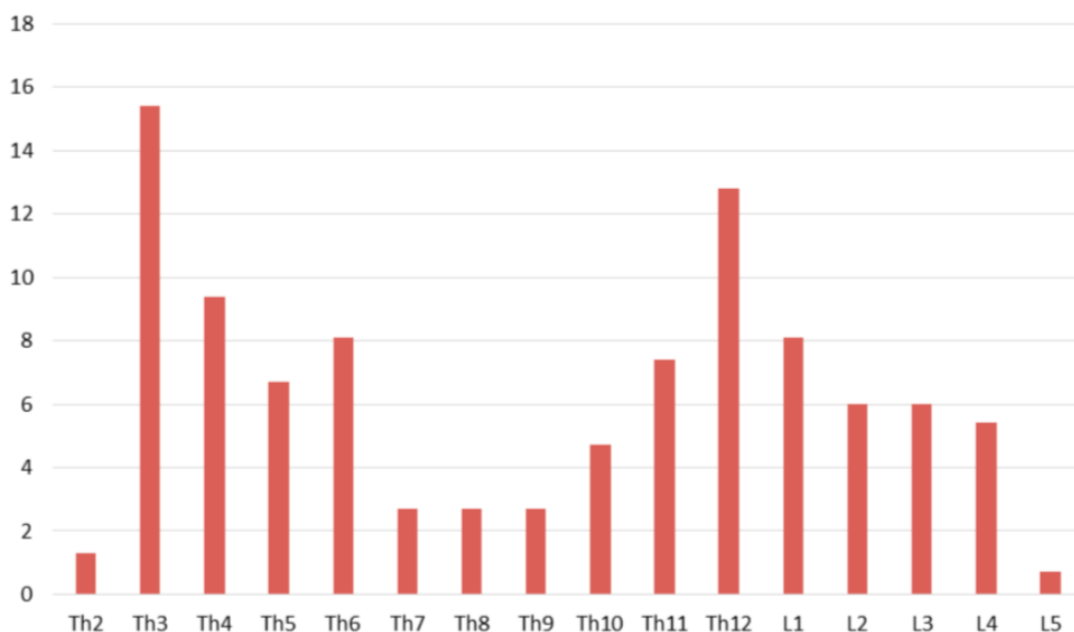


Рис. 3.1.7. Распределение частоты всех мальпозиций по уровням инструментации.

Наиболее высокая частота мальпозиций при использовании техники «free-hand» наблюдалась в верхнегрудном отделе позвоночника (Th3–Th6). Согласно проведённому углублённому анализу, на уровне Th3 зафиксировано до 26,4% всех латеральных перфораций кортикальной пластинки корня дуги, при этом преобладали незначительные мальпозиции (НМ). Это обусловлено анатомическими особенностями: малым диаметром и асимметрией ножек,

сложной ориентацией корней дуг позвонков. Допустимое экстрапедикулярное латеральное положение винта в верхнегрудном отделе часто классифицируется как НМ, что формально увеличивает долю мальпозиций, несмотря на их минимальную клиническую значимость.

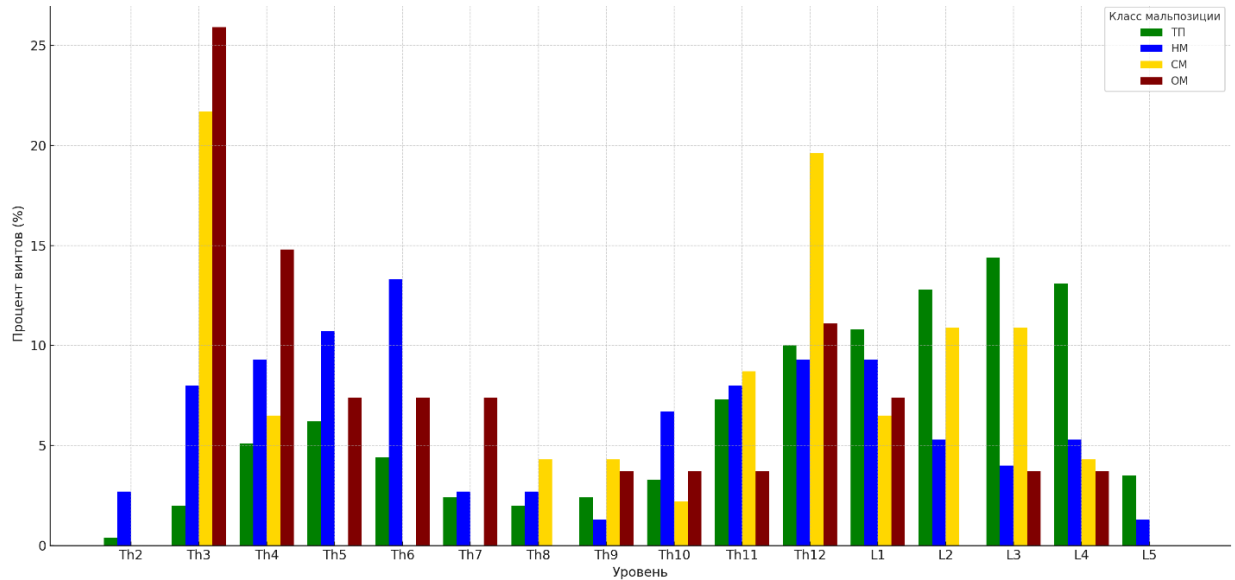


Рис. 3.1.8. Распределение частоты мальпозиций по уровням инструментации в зависимости от типа по классификации.

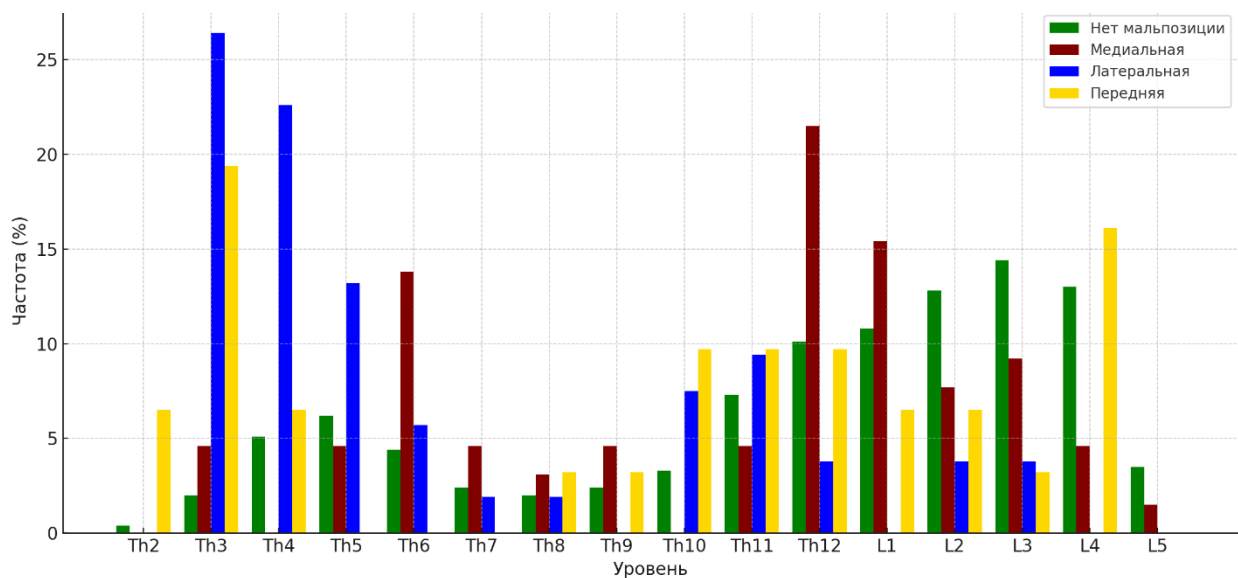


Рис. 3.1.9. Распределение частоты мальпозиций по уровням инструментации в зависимости от направления перфорации винтом.

Также именно на этом уровне отмечена наибольшая доля опасных мальпозиций (ОМ), что, вероятно, связано с теми же анатомическими особенностями, которые усложняют правильное позиционирование винта и увеличивают риск медиальной перфорации костной стенки корня дуги позвонка с потенциальным неврологическим дефицитом. Таким образом, верхнегрудной отдел представляет собой зону повышенного риска мальпозиций, преимущественно латеральных и незначительных, но также и опасных, что требует особого внимания при планировании траектории при использовании «free-hand»-техники имплантации транспедикулярных винтов.

Анализ распределения медиальных мальпозиций показал чёткую зависимость между величиной ротации инструментируемого позвонка и вероятностью медиальной перфорации костной стенки корня дуги. В позвонках с выраженной ротацией частота медиальных мальпозиций значимо возрастает по сравнению с передними и латеральными ($p < 0,001$), что продемонстрировано на рис. 3.1.10. Этот факт закономерен, поскольку в условиях ротационного смещения анатомических ориентиров определить оптимальную медио-латеральную траекторию винта значительно сложнее. И еще большие сложности вносит выраженная торсия позвонков, расположенных вблизи вершины структуральной сколиотической дуги. При этом, торсия вершинного позвонка оказывает существенное влияние не только на траекторию имплантации транспедикулярного винта, но и требует корректировки точки входа в корень дуги позвонка.

Взаимосвязь дополнительно подтверждается данными графика на рис. 3.1.11: пики медиальных мальпозиций пространственно совпадают или располагаются в непосредственной близости с вершинами сколиотических дуг деформации, где ротация позвонка достигает максимальных значений.

Нами был также проведен анализ взаимосвязи между фронтальным наклоном позвонка и направлением перфорации костной стенки корня дуги позвонка (рис. 3.1.12). При оценке фронтального наклона, в зависимости от

направления перфорации, было выявлено, что латеральные мальпозиции значительно возрастали при увеличении фронтального наклона ИП ($p < 0,001$).

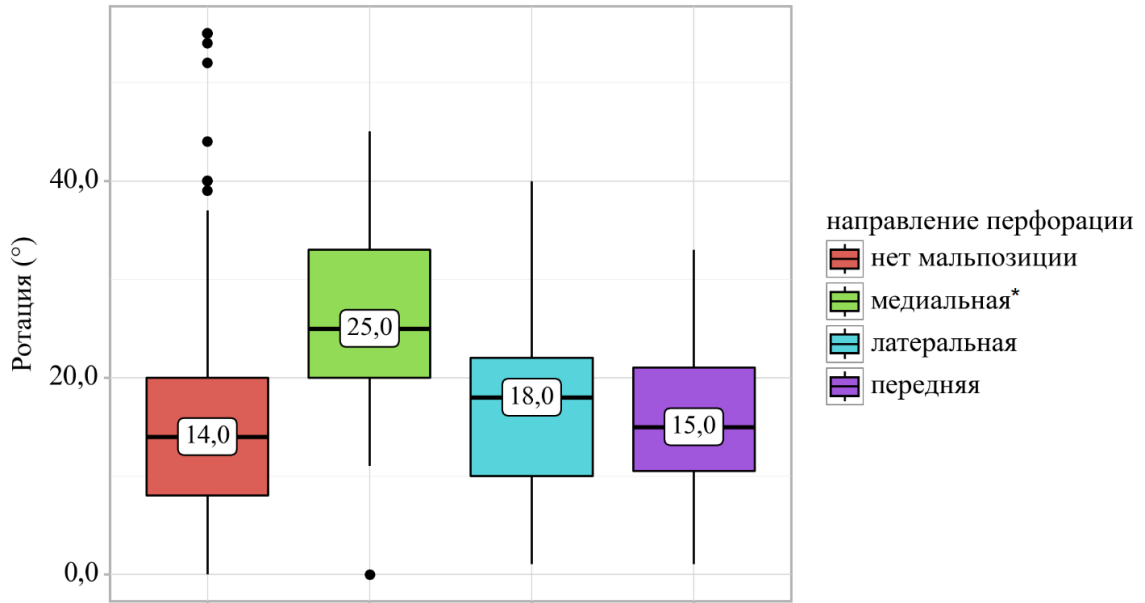


Рис. 3.1.10. Анализ направления мальпозиций в зависимости от ротации инструментированного позвонка (* – p медиальная – нет мальпозиции $< 0,001$; p латеральная – медиальная $< 0,001$; p передняя – медиальная $< 0,001$).

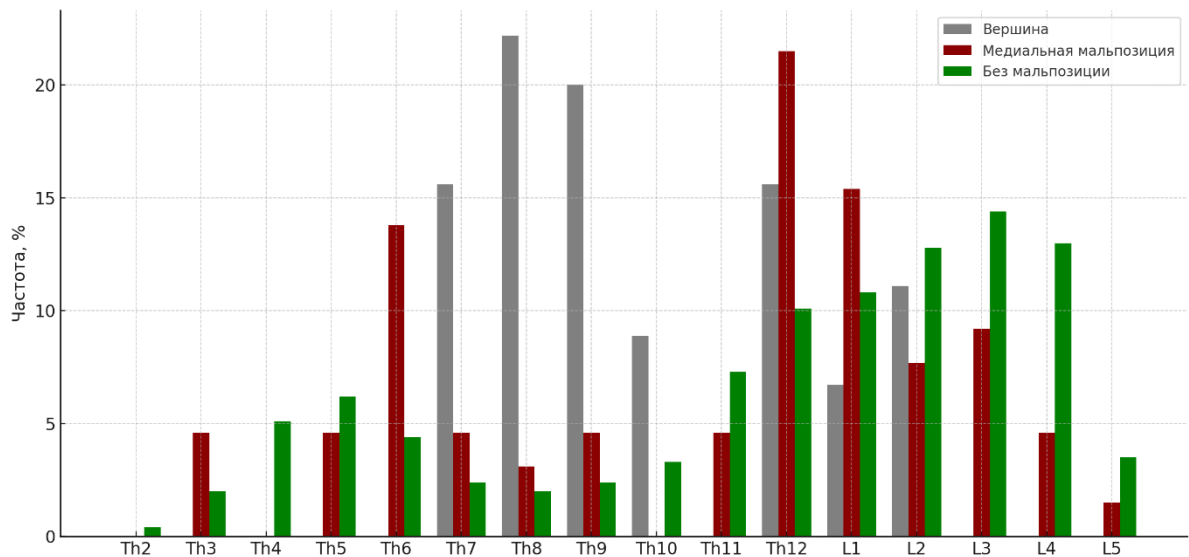


Рис. 3.1.11. Распределение частоты медиальных мальпозиций относительно вершин деформации и корректно установленных винтов.

Был проведен анализ зависимости наличия мальпозиции от фронтального наклона инструментированного позвонка (рис. 3.1.13). Согласно данным на представленном рисунке, при оценке зависимости

наличия мальпозиции в ИП и его фронтального наклона, были установлены статистически значимые различия ($p < 0,001$). Анализ зависимости ротации ИП от наличия в нем мальпозиции (рис. 3.1.14) показал статистически достоверный рост мальпозиций при увеличении ротации ($p < 0,001$).

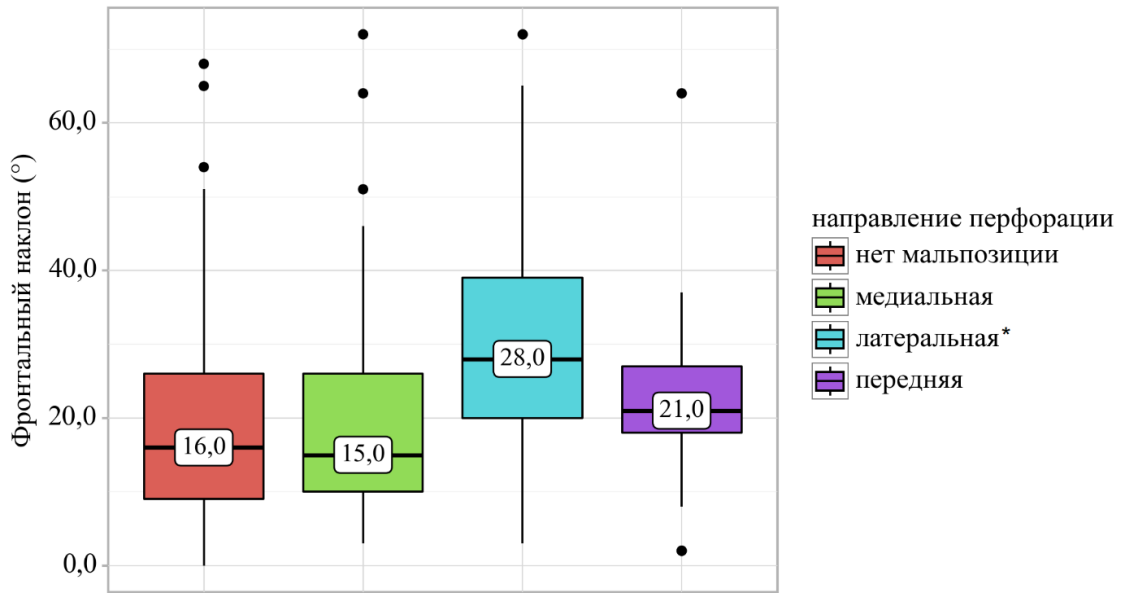


Рис. 3.1.12. Анализ направления мальпозиций в зависимости от фронтального наклона инструментированного позвонка (* – p медиальная – нет мальпозиции = 0,050; p латеральная – нет мальпозиции = 0,039).

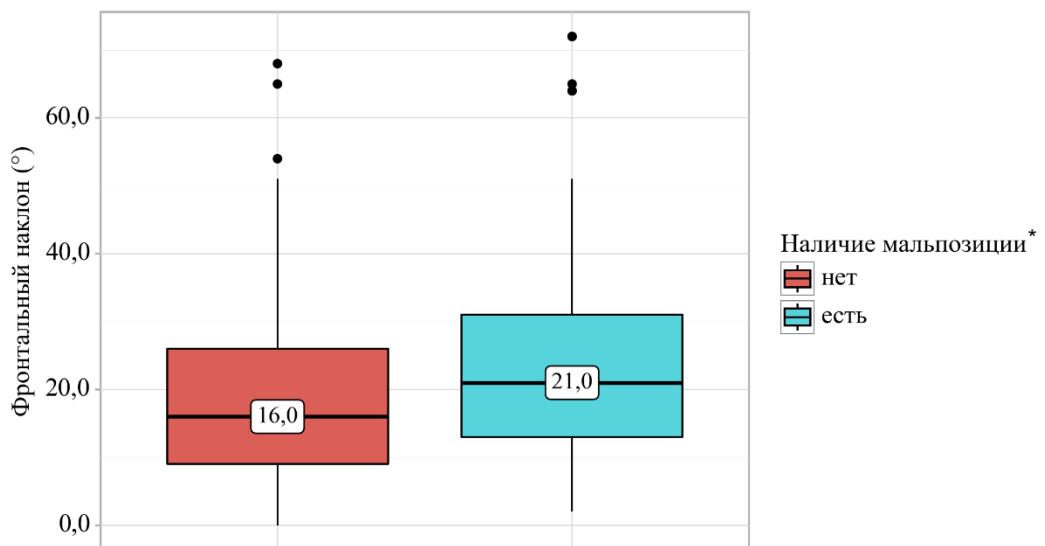


Рис. 3.1.13. Анализ зависимости наличия мальпозиции в ИП от его фронтального наклона (* – $p < 0,001$).

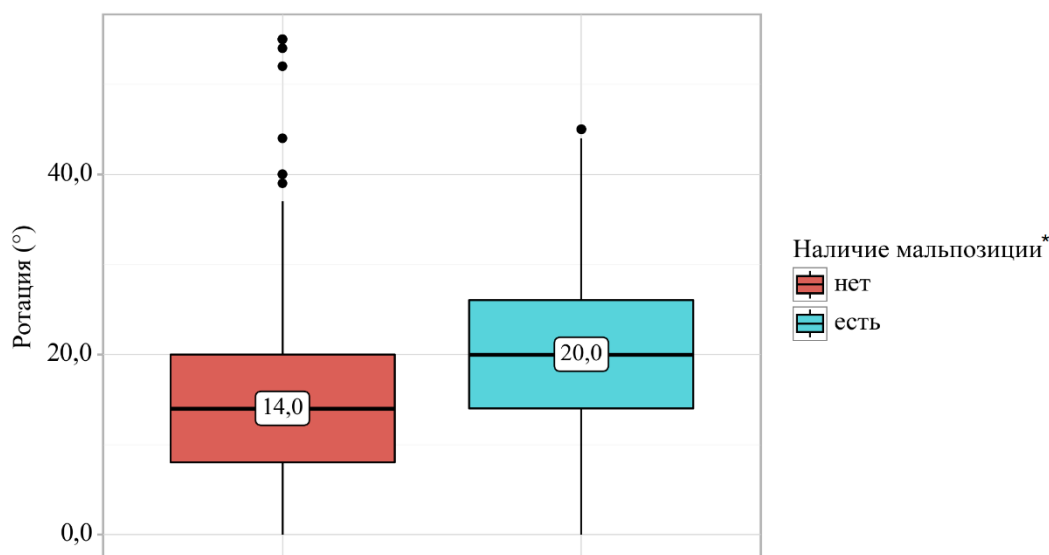


Рис. 3.1.14. Анализ наличия мальпозиции в ИП в зависимости от его ротации (* – $p < 0,001$).

Результаты анализа точности и безопасности имплантации ТПВ в контрольной группе пациентов показали, что применение техники «free-hand» обеспечивает удовлетворительную коррекцию деформации (59%), однако сопровождается заметной долей мальпозиций (21,3%). Большинство мальпозиций были незначительными или сомнительными, однако именно частота медиальной перфорации костной стенки корня дуги позвонка демонстрировали выраженную корреляцию с величиной угла сколиотической дуги.

Установлена сильная прямая корреляция между исходным углом основной дуги и частотой мальпозиций, а также значимая связь между ротацией апикального позвонка и риском ошибочного позиционирования винтов. Верхнегрудной отдел оказался зоной максимальной концентрации технически обусловленных ошибок, что связано с анатомической узостью, асимметрией и вариабельностью ножек дуг позвонков.

Детальный анализ топографии мальпозиций выявил, что медиальные перфорации наиболее часто встречаются в апикальной зоне деформации и совпадают с участками максимальной ротации. Фронтальный наклон также

оказывает значимое влияние на тип мальпозиции, увеличивая частоту латеральных выходов.

Совокупность полученных данных демонстрируют, что основные рентгеноангулометрические параметры сколиотической деформации, такие как: величина угла основной дуги, ротация и фронтальный наклон инструментированного позвонка – тесно коррелируют с риском мальпозиции транспедикулярных винтов при использовании техники «free-hand». Наиболее неблагоприятными зонами оказались вершина деформации и зоны в непосредственной близости от вершины, а также верхнегрудной отдел, где сочетание выраженной ротации, узости и асимметрии корней дуг, а также сложности пространственной ориентации канала корня дуги позвонка приводит к значимому повышению риска медиальных и латеральных перфораций. Эти особенности позволяют выделить указанные зоны как участки повышенного технического риска при коррекции выраженных сколиотических деформаций с применением «free-hand» -техники имплантации ТПВ.

3.2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.

В I группе, включавшей 30 пациентов, медиана исходной величины угла основной сколиотической дуги по Cobb составила $86,5^\circ$ [$77,5^\circ$; $113,5^\circ$], послеоперационно регрессировала до $53,5^\circ$ [37° ; 73°], что соответствует средней коррекции 40,3% ($p < 0,001$; рис. 3.2.1). Ротация апикального позвонка была выраженной (медиана $31,5^\circ$ [$25,5^\circ$; $46,5^\circ$], максимум 87°), что подчёркивает выраженность деформаций в данной группе.

Всего установлено 572 транспедикулярных винта (в среднем $19,07 \pm 2,55$ на пациента), из которых по данным послеоперационной КТ выявлено 35 мальпозиций (6,1%). Совокупная частота всех типов мальпозиций представлена на рисунке 3.2.2.

Большинство ошибок нами отнесено к категории незначительных (4,3%) и сомнительных (1,6%), в то время как доля клинически опасных перфораций

была минимальной (0,1%). Структура распределения частоты по типам мальпозиций приведена на рисунке 3.2.3 и демонстрирует статистически значимые различия между категориями ($p < 0,001$).

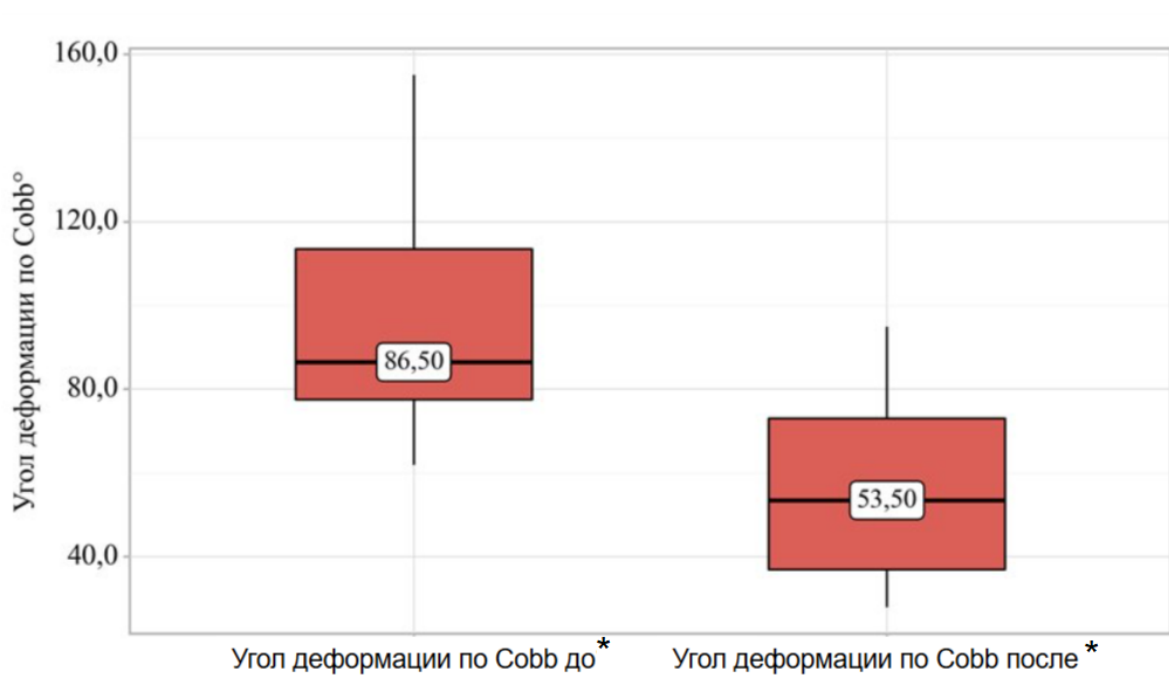


Рис. 3.2.1. Результаты коррекции деформации в I группе (* – $p < 0,001$).

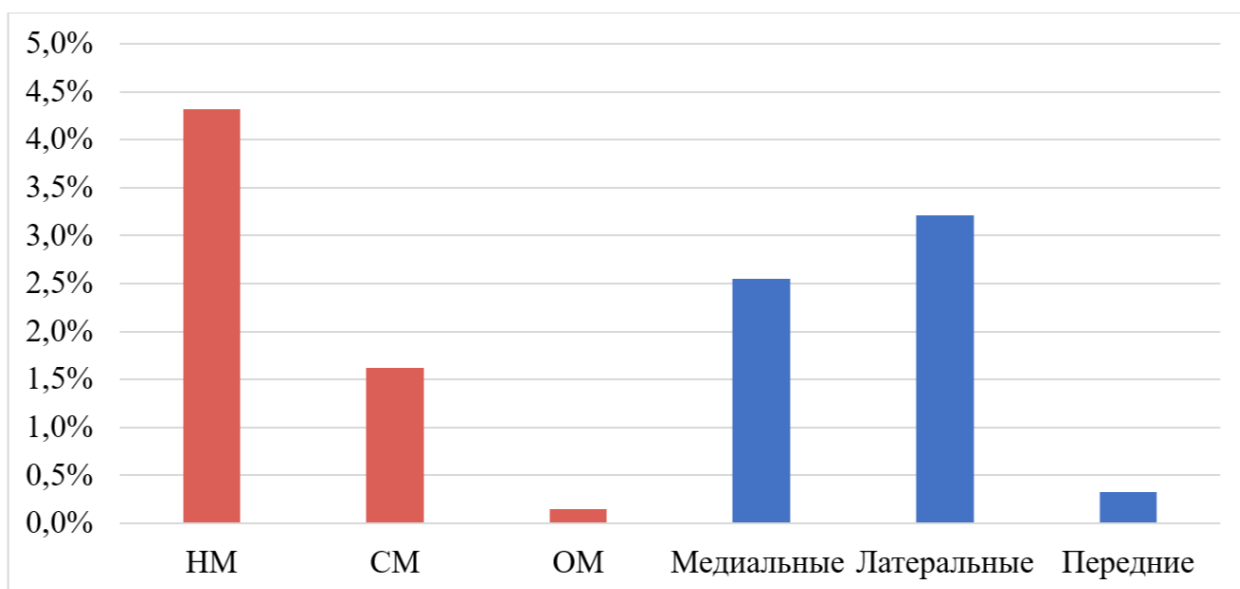


Рис. 3.2.2. Совокупная частота мальпозиций в I группе.

Распределение по направлению перфорации костной стенки корня дуги позвонка отображено на рисунке 3.2.4. Наиболее часто выявлялись латеральные (3,2%) и медиальные (2,6%) мальпозиции, тогда как передние перфорации встречались достаточно редко, в 0,3% случаев. Различия

распределения по направлениям также оказались статистически значимыми ($p < 0,05$).

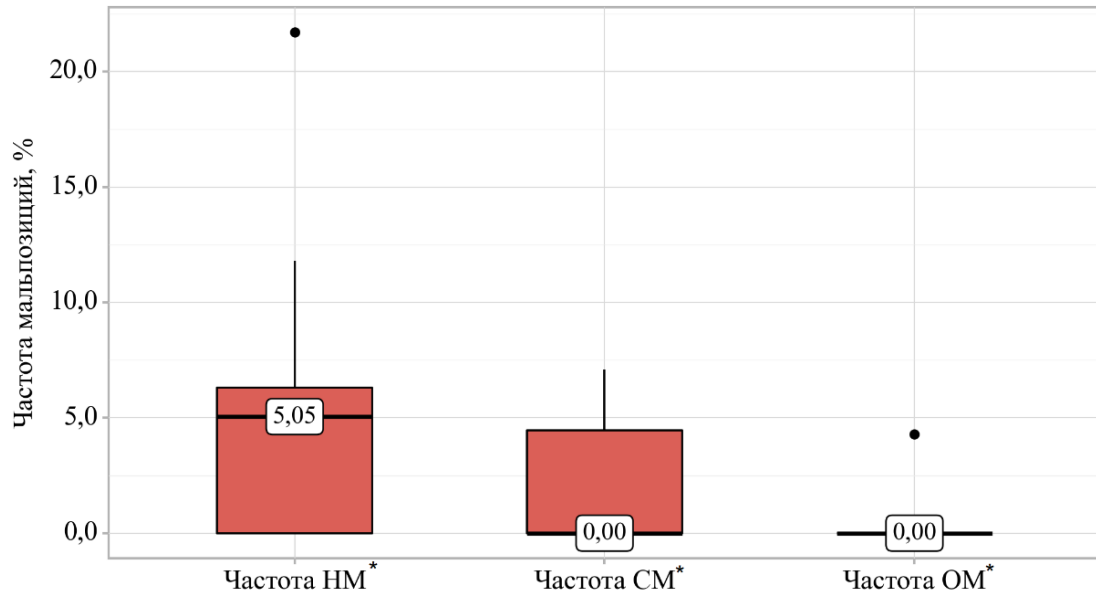


Рис. 3.2.3. Распределение частоты мальпозиций по типу в I Группе (* – p НМ – СМ = 0,020; p НМ – ОМ < 0,001; p СМ – а ОМ = 0,038).

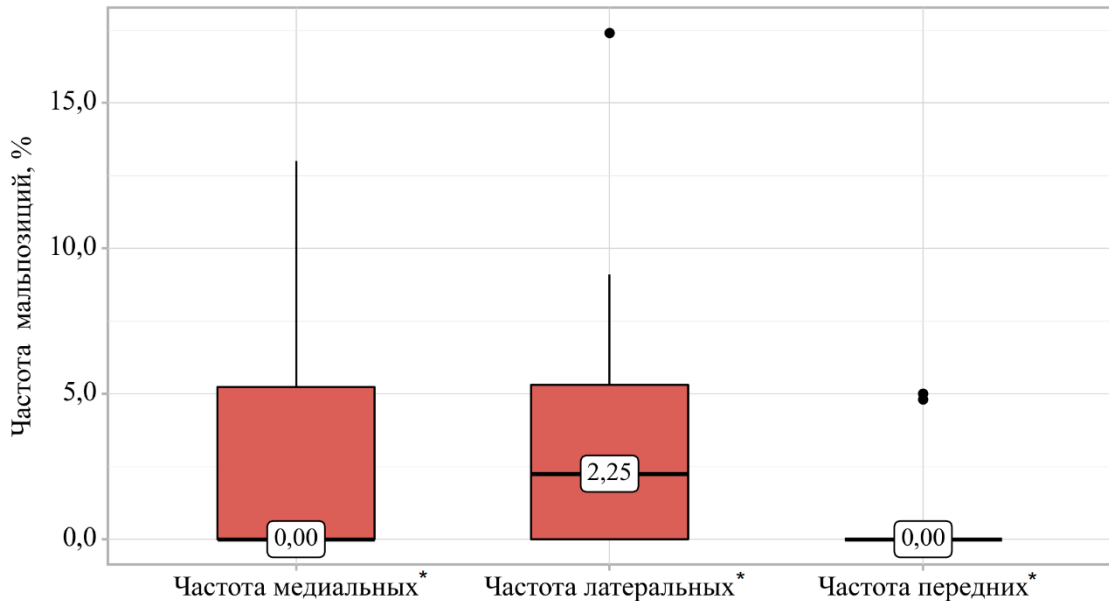


Рис. 3.2.4. Распределение частоты мальпозиций по направлению в I группе (* – p медиальные – передние = 0,033; p латеральные – передние = 0,002).

Корреляционный анализ продемонстрировал умеренную зависимость частоты мальпозиций от исходного угла основной дуги ($r = 0,419$, $p < 0,05$; рис. 3.2.5). При этом влияние ротации апикального позвонка было более

выраженным – установлена прямая связь средней тесноты между ростом ротации и увеличением частоты ошибок ($r = 0,573$, $p < 0,001$; рис. 3.2.6).

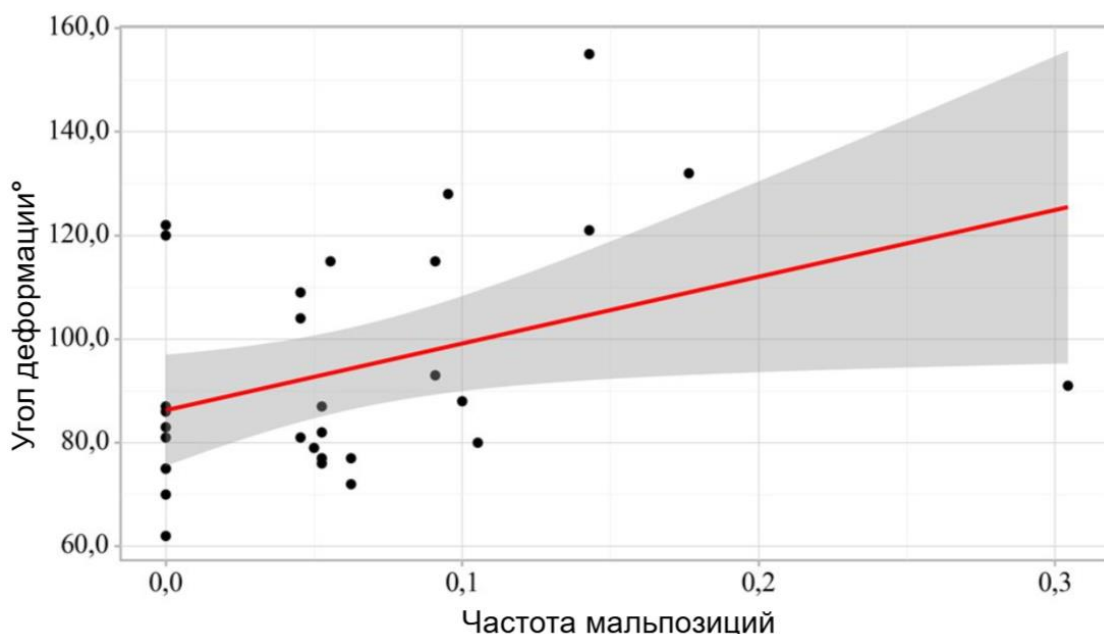


Рис. 3.2.5. График регрессионной функции, характеризующий зависимость исходного угла деформации от частоты мальпозиций в I группе ($r = 0,419$, $p < 0,05$).

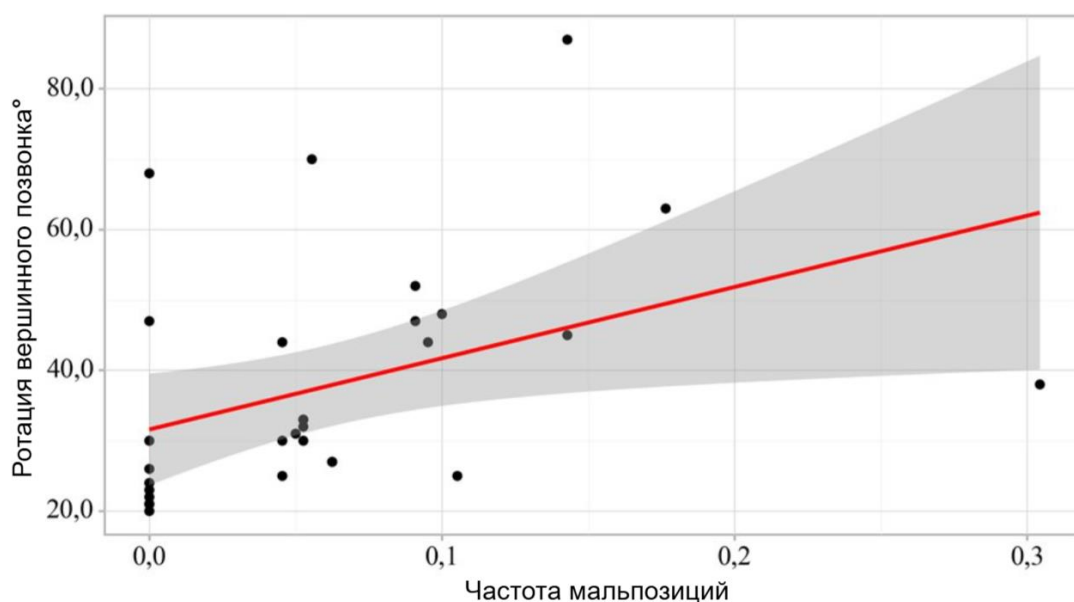


Рис. 3.2.6. График регрессионной функции, характеризующий зависимость ротации верхинного позвонка от частоты мальпозиций в I группе ($r = 0,573$, $p < 0,001$).

Проведённый анализ результатов в I группе показал, что при использовании аддитивных технологий удаётся достичь высокой точности

установки транспедикулярных винтов, что подтверждается низкой общей частотой мальпозиций (6,1%). Большая часть выявленных ошибок была представлена незначительными и сомнительными перфорациями, тогда как доля клинически опасных выходов оказалась минимальной (0,1%).

Несмотря на исходно высокие значения угла деформации и выраженную ротацию вершинного позвонка, отмечена лишь умеренная связь между тяжестью деформации и частотой мальпозиций, а влияние ротации сохранялось, но характеризовалось меньшей выраженностью по сравнению с контрольной группой. Анализ перфораций костной стенки по направлению показал, что латеральные и медиальные мальпозиции встречались приблизительно с одинаковой частотой, а выходы ТПВ за пределы передней кортикальной пластинки тела позвонка были единичными. При этом, статистически значимые различия частоты мальпозиций по направлению свидетельствуют о сохранении закономерностей, связанных с индивидуальными анатомическими особенностями позвонков и уровнем ИП.

Таким образом, полученные данные указывают на то, что даже при выраженных деформациях позвоночника аддитивные технологии позволяют существенно снизить частоту технических ошибок имплантации ТПВ. Выявленные зависимости подчёркивают, что угол основной дуги и ротация ИП существенно повышают риск мальпозиций, однако степень этого влияния значительно ниже, в сравнении с контрольной группой пациентов. Вышеуказанные факты свидетельствуют о том, что анатомически, наиболее сложными уровнями имплантации ТПВ являются вершина структуральной сколиотической дуги и парагиббарные зоны, обладающие значительной ротацией ИП, однако, общая частота ошибок позиционирования винтов в них заметно ниже.

3.3 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КТ-НАВИГАЦИИ.

Во вторую группу пациентов вошло 45 детей с медианой исходной величины угла основной сколиотической дуги по Cobb - 87° [68°; 113°]. После оперативного лечения данный показатель снизился до 34° [21°; 52°]. Это

соответствует средней величине послеоперационной коррекции 57,5% ($p < 0,001$; динамика данного показателя отображена на рис. 3.3.1). Ротация апикального позвонка была выраженной (среднее значение $37,71 \pm 14,55^\circ$, максимум 61°), что характеризует значительную выраженность деформации у данной когорты пациентов.

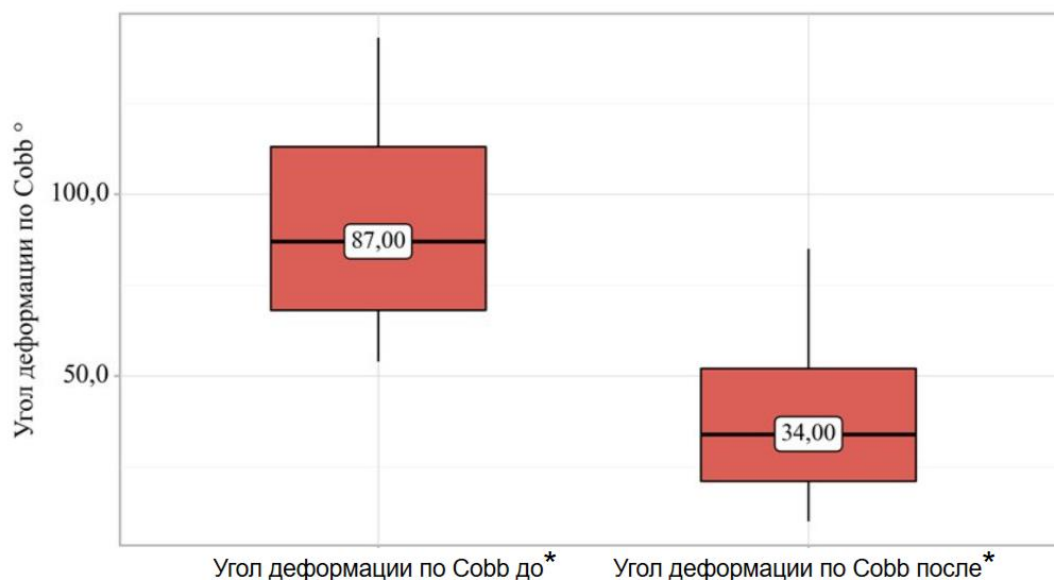


Рис. 3.3.1. Результаты коррекции деформации во II группе (* – $p < 0,001$).

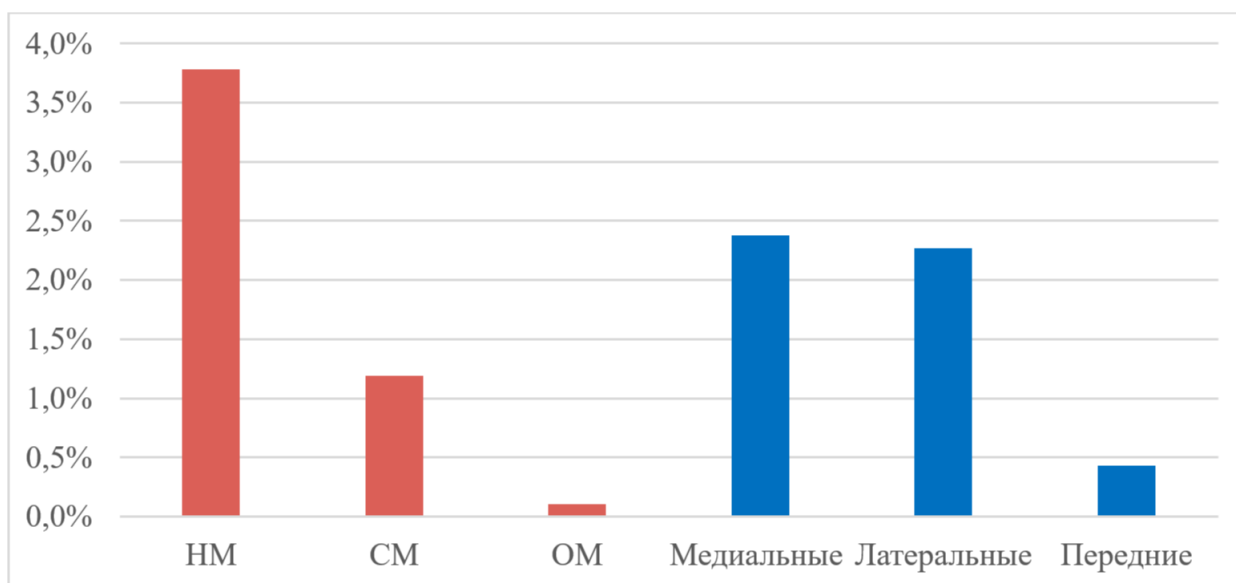


Рис. 3.3.2. Совокупная частота мальпозиций во II группе.

Для коррекции сколиотической деформации грудного и поясничного отделов позвоночника во второй исследуемой группе пациентов было имплантировано 925 транспедикулярных винтов, т.е. на одного пациента, в

среднем, пришлось $20,56 \pm 5,79$ винтов, из которых на послеоперационной КТ констатировано наличие 46 мальпозиций (4,97%).

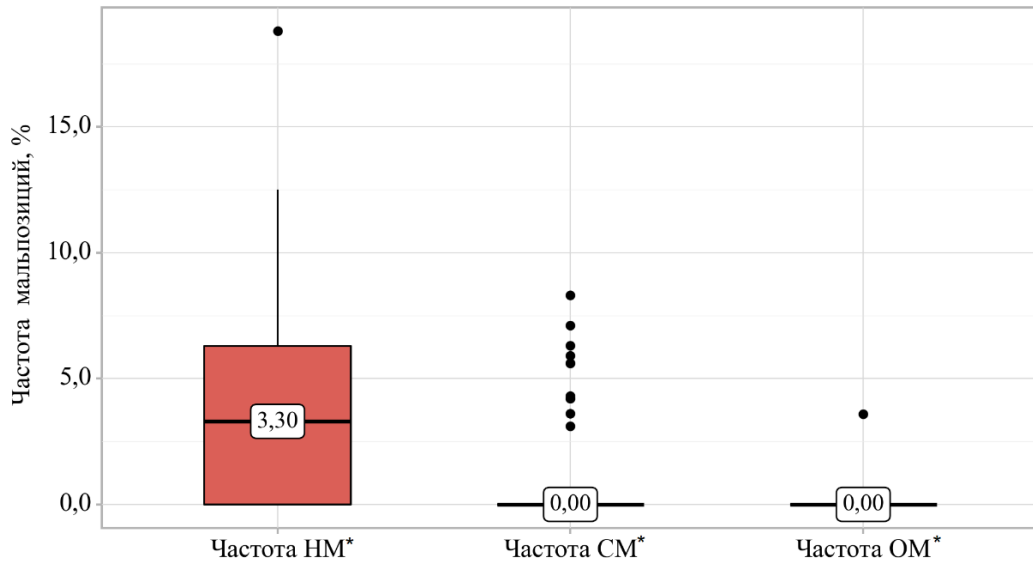


Рис. 3.3.3. Распределение частоты мальпозиций по типу во II Группе (* – р НМ – СМ = 0,003; р НМ – ОМ < 0,001).

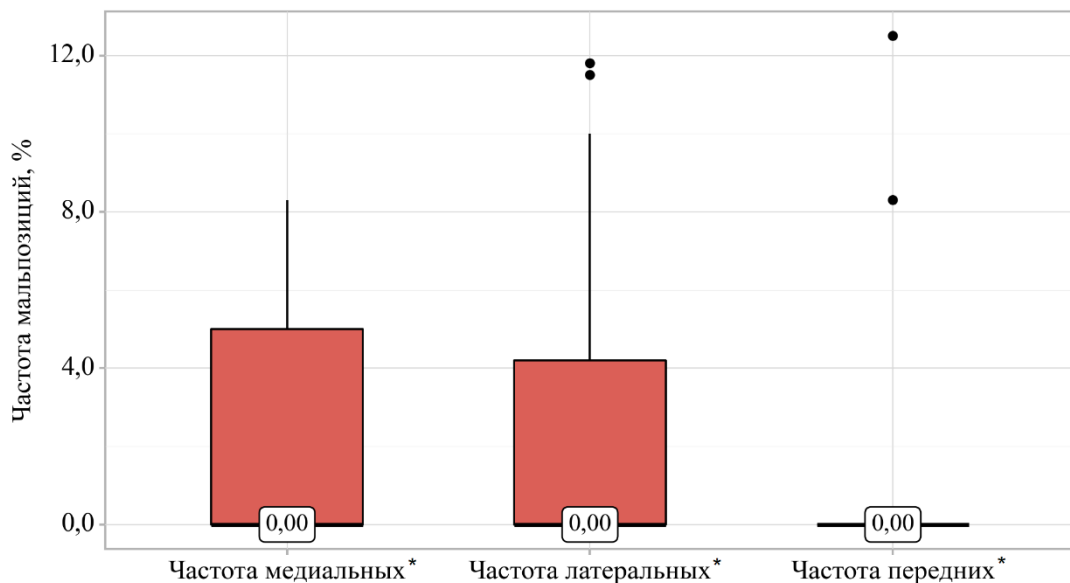


Рис. 3.3.4. Распределение частоты мальпозиций по направлению во II группе (* – р медиальные – передние < 0,001; р латеральные – передние = 0,006).

Распределение частоты всех выявленных видов мальпозиций по направлению представлена на рисунке 3.3.2 большинство из которых были отнесены нами к незначительным (3,8%) или сомнительным (1,2%). При этом, доля опасных мальпозиций составила лишь 0,1%. Медиальные и латеральные

ошибки встречались с одинаковой частотой (по 2,3%), тогда как передние перфорации выявлялись редко - 0,4%.

Распределение частоты по типам, продемонстрированное на рисунке 3.3.3, было статистически неоднородным ($p < 0,001$).

Распределение частоты мальпозиций по направлениям перфорации приведено на рисунке 3.3.4 и также характеризовалось неоднородностью ($p < 0,001$).

Корреляционный анализ показал умеренную прямую связь между исходной величиной деформации и частотой мальпозиций ($r = 0,346$, $p = 0,02$; рис. 3.3.5).

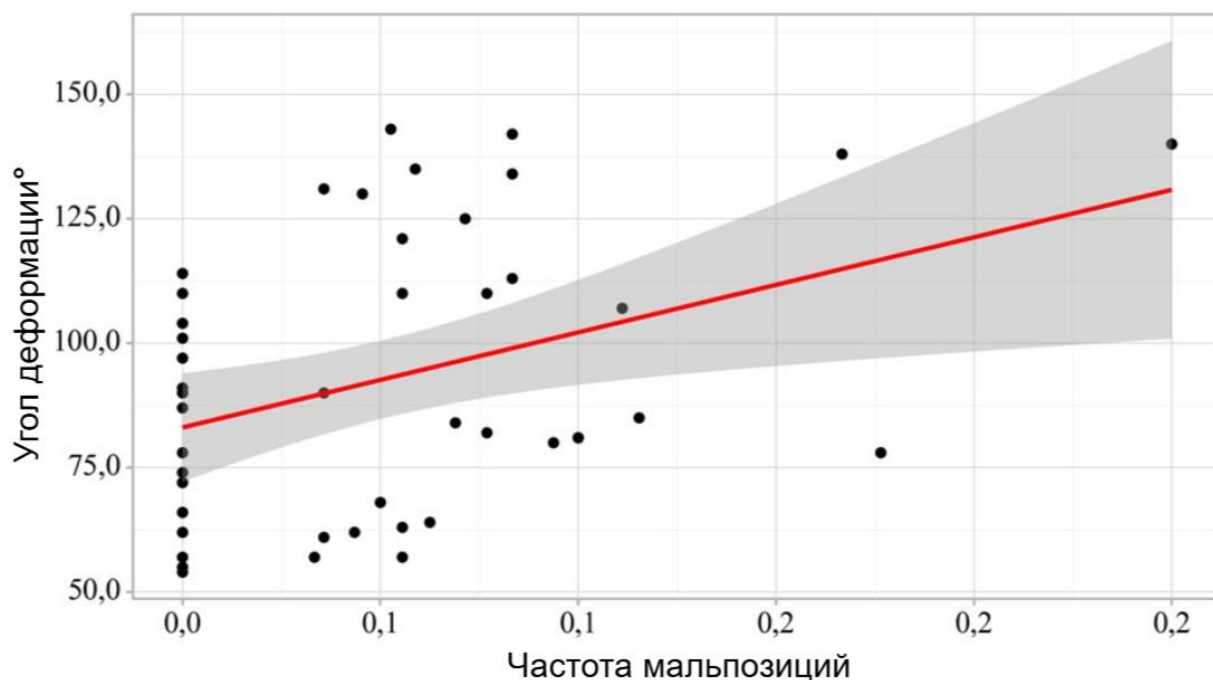


Рис. 3.3.5. График регрессионной функции, характеризующий зависимость исходного угла деформации от частоты мальпозиций во II группе ($r = 0,346$, $p = 0,02$; рис. 3.3.5).

В то же время влияние ротации апикального позвонка оказалось статистически незначимым ($r = 0,057$, $p = 0,709$; рис. 3.3.6).

Таким образом, анализ результатов анализа частоты и структуры мальпозиций ТПВ во второй исследуемой группе пациентов показал, что применение КТ-навигации позволяет обеспечить высокую точность имплантации транспедикулярных винтов даже при выраженной деформации

позвоночника и выраженной ротации апикального позвонка. Общая частота мальпозиций составила 4,97% и преимущественно была представлена незначительными и сомнительными ошибками, тогда как доля клинически опасных перфораций костной стенки корня дуги позвонка оказалась минимальной и составила всего 0,1%.

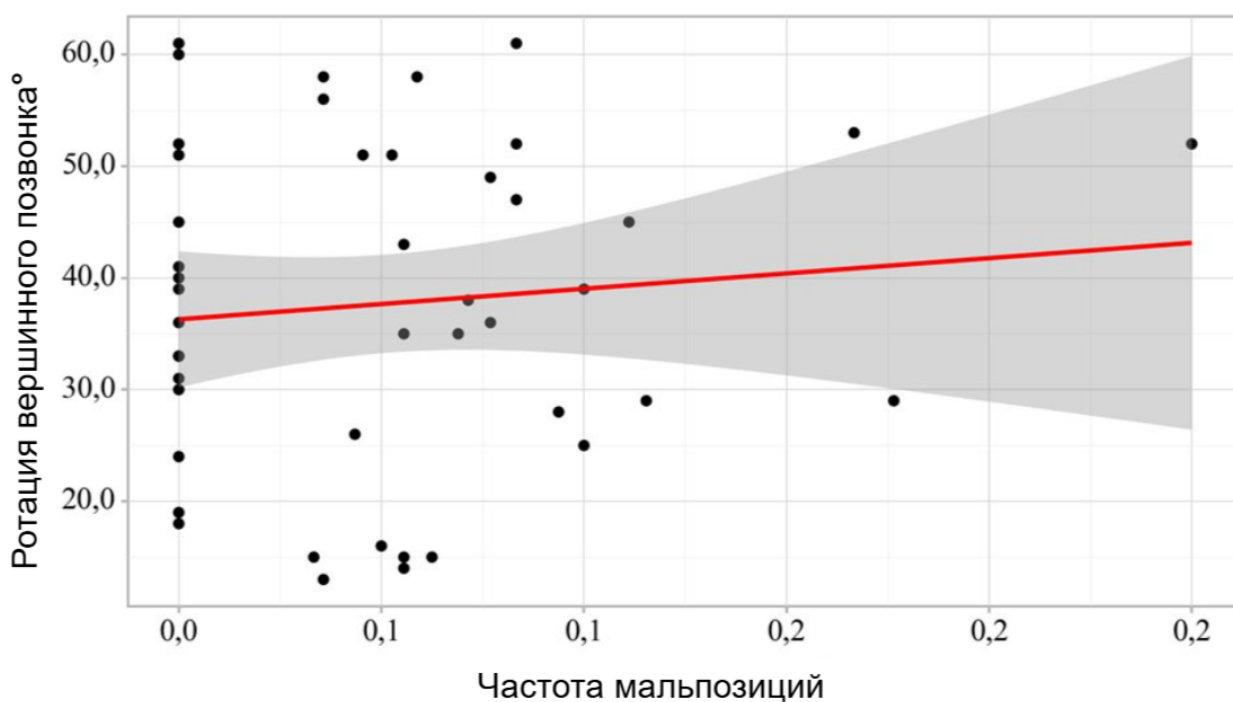


Рис. 3.3.6. График регрессионной функции, характеризующий зависимость ротации верхнего позвонка от частоты мальпозиций во II группе ($r = 0,057$, $p = 0,709$; рис. 3.3.6).

При исследовании влияния рентгеноангулометрических параметров деформации выявлена лишь умеренная связь между величиной исходного угла основной дуги и частотой мальпозиций, тогда как влияние ротации апикального позвонка отсутствовало. Это указывает на то, что навигация эффективно нивелирует влияние ротационного смещения анатомических ориентиров на точность и безопасность имплантации ТПВ.

Распределение перфораций по направлениям демонстрировало сопоставимые доли медиальных и латеральных выходов, а передние перфорации носили единичный характер. В совокупности, полученные

данные демонстрируют, что КТ-навигация практически устраняет ключевые механизмы формирования критических мальпозиций, сохраняя низкую частоту ошибок в независимости от исходной тяжести сколитической деформации.

3.4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИМПЛАНТАЦИИ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ.

Сравнение трёх технологий имплантации транспедикулярных винтов – техники «free-hand» (контрольная группа), аддитивных технологий и КТ-навигации – выявило выраженные различия в частоте технических ошибок (см. таблицу 3.4.1).

Общая частота мальпозиций статистически значимо различалась между группами ($p < 0,001$), что продемонстрировано на рис. 3.4.1. При этом наибольшее количество перфораций отмечено в контрольной группе. Аддитивные технологии и КТ-навигация обеспечивали значительно более высокую точность, что подтверждается значимыми различиями частоты незначительных, сомнительных и опасных мальпозиций между тремя группами ($p < 0,001$) – рис. 3.4.5-3.4.7. Анализ направлений перфораций продемонстрировал значимые различия в группах ($p < 0,001$) – рис. 3.4.2-3.4.4.

При прямом сравнении КТ-навигации и аддитивных направителей не выявлено статистически значимых различий ни по общей частоте мальпозиций, ни по отдельным типам или направлениям перфораций ($p > 0,05$ для всех показателей). Это подтверждает, что обе технологии обеспечивают сопоставимо высокую точность позиционирования винтов.

Корреляционный анализ продемонстрировал существенные различия в степени влияния анатомической сложности на точность имплантации. В контрольной группе отмечена сильная зависимость частоты мальпозиций от исходного угла основной дуги и ротации апикального позвонка ($p < 0,001$), что подчёркивает высокую чувствительность «free-hand» техники к особенностям

индивидуальной анатомии пациентов, обусловленных тяжестью сколиотической деформации.

Таблица 3.4.1. Сравнительный анализ различных технологий имплантации ТПВ.

Показатели				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]	$p_{\text{группа I – контрольная группа}} = 0,014$ $p_{\text{группа II – контрольная группа}} = 0,002$

В группе аддитивных технологий выраженность этих зависимостей снижалась, однако влияние угла деформации и ротации позвонков на точность позиционирования ТПВ сохранялось. Напротив, в группе КТ-навигации влияние ротации отсутствовало полностью, а связь с величиной деформации была минимальной и значительно слабее, чем в остальных группах. Это указывает на способность КТ-навигации практически полностью нивелировать влияние индивидуальной анатомии пациента, связанной с

деформацией позвоночника, которые явились ключевыми факторами риска мальпозиций ТПВ при использовании техники «free-hand».

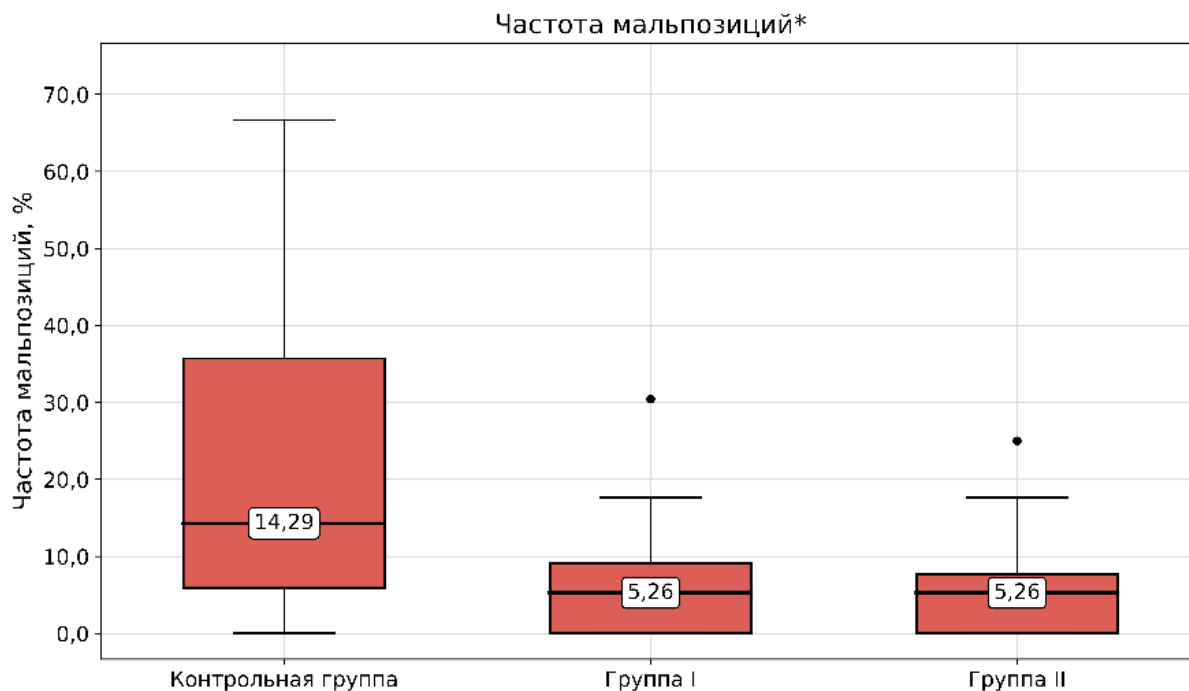


Рис. 3.4.1. Общая частота мальпозиций в группах (* – р группа I – контрольная группа < 0,001; р группа II – контрольная группа < 0,001).

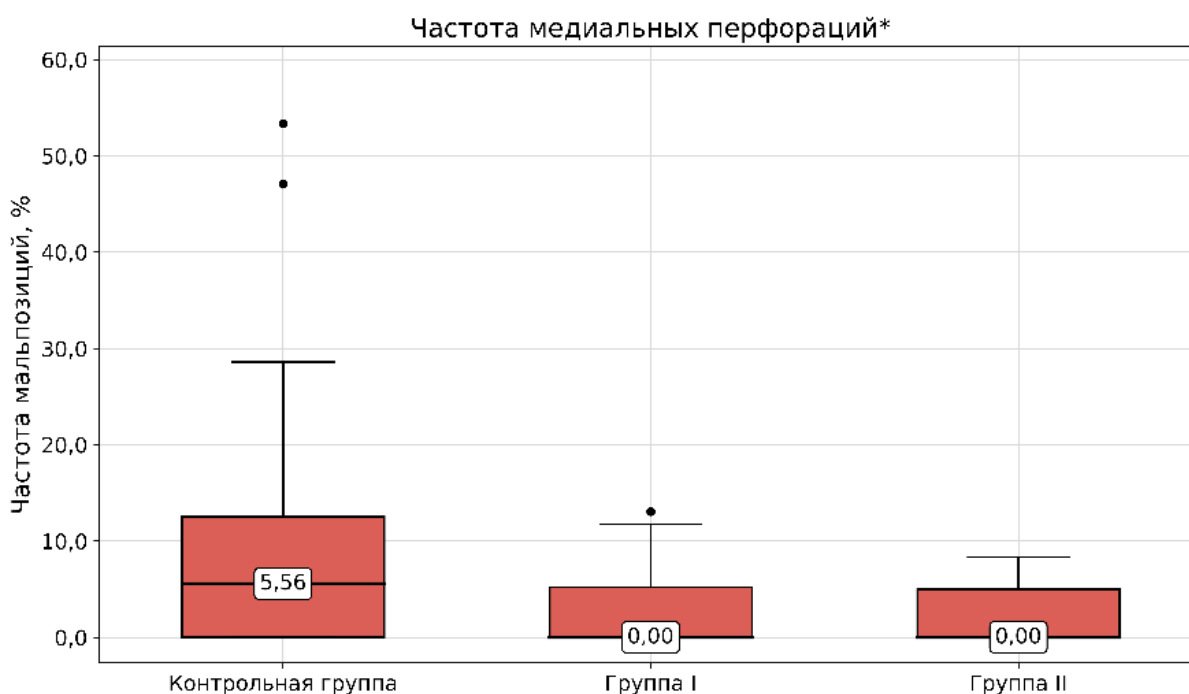


Рис. 3.4.2. Частота медиальных мальпозиций (* – р группа I – контрольная группа = 0,034; р группа II – контрольная группа = 0,034).

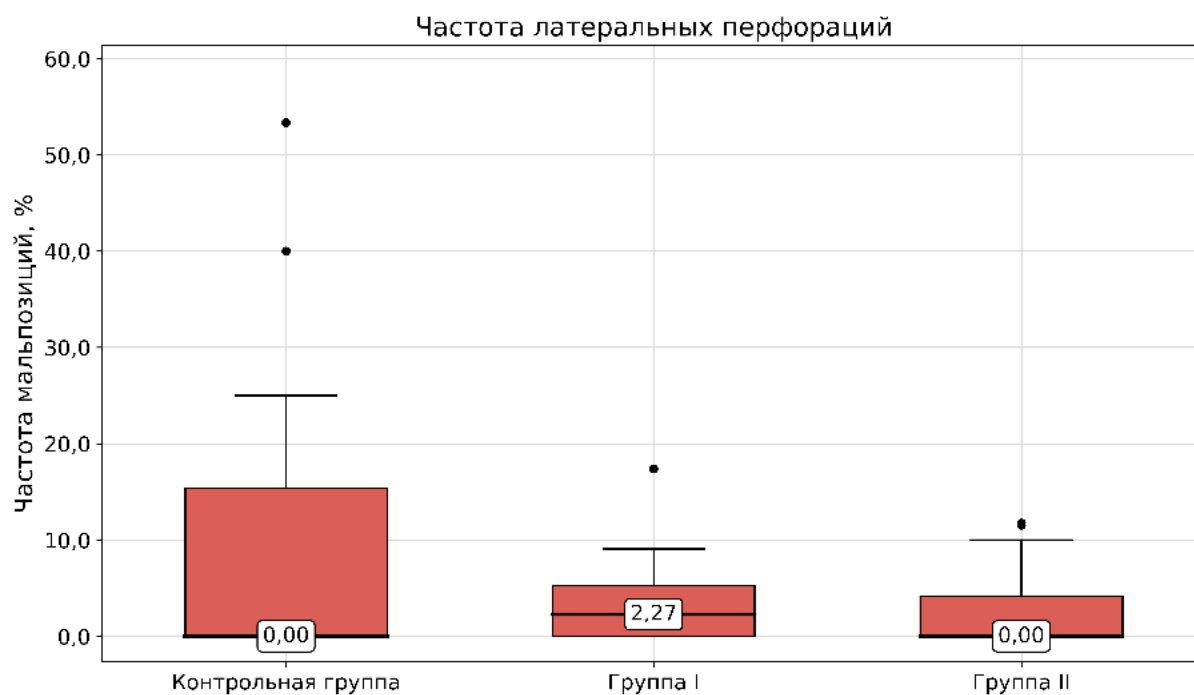


Рис. 3.4.3. Частота латеральных мальпозиций.

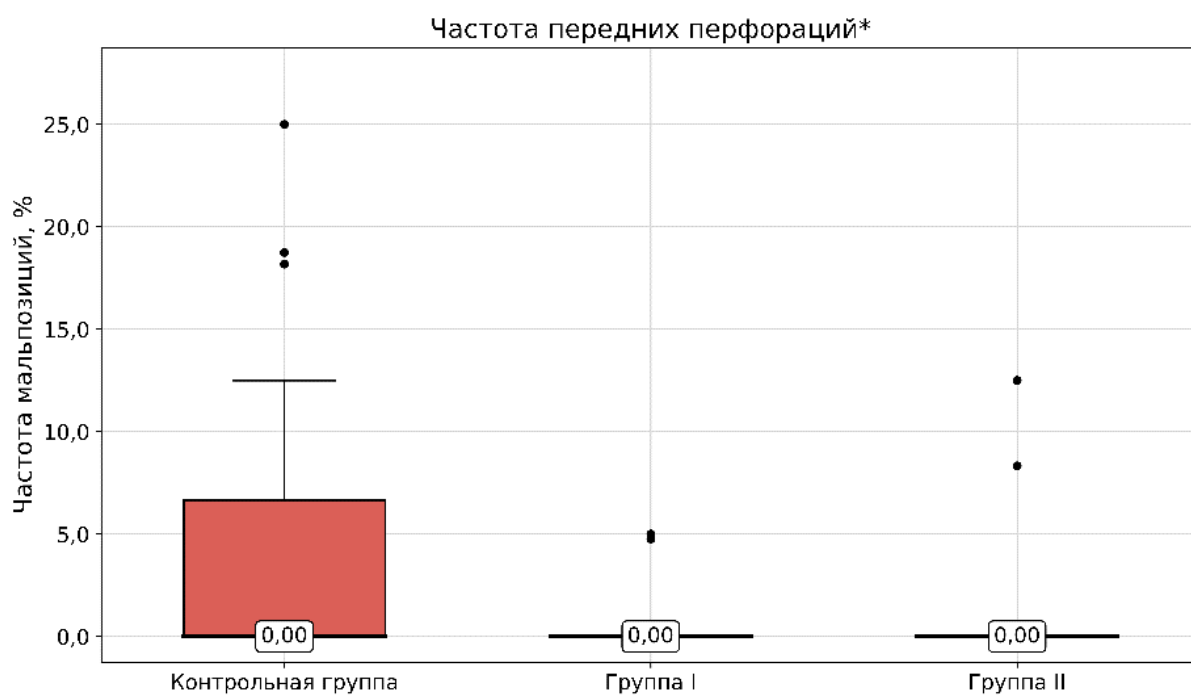


Рис. 3.4.4. Частота передних мальпозиций (* – р группа I – контрольная группа < 0,001; р группа II – контрольная группа < 0,001).

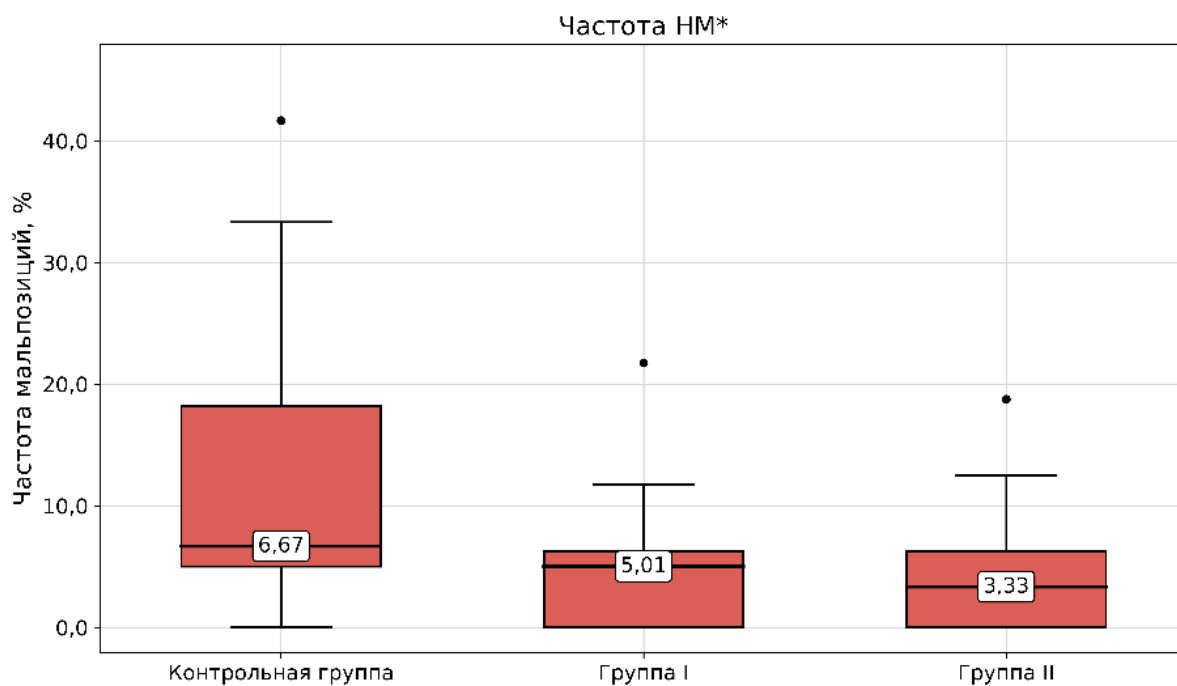


Рис. 3.4.5. Частота незначительных мальпозиций (* – р группа I – контрольная группа = 0,004; р группа II – контрольная группа < 0,001).

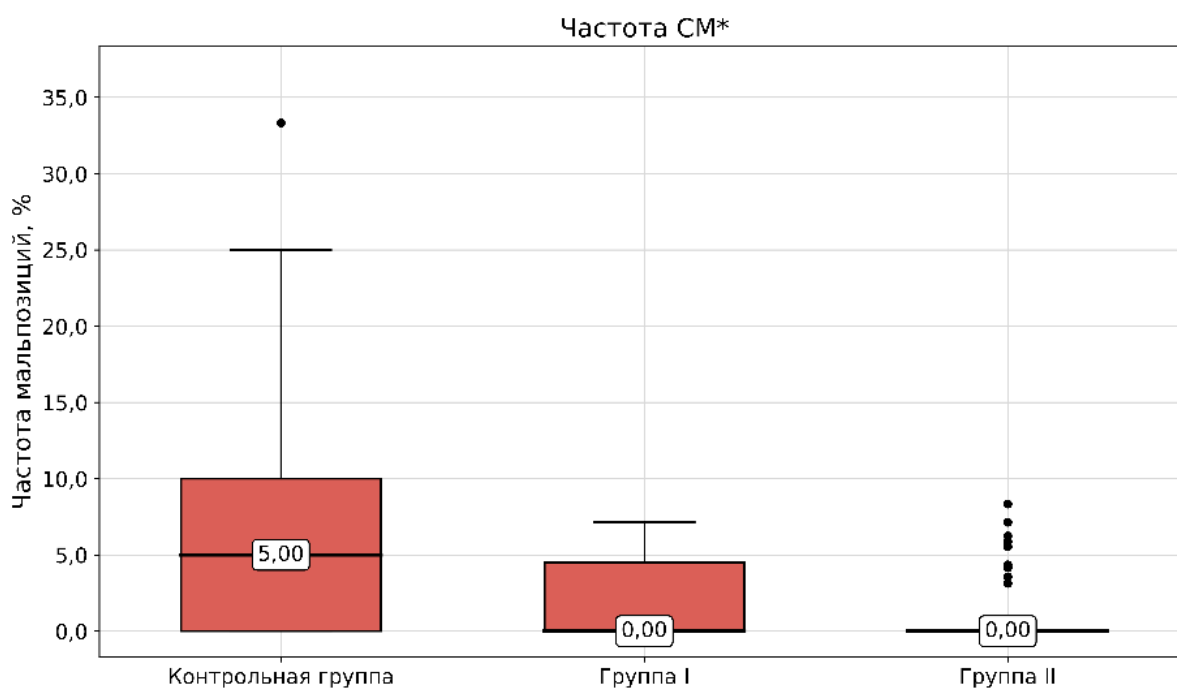


Рис. 3.4.6. Частота сомнительных мальпозиций (* – р группа I – контрольная группа = 0,008; р группа II – контрольная группа < 0,001).

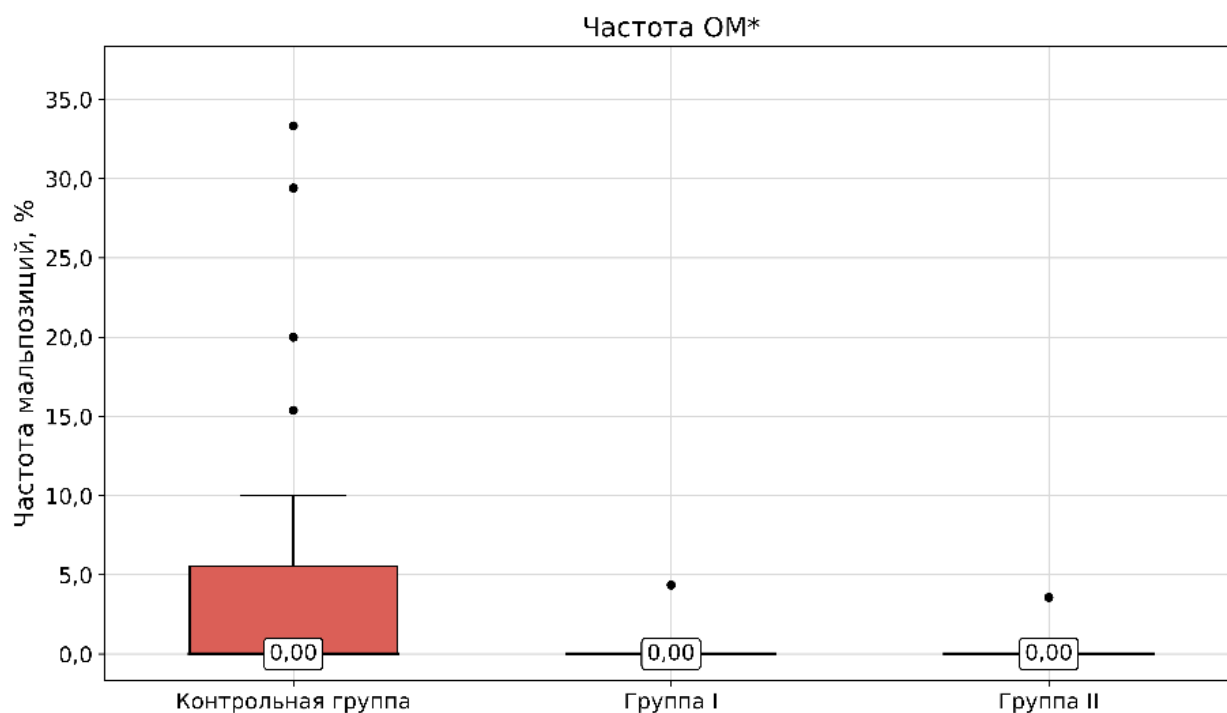


Рис. 3.4.7. Частота опасных мальпозиций (* – р группа I – контрольная группа < 0,001; р группа II – контрольная группа < 0,001).

Таким образом, обе современные технологии – КТ-навигация и аддитивные технологии – обеспечивают статистически значимое снижение частоты мальпозиций по сравнению с техникой «free-hand». При этом КТ-навигация обладает уникальной способностью полностью нивелировать влияние тяжести и морфологии деформации позвоночника на точность имплантации, тогда как аддитивные технологии лишь уменьшают степень выраженности этих эффектов. В совокупности, КТ-навигация является наименее зависимым от анатомических условий методом установки транспедикулярных винтов и демонстрирует наиболее устойчивые результаты по повышению точности имплантации ТПВ в условиях тяжелых сколиотических деформаций позвоночника.

Проведенный сравнительный анализ продемонстрировал статистически значимое снижение частоты мальпозиций при использовании навигационных и аддитивных технологий по сравнению со стандартной техникой, примененной в контрольной группе пациентов. Вместе с тем, клиническую

значимость имеют не только количественные показатели мальпозиций, но и их качественные характеристики, определяющие потенциальный риск интраоперационных осложнений. В связи с этим, следующая часть работы посвящена определению параметров медиальной перфорации, ассоциированных с повышенным риском неврологического дефицита.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА РИСКА НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ, АССОЦИИРОВАННЫХ С МЕДИАЛЬНОЙ МАЛЬПОЗИЦИИ ВИНТОВ.

При написании настоящего раздела использованы фрагменты собственного текста, впервые опубликованные ранее в работах: [10,11]

4.1 КЛИНИЧЕСКИЕ СЛУЧАИ НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ, АССОЦИИРОВАННЫХ С МЕДИАЛЬНОЙ МАЛЬПОЗИЦИЕЙ.

Неврологические осложнения при транспедикулярной фиксации при сколиотических деформациях возникают относительно редко, однако именно они определяют наиболее тяжёлые последствия медиальной мальпозиции ТПВ и во многом задают верхнюю границу допустимого риска. Для иллюстрации клинических сценариев, в которых медиальная перфорация винта приводит к неврологическому дефициту, были проанализированы два показательных клинических наблюдения.

Первый клинический пример: пациентка А., 15 лет. Диагноз при поступлении: идиопатический сколиоз IV степени с крайне тяжёлой деформацией. По данным предоперационного рентгенологического обследования исходная величина основной сколиотической дуги по Cobb составила 103° , ротация вершинного позвонка достигала 54° (рис. 4.1.1). Вершина основной дуги располагалась на уровне L2, что указывало на выраженную трёхмерную деформацию грудопоясничного отдела с максимальной ротацией в зоне будущей опорной фиксации.

Пациентке было выполнено двухэтапное оперативное лечение. На первом этапе проведена многоуровневая трансторакальная дискэктомия на вершине деформации с межтеловым спондилодезом аутотрансплантатами и наложением гало-аппарата с последующей гало-пельвик-тракцией. Послеоперационный период после первого этапа протекал без осложнений, признаков неврологического дефицита не отмечено (рис. 4.1.2).

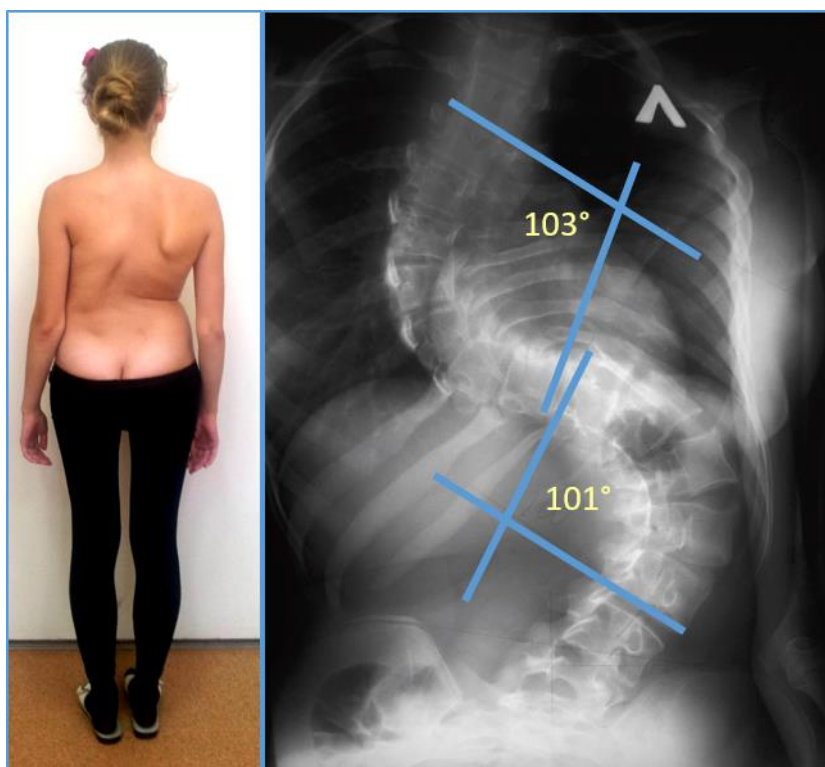


Рис. 4.1.1. Внешний вид и рентгенография пациентки А до оперативного лечения.



Рис. 4.1.2. Внешний вид и рентгенография пациентки А после 1 этапа.

Вторым этапом выполнена задняя коррекция деформации и фиксация позвоночника с применением полисегментарной комбинированной

металлоконструкции с имплантацией ТПВ с применением «free-hand»-техники. Интраоперационно при проведении «wake-up»-тест, движений в нижних конечностях не отмечено. После окончательного пробуждения регистрировались единичные слабые активные движения в голеностопных суставах и суставах стоп, спустя около 2 часов – в коленных и тазобедренных суставах. Интраоперационный рентген-контроль не выявил достоверных признаков мальпозиции опорных элементов металлоконструкции. Клинически, по результату осмотра невролога был констатирован нижний вялый парапарез с нарушением чувствительности и дисфункцией тазовых органов по смешанному типу, соответствующий картине миелопатии.

По данным послеоперационной КТ были выявлены критические медиальные мальпозиции на уровнях Th11 и L3. Следует отметить, что винт на уровне L3 располагался непосредственно ниже вершины основной дуги (L2) и по вогнутой стороне деформации, то есть в зоне максимальной ротации и анатомически наиболее узкого позвоночного канала. В обоих случаях дистальные отделы винтов имели выраженный медиальный выход в сторону позвоночного канала по вогнутой стороне дуги, что в сочетании с крайне тяжёлой исходной деформацией и высокой степенью ротации вершинного позвонка сформировало максимально неблагоприятный профиль риска, и, как следствие – неврологический дефицит.

С учётом клинической картины миелопатии и КТ-картины вышеуказанных критических медиальных мальпозиций по вогнутой стороне принято решение о необходимости ревизионного вмешательства. Выполнено уменьшение дистракции на опорные элементы металлоконструкции и переустановка винтов на уровнях Th11 и L3, соответствующих медиальной мальпозиции (рис. 4.1.3) с восстановлением безопасной траектории. В последующем отмечена постепенная положительная динамика в неврологическом статусе с полным регрессом двигательных и чувствительных нарушений и нормализацией функции тазовых органов в течение трех месяцев после ревизионного вмешательства (рис. 4.1.4).

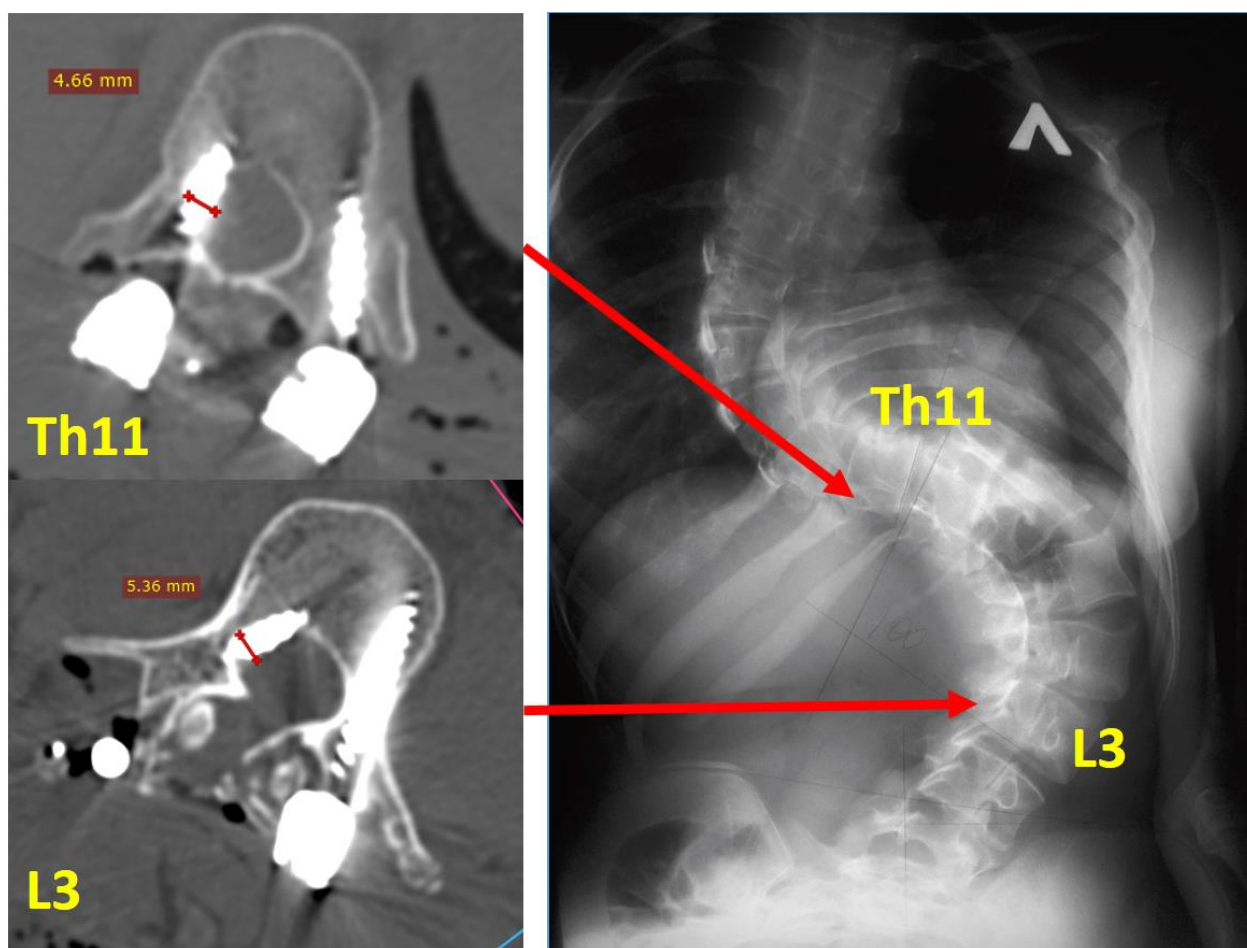


Рис. 4.1.3. Критические медиальные мальпозиции на уровнях Th11 и L3.



Рис. 4.1.4. Результат хирургической коррекции сколиоза у пациентки А.

Таким образом, данный случай демонстрирует сочетание нескольких факторов, ранее идентифицированных в работе как ключевые для риска возникновения неврологических осложнений: угол основной дуги - более 100° , выраженная ротация вершинного позвонка (54°), локализация винта по вогнутой стороне сколиотической дуги и расположение ТПВ в непосредственной близости к вершине деформации. Совокупность этих обстоятельств при использовании техники «free-hand» привела к формированию критической медиальной мальпозиции и развитию неврологического дефицита, купированного после ревизионного оперативного вмешательства.

Второй клинический пример иллюстрирует ситуацию медиальных мальпозиций на фоне нейромышечной деформации и первичной операции, выполненной вне специализированного центра.

Пациент С., 17 лет с диагнозом: нейрогенный грудопоясничный сколиоз IV степени. Последствия перенесённой в возрасте 1 года нейроинфекции (герпетический менингоэнцефалит): грубая задержка психомоторного развития, стойкий спастический тетрапарез, структурная фокальная эпилепсия, нейрогенная дисфункция мочевого пузыря.

Появление и прогрессирование деформации позвоночника отмечено с 2016 года. В 2018 году пациенту выполнено первичное оперативное вмешательство – задняя коррекция и фиксация грудопоясничного отдела позвоночника с применением полисегментарной транспедикулярной конструкции. Операция проводилась в другом лечебном учреждении, не являющемся специализированным центром по хирургии сложных сколиотических деформаций (рис. 4.1.5). По имеющимся данным, вмешательство выполнялось без использования интраоперационной навигации, аддитивных технологий и нейромониторинга; опыт оперирующего хирурга в области сложной деформационной хирургии позвоночника был ограничен. В совокупности это могло способствовать формированию

некорректного положения части транспедикулярных винтов и последующему развитию неврологических осложнений.

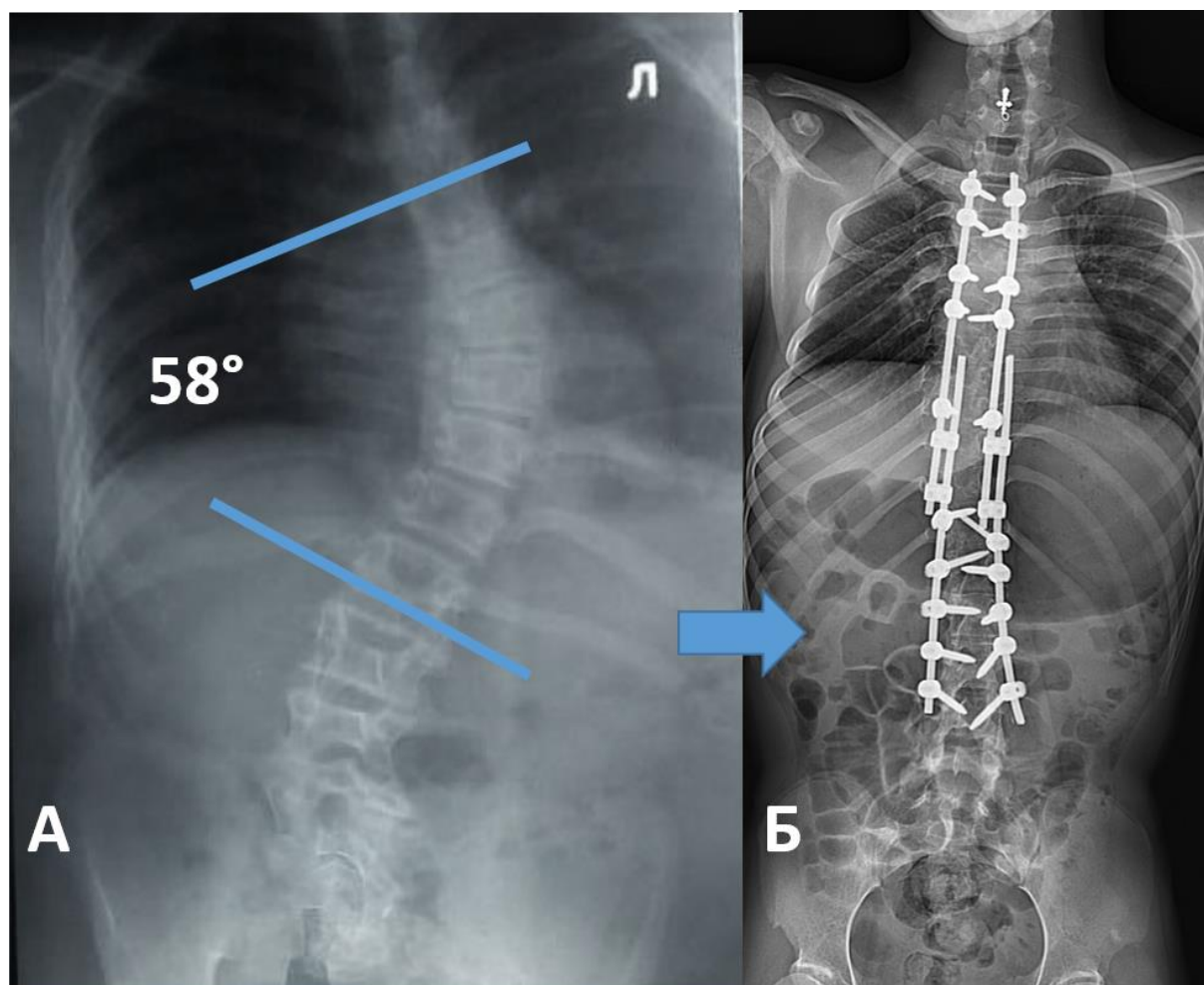


Рис. 4.1.5. А – рентгенография пациента С до оперативного лечения. Б – результат первичного хирургического вмешательства.

После первичной операции у пациента сформировался стойкий нижний правосторонний вялый парализ, выраженный болевой синдром, усугубление нейрогенной дисфункции мочевого пузыря по типу задержки мочи. Несмотря на проводимую консервативную терапию, отмечался лишь частичный и нестойкий положительный эффект. В отдалённом периоде сохранялась полная утрата активных движений в правой стопе; по данным ЭНМГ регистрировалось отсутствие М-ответа с соответствующей группы мышц, что свидетельствовало о сформировавшемся стойком неврологическом дефиците.

Пациент был направлен для дообследования в наш Центр для выявления причин стойких неврологических нарушений и определения показаний к ревизии металлоконструкции. При обследовании, включая КТ, в условиях сформировавшегося спондилодеза и изменённой анатомии позвонков отмечались критические мальпозиции ТПВ.

С учётом выраженного неврологического дефицита, данных лучевого обследования и риска дальнейшей прогрессии деформации принято решение о ревизии конструкции. К моменту вмешательства сформировался грубый костный блок, остистые отростки на ряде уровней были резецированы, нормальные анатомические ориентиры для техники «free-hand» оказались резко искажены или отсутствовали. В этих условиях повторная имплантация винтов без дополнительных способов визуализации была бы сопряжена с высоким риском новых мальпозиций и усугубления неврологических нарушений.



Рис. 4.1.6. Внешний вид и рентгенография пациента С после ревизионного вмешательства.

Ревизионная операция выполнялась с использованием интраоперационной КТ-навигации, которая стала ключевым инструментом обеспечения безопасности вмешательства в условиях отсутствия стандартных

анатомических ориентиров. Навигация позволила выполнить точное планирование и контролируемое перепроведение винтов на уровнях Th3, Th12, L1 и L4, минимизируя риск повторных медиальных перфораций и повреждения невральных структур (рис. 4.1.6-4.1.7).

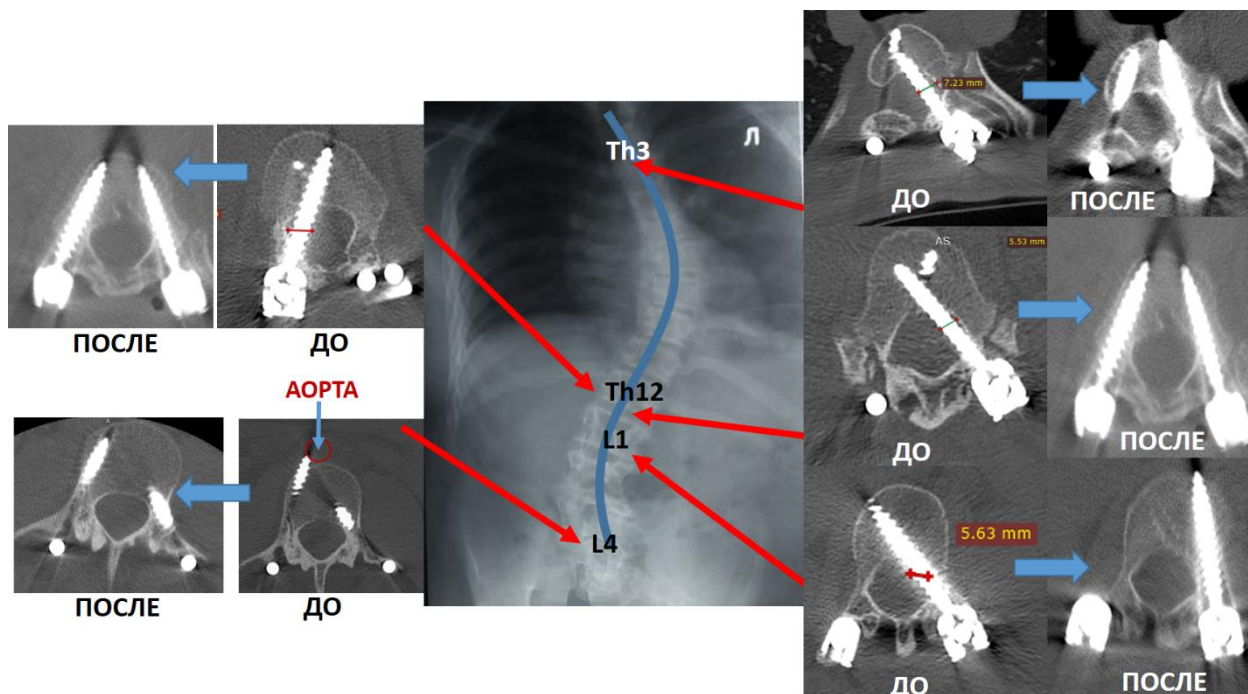


Рис. 4.1.7. Выявленные критические мальпозиции до и после ревизионного вмешательства.

Отсутствие существенной позитивной динамики неврологического статуса в течение года после ревизионного вмешательства, несмотря на корректное положение винтов по данным КТ, косвенно свидетельствует о стойком характере поражения и, вероятнее всего, позднем устранении повреждающего фактора. Этот случай иллюстрирует сочетание факторов повышенного риска – нейрогенной деформации, первичной операции, выполненной вне специализированного центра и без применения современных технологий контроля положения винтов, а также необходимости технически сложной ревизии в условиях отсутствия стандартных анатомических ориентиров – и подчёркивает клиническую важность максимально раннего выполнения ревизионного вмешательства при выявлении критических медиальных перфораций.

Следует подчеркнуть, что этот пациент рассматривался нами как отдельное клиническое наблюдение и использовался преимущественно для качественной оценки медиальных перфораций и обсуждения пороговых значений их глубины. В связи с тем, что первичная операция выполнялась в другом учреждении, в иных условиях и при ограниченном опыте хирургии деформаций позвоночника, данный случай не включался в формализованный анализ факторов риска и построение прогностической модели, представленных в последующих разделах работы.

Таким образом, приведённые клинические наблюдения демонстрируют, что клинически значимые неврологические осложнения ассоциируются с медиальными перфорациями большой глубины, локализованными по вогнутой стороне дуги, преимущественно в области вершины деформации и на фоне тяжёлых или нейромышечных форм сколиоза. Эти качественные наблюдения стали основанием для последующего количественного анализа пороговых значений глубины медиальной перфорации.

4.2 АНАЛИЗ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГЛУБИНЫ МЕДИАЛЬНОЙ ПЕРФОРАЦИИ КАК ПРЕДИКТОРА НЕВРОЛОГИЧЕСКОГО ДЕФИЦИТА.

Одной из задач исследования явилась оценка взаимосвязи между глубиной медиальной перфорации транспедикулярного винта и риском возникновения неврологических осложнений. Первоначально планировалось проведение полноценного ROC-анализа для определения оптимального порогового значения глубины медиальной перфорации, позволяющего разделить пациентов с формированием неврологического дефицита и без него. Такой подход предполагает наличие достаточного количества клинических событий (как правило, не менее 10 положительных исходов), что необходимо для устойчивого расчёта чувствительности, специфичности и площади под кривой (AUC).

Однако в настоящем исследовании количество клинически выраженных мальпозиций оказалось ограниченным – в группе зафиксировано два случая

неврологического дефицита по причине медиальной мальпозиции винта. Это делает использование ROC-анализа статистически некорректным по нескольким причинам. Расчёт AUC при столь малом числе положительных исходов становится математически неустойчивым: даже минимальные изменения в выборке приводили бы к существенным колебаниям результатов.

С учётом этих ограничений вместо ROC-анализа была применена альтернативная методика порогового анализа, основанная на прямом переборе всех возможных значений глубины медиальной перфорации, присутствующих в выборке. Для каждого потенциального порогового значения были рассчитаны чувствительность и специфичность относительно двух зафиксированных клинических случаев. Такой подход не претендует на получение универсального статистически достоверного порога, но позволяет выявить диапазоны значений, при которых в рамках существующей выборки наблюдается изменение риска осложнений.

Результаты анализа показали, что у большинства пациентов глубина медиальной перфорации была невелика и не превышала 3–3,5 мм; такие значения в исследовании не сопровождались развитием неврологических нарушений. Напротив, оба клинических случая неврологических осложнений ассоциировались с выраженными медиальными перфорациями глубиной 5,5 мм и 7,4 мм соответственно. При пороговых значениях медиального выхода 5–6 мм чувствительность достигала 100%, поскольку оба пациента с дефицитом имели перфорации, превышающие эту границу. Специфичность при этом оставалась высокой, что указывает на ограниченное количество ложноположительных срабатываний. Напротив, повышение порога до 7 мм приводило к снижению чувствительности до 50%, поскольку один из двух клинических случаев имел перфорацию меньшей глубины (5,5 мм).

Важным наблюдением стала также значимая роль топографии медиальной перфорации. Оба осложнения распределялись исключительно в зоне медиальной перфорации по вогнутой стороне дуги. В рамках выборки ни один пациент с медиальным выходом меньшей глубины или с локализацией

по выпуклой стороне не имел неврологического дефицита. Более того, один из случаев осложнений был связан с медиальной перфорацией, расположенной непосредственно в апикальной зоне сколиотической деформации, что подчёркивает значимость взаимосвязи глубины выхода и степени выраженности ротации позвонка.

Таким образом, несмотря на невозможность использования классического ROC-анализа, применение порогового анализа позволило выявить чёткую тенденцию: риски неврологического дефицита в настоящей выборке возникали только при медиальных перфорациях глубиной не менее 5,5 мм, причём в обоих случаях – по вогнутой стороне и в анатомически уязвимой зоне. Эти результаты не могут рассматриваться как четко статистически доказанный порог формирования неврологических осложнений, однако отражают последовательную внутреннюю логику данных и позволяют сформулировать клиническую рекомендацию в рамках консервативного подхода: медиальные перфорации глубиной $\geq 5-6$ мм, особенно по вогнутой стороне и в пределах центрального угла сколиотической дуги, следует рассматривать как потенциально опасные и требующие либо интраоперационной коррекции, либо раннего послеоперационного контроля с последующей ревизией металлоконструкции при обнаружении.

ГЛАВА 5. ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РИСКА МАЛЬПОЗИЦИЙ.

При написании настоящего раздела использованы фрагменты собственного текста, впервые опубликованные ранее в работах: [11]

Несмотря на очевидное снижение частоты технических ошибок при использовании аддитивных технологий и особенно КТ-навигации, выбор показаний к их применению при коррекции сколиоза у детей нередко остаётся субъективным и во многом основан на экспертной интуиции хирурга. Между тем результаты проведённого исследования показали, что риск мальпозиции при использовании техники «free-hand» имеет чёткую и воспроизводимую зависимость от объективных рентгенологических характеристик деформации, включая величину фронтального наклона и степень ротации апикального позвонка.

Эти данные продемонстрировали потенциальную возможность перехода от субъективной оценки сложности деформации к количественному прогнозированию вероятности технической ошибки на уровне каждого конкретного инструментируемого позвонка. Формализация такого подхода позволила бы объективизировать выбор технологии имплантации, повысить предсказуемость результата и стандартизировать процесс предоперационного планирования. Этим продиктована необходимость разработки прогностического инструмента, способного на основе измеряемых рентгенологических параметров определять индивидуальный риск мальпозиции транспедикулярного винта. С этой целью была разработана бинарная логистическая модель, направленная на оценку вклада фронтального наклона и ротации позвонка в риск неточной установки транспедикулярного винта при использовании «free-hand» техники. Анализ показал, что оба параметра оказывают статистически значимое влияние на вероятность мальпозиции, однако наибольший вклад вносит величина ротации инструментируемого позвонка.

Согласно полученной модели, рост угол фронтального наклона инструментируемого позвонка на 1° увеличивал шансы мальпозиции винта на

2,7% (ОШ 1,027; 95% ДИ 1,013–1,042), тогда как увеличение ротации на 1° – на 5,0% (ОШ 1,050; 95% ДИ 1,030–1,070). Это подтверждает ключевую роль ротации позвонка в трудности нахождения правильной траектории ТПВ (рис. 5.1.1). Разработанная бинарная логистическая модель на основе фронтального наклона и ротации инструментируемого позвонка является статистически значимой ($p < 0,001$; псевдо- R^2 Найджелкерка 10,3%)

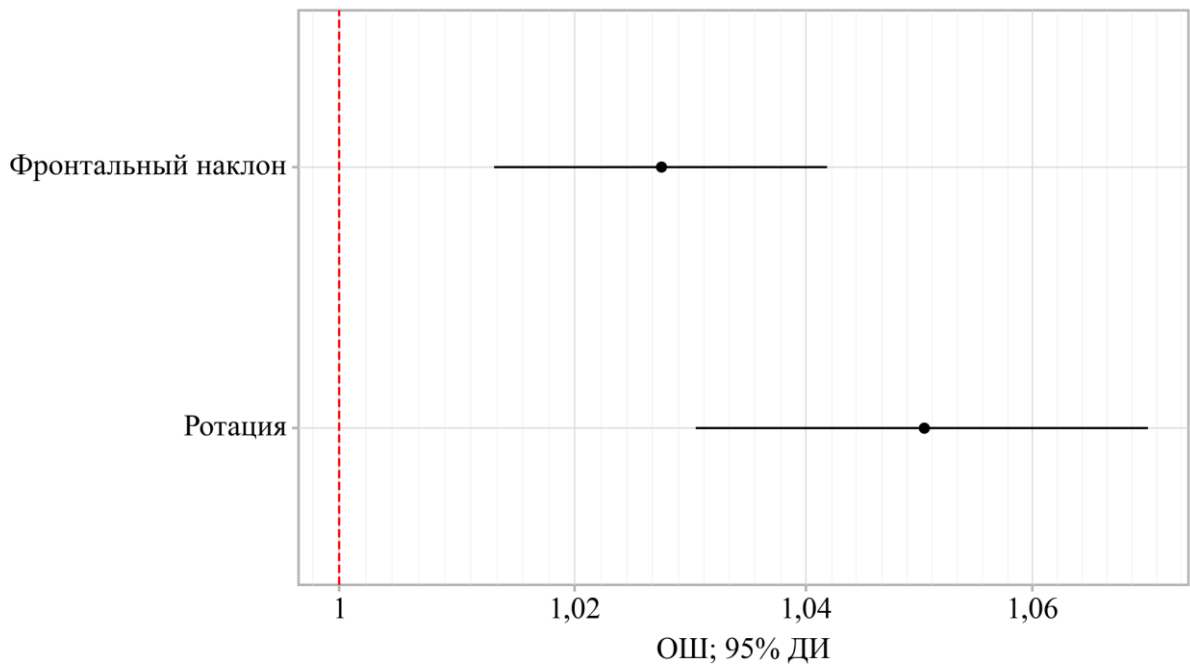


Рис. 5.1.1. Оценки отношения шансов с 95% ДИ для изучаемых предикторов.

Для оценки диагностической способности модели был выполнен ROC-анализ. Значение площади под ROC-кривой составило $AUC = 0,682$ (95% ДИ 0,631–0,733; $p < 0,001$), что соответствует умеренной дискриминационной способности (рис. 5.1.2). Несмотря на относительную простоту модели и ограниченность набора предикторов мальпозиции ТПВ, она позволила выявить закономерности, имеющие прямую клиническую значимость.

Оптимальное пороговое значение вероятности (cut-off), определённое по индексу Юдена, составило $P = 0,212$, при котором чувствительность модели составляла 70,5%, а специфичность – 62,5% (рис. 5.1.3). Таким образом,

вероятность мальпозиции $\geq 20\%$ может рассматриваться как практический ориентир при принятии решения об использовании навигационных методов.

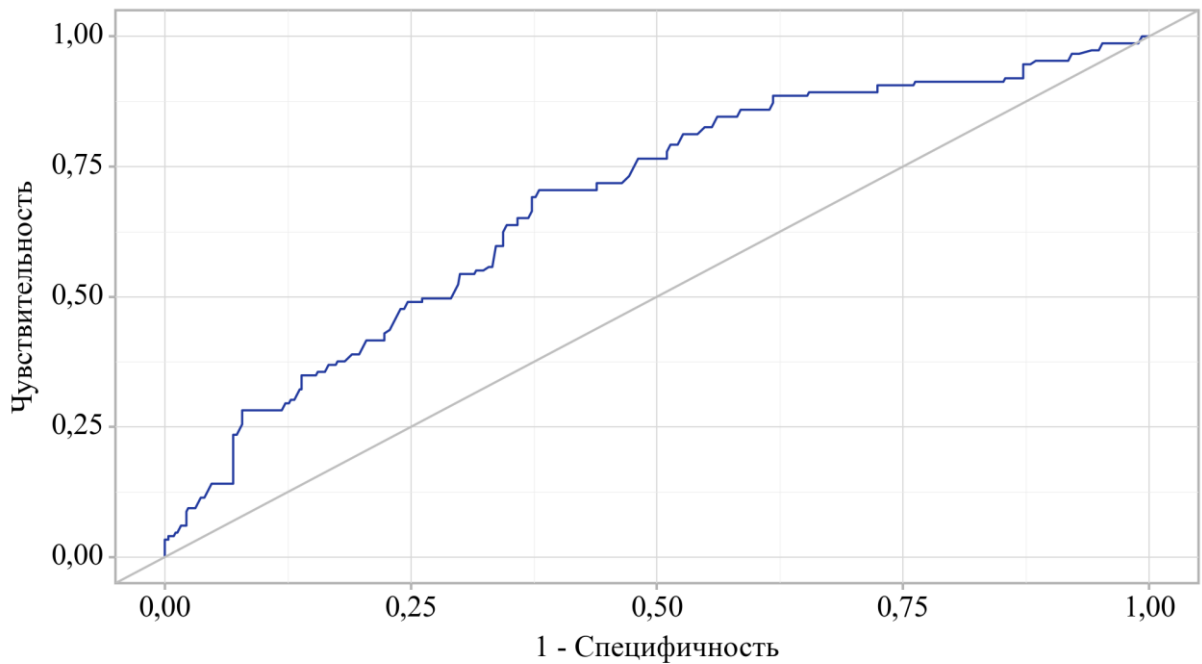


Рис. 5.1.2. ROC-кривая, характеризующая дискриминационную способность регрессионной модели при прогнозировании наличия мальпозиции.

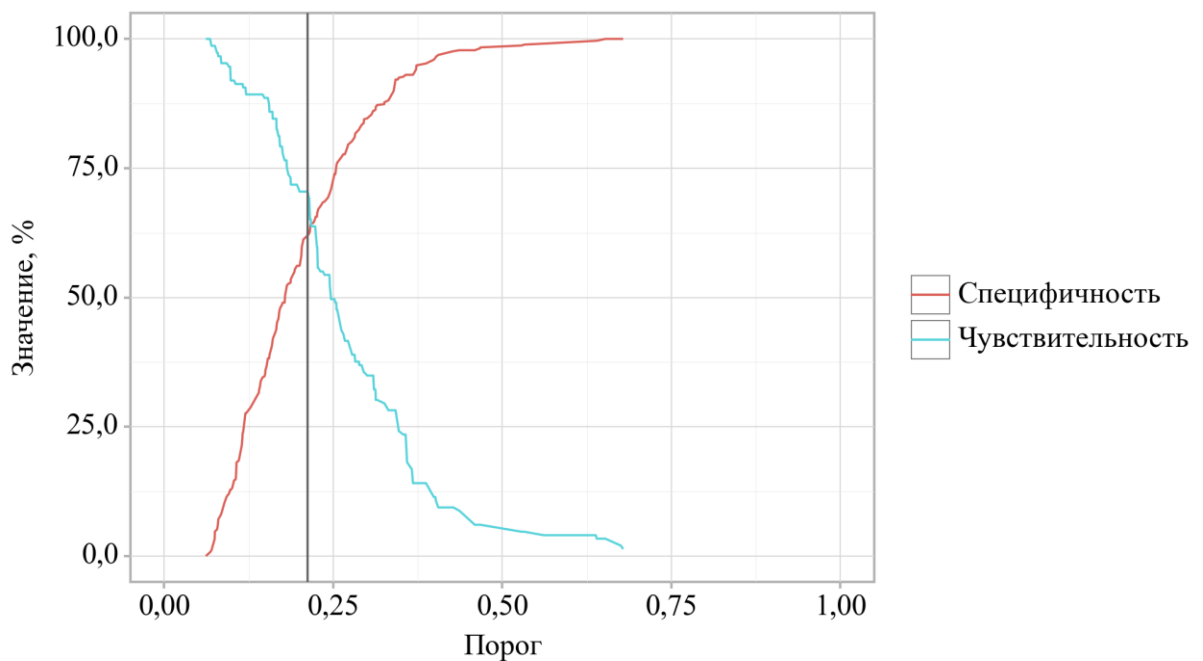


Рис. 5.1.3. Анализ чувствительности и специфичности модели в зависимости от пороговых значений.

Интерпретация полученного «cut-off» показала, что для достижения значения $P \geq 0,212$ характерны комбинации фронтального наклона и ротации инструментируемого позвонка от 20° и более на том же уровне. Такие значения могут рассматриваться как зона существенно повышенного риска неточной установки винта при «free-hand» технике имплантации. Особенно критичной становится ситуация, когда одновременно присутствуют фронтальный наклон и ротация инструментируемого позвонка $\geq 20^\circ$, что приводит к вероятности мальпозиции, превышающей диагностический порог, установленный ROC-анализом. Полученные данные подтверждают, что в реальной клинической практике, именно сочетание фронтального наклона и ротации позвонка, а не каждый параметр по отдельности, создаёт наиболее неблагоприятные условия для выбора оптимальной траектории имплантации ТПВ. Такие уровни требуют особого внимания на этапе предоперационного планирования. В случаях, когда планируемый уровень инструментирования демонстрирует фронтальный наклон и ротацию около 20° или превышающие эти значения, целесообразно рассматривать использование навигационных методов установки винтов или переход на альтернативные варианты фиксации (например, применение крючковой или комбинированной компоновки металлоконструкции), особенно при отсутствии четкой визуализации анатомических ориентиров.

Таким образом, проведённый анализ позволил не только количественно определить влияние угла фронтального наклона и ротации инструментируемого позвонка на риск возникновения мальпозиции, но и выделить пороговые значения, имеющие практическое значение для предоперационного планирования и выбора технологии имплантации. Эти данные расширяют возможности персонализации хирургической тактики и могут быть использованы в качестве инструмента для стратификации риска при планировании операций у пациентов с тяжелой сколиотической деформацией грудного и поясничного отделов позвоночника.

ГЛАВА 6. ОЦЕНКА РИСКА НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ И ТАКТИКА ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ МАЛЬПОЗИЦИЙ.

6.1 ОЦЕНКА РИСКА НЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ.

Результаты проведенного исследования показали следующее: выполненный пороговый анализ глубины медиальной перфорации костной стенки корня дуги позвонка продемонстрировал, что в данной выборке клинически выраженные неврологические осложнения наблюдались только при выраженных медиальных выходах винта в позвоночный канал более, чем на 5 мм по вогнутой стороне дуги в анатомически уязвимой зоне. При этом медиальные перфорации меньшей глубины, а также медиальные выходы по выпуклой стороне в анализируемом материале не сопровождалась неврологическим дефицитом. Данные утверждения основаны на ограниченном числе клинических событий и отражают прежде всего внутреннюю логику представленной серии наблюдений, а не универсальный статистически верифицированный порог, применимый к любой популяции пациентов.

Принципиально важно, что значение - более 5 мм в рамках настоящего исследования следует рассматривать как порог реализации осложнений в конкретной выборке, а не как границу безопасности. Клиническая тактика должна быть ориентирована не на констатацию уже реализованного дефицита, а на его профилактику, то есть на - стратификацию риска и коррекцию потенциально опасных ситуаций до развития осложнений. В этом контексте пороги, используемые в алгоритме, логично разделить на два уровня: порог реализации осложнений, выявленный по данным собственной серии, и профилактический порог настороженности, ориентированный на предупреждение неблагоприятных исходов.

Сопоставление собственных наблюдений с данными литературы показывает, что полученные результаты укладываются в общепринятую концепцию зон риска медиальной перфорации. Согласно систематическому обзору Mulyadi и соавт. (2024), медиальные перфорации глубиной менее 2 мм

в большинстве включённых серий не сопровождались развитием клинически значимого неврологического дефицита; в диапазоне 2–4 мм риск неврологических осложнений возрастает, а при выходе винта более 4 мм отмечается дальнейшее увеличение риска развития неврологического дефицита [107]. Эти данные согласуются с широко используемой шкалой Gertzbein–Robbins и рядом работ, где медиальные перфорации до 2 мм рассматриваются как удовлетворительное положение винта, а смещения более 2 мм трактуются как потенциально клинически значимые и требующие осторожности или коррекции [90]. Обзор современных классификаций положения транспедикулярных винтов также относит медиальные выходы 2–4 мм к пограничным, а более 4 мм к клинически неблагоприятным [18].

Вместе с тем, в хирургии сколиоза ключевое значение имеет не только абсолютная глубина выхода импланта в позвоночный канал, но и особенности топографии конкретной сколиотической дуги. Морфометрические и МРТ-исследования при идиопатическом сколиозе показали, что анатомический резерв эпидурального пространства минимален именно на вогнутой стороне сколиотической дуги и в области её вершины, где расстояние от спинного мозга до медиальной стенки корня дуги часто составляет менее 2 мм, тогда как на выпуклой стороне оно существенно больше [35,152,154]. Следовательно, одинаковая по глубине медиальная перфорация может иметь принципиально разную клиническую значимость в зависимости от того, установлена ли она по вогнутой или по выпуклой стороне и относится ли сегмент к апикальной зоне деформации. Эта логика была заложена в исследование заранее: анализировались сторона дуги, положение винта относительно вершины и смежных уровней, а также направление и глубина выхода. В итоге становится очевидным, что даже умеренная медиальная перфорация костной стенки корня дуги позвонка, в диапазоне 2–4 мм по вогнутой стороне и в апикальной зоне потенциально переносится хуже, чем аналогичная по глубине перфорация по выпуклой стороне деформации, вне зоны максимального риска мальпозиции. Поэтому в клиническом алгоритме диапазон 2–4 мм нельзя

трактовать одинаково во всех ситуациях: это зона настороженности, а окончательное решение принимается оперирующим хирургом и определяется индивидуально.

С практической точки зрения это приводит к необходимости клинически ориентированной интерпретации лучевых находок. Важно подчеркнуть ограниченность наиболее распространённых градаций, основанных только на величине выхода винта за пределы костных контуров. В рамках такого подхода мальпозиции часто классифицируются по степени перфорации: до 2 мм как 1 степень, 2–4 мм как 2 степень и более 4 мм как 3 степень. Однако подобная шкала не отражает клиническую неоднородность ситуаций: латеральная перфорация 5 мм в поясничном отделе, прикрытая поясничной мышцей и удалённая от критических структур, может не иметь клинических последствий, тогда как медиальная перфорация 4 мм на вершине деформации по вогнутой стороне при минимальном анатомическом резерве позвоночного канала потенциально является критической. Следовательно, одинаковая формальная степень перфорации не означает сопоставимого риска осложнений, а клиническая значимость мальпозиции определяется сочетанием направления, уровня фиксации, топографии деформации и близости к уязвимым анатомическим структурам.

В настоящей работе в качестве базовой использована классификация Sarwahi и соавт. (2016), включающая категории AP, BMP, IMP и SAR, как одна из наиболее приближенных к клинической практике. Однако для оптимизации тактики в хирургии сколиоза данная система нуждается в уточняющей интерпретации с учётом специфики деформации. Поэтому в главе предлагается использовать русскоязычную клиническую привязку категорий, удобную для принятия решений, при сохранении исходной логики Sarwahi:

- ТП точное положение соответствует AP;
- НМ незначимая мальпозиция соответствует BMP;
- СМ сомнительная мальпозиция соответствует IMP;
- ОМ опасная мальпозиция соответствует SAR.

Суть предлагаемой модификации заключается не в создании новой независимой классификации, а в клинически обоснованном уточнении переходов между категориями при сколиозе, когда формально пограничные варианты в определённых условиях фактически становятся высокорисковыми. Наиболее важные уточнения касаются направлений мальпозиции и их влияния не только на риск повреждения критических структур, но и на опороспособность фиксации.

Для латеральных мальпозиций клинически допустимым вариантом, относимым к НМ, рассматривается только экстрапедикулярное положение, при котором винт проходит вне корня дуги, но сохраняет внутрикостное расположение в теле позвонка и не приближается к критическим анатомическим структурам. Напротив, латеральное отклонение, при котором винт расположен вне корня дуги и вне тела позвонка, даже при отсутствии контакта с плеврой, сосудами или органами, следует трактовать как СМ, поскольку подобное положение ТПВ потенциально снижает опороспособность и биомеханическую надёжность фиксации и, следовательно, может иметь значение для механических исходов и риска ревизии.

Для передних мальпозиций при отсутствии контакта с висцеральными структурами или сосудами и при сохранении минимального безопасного зазора клинически значимый риск не реализуется; такие случаи в рамках принятой логики относятся к НМ. Передняя мальпозиция приобретает статус ОМ при контакте или опасной близости к органам и сосудам.

Для медиальных мальпозиций сохраняется общая логика стратификации по глубине выхода: медиальная перфорация менее 2 мм относится к НМ, диапазон 2–4 мм трактуется как СМ, а более 4 мм как ОМ. Вместе с тем с учётом топографии деформации и минимального анатомического резерва в апикальной зоне по вогнутой стороне, медиальные перфорации 2 мм и более в этой локализации следует рассматривать как потенциально более опасные и в практическом алгоритме относить к ОМ, поскольку формально пограничная

величина выхода в данных условиях может соответствовать высокому риску повреждения невральных структур. Любая мальпозиция ТПВ, сопровождающаяся стойкими неблагоприятными изменениями со стороны нейромониторинга или клиническим неврологическим дефицитом, не должна рассматриваться как пограничная. В практическом смысле она относится к ОМ и требует реимплантации опорного элемента металлоконструкции.

Таким образом, по данным литературы можно выделить три диапазона медиальных перфораций с принципиально различающейся вероятностью неблагоприятных исходов: до 2 мм как зона относительной безопасности, 2–4 мм как зона настороженности и более 4 мм как зона высокого риска. В то же время собственные данные показывают, что в рамках конкретной серии клиническая манифестация неврологического дефицита произошла при более выраженных перфорациях стенки позвоночного канала более 5 мм, причём по вогнутой стороне и в апикальной зоне. Это позволяет сформулировать клинически важный компромисс: порог 5–6 мм и более отражает порог риска осложнений в исследуемом материале, тогда как порог 4 мм целесообразно использовать в алгоритме как профилактический порог настороженности, согласованный с литературой и направленный на предотвращение осложнений, а не только на фиксацию уже случившегося дефицита. Диапазон 2–4 мм, в свою очередь, следует трактовать как промежуточную зону, в которой решение о динамическом наблюдении или хирургической коррекции стояния ТПВ принимается с учётом стороны сколиотической дуги, вершины деформации, данных нейромониторинга и клинической картины.

На основании полученных результатов исследования, а также с учётом изложенных принципов, сформулирован единый алгоритм принятия решений при выявлении мальпозиций, включающий интраоперационный и послеоперационный этапы.

6.2 ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ МАЛЬПОЗИЦИЙ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ.

Предлагаемая нами интраоперационная тактика при выявлении мальпозиции транспедикулярного винта основывается на совмещённой оценке нейрофизиологических данных (МВП, Т-ЭМГ) и результатов интраоперационной трёхмерной визуализации. На этапе формирования канала и установки ТПВ выполняется мультимодальный нейромониторинг: МВП регистрируются после установки каждого винта либо после прохождения уровней повышенного риска, а Т-ЭМГ используется как тест сближения с невральными структурами. Порог Т-ЭМГ более 10–12 мА расценивается как безопасный, снижение порога до 8–10 мА и менее рассматривается как признак возможной медиальной перфорации или контакта с корешком. При появлении неблагоприятной динамики МВП или патологических значений Т-ЭМГ необходимо выполнить немедленный визуализационный контроль положения ТПВ и коррекцию его траектории.

После установки винтов проводится оценка их положения по данным интраоперационной 3D-визуализации с определением направления перфорации костной стенки корня дуги (медиальная, латеральная, передняя), глубины выхода винта, уровня фиксации, а также топографии относительно деформации, включая сторону сколиотической дуги и отношение расположения инструментируемого позвонка к апикальной зоне и смежным уровням. Дальнейшая тактика определяется клинической интерпретацией выявленного смещения с распределением по категориям, таким, как: ТП, НМ, СМ и ОМ, принятым в настоящей работе.

При латеральных и передних отклонениях от оптимальной траектории допустимость сохранения винта определяется, с одной стороны, отсутствием угрозы критическим структурам, с другой – сохранностью внутрикостной опоры и потенциальной опороспособностью импланта. Экстрапедикулярное положение при сохранении винта в пределах тела позвонка при стабильных параметрах нейромониторинга трактуется как НМ и, как правило, не требует коррекции. Если винт расположен вне корня дуги и вне тела позвонка, даже при отсутствии контакта с плеврой, сосудами или органами, такая ситуация

относится к СМ, поскольку отражает потенциальное снижение опороспособности ТПВ и стабильности металлоконструкции; предпочтительной тактикой является интраоперационная реимплантация опорного элемента. Контакт винта с плеврой при отсутствии признаков её прободения также относится к СМ. Контакт винта с аортой, полыми или сегментарными сосудами, пищеводом, трахеей либо органами брюшной полости расценивается как ОМ и требует обязательной интраоперационной коррекции независимо от стабильности показателей нейрофизиологического мониторинга.

При медиальных мальпозициях ключевыми параметрами являются глубина выхода и топография деформации. Медиальная перфорация менее 2 мм при нормальных МВП и Т-ЭМГ относится к НМ и может быть оставлена без коррекции. Перфорация от 2 до 4 мм относится к СМ и требует взвешенного решения. При пороге Т-ЭМГ более 10–12 мА допустимо сохранение винта при условии, что он не расположен по вогнутой стороне и не располагается в непосредственной близости к апикальной зоне сколиотической дуги; при снижении порога Т-ЭМГ до 8–10 мА и менее показана обязательная переустановка ТПВ. Медиальная перфорация костной стенки корня дуги позвонка более 4 мм расценивается как ОМ и требует реимплантации винта, в качестве предпочтительной варианта действий оперирующего хирурга.

Отдельно нам удалось выделить зону повышенного риска при сколиозе: вогнутая сторона деформации, непосредственная близость к апикальной зоне сколиотической дуги. В такой ситуации, медиальная перфорация 2 мм и более рассматривается как ОМ в связи с повышенной вероятностью контакта с нервными структурами, и переустановка предпочтительна как наиболее безопасное решение, особенно при сомнениях в достаточном резерве пространства до дурального мешка. Окончательное решение принимается с учётом нейромониторинга и общей интраоперационной ситуации.

При снижении амплитуды МВП на 50–60 процентов и более либо при исчезновении ответов все манипуляции на позвоночнике немедленно прекращаются. Далее выполняется Т-ЭМГ подозрительных винтов и проводится интраоперационная 3D-визуализация с приоритетной оценкой возможной медиальной мальпозиции. Выявленная ОМ устраняется в первую очередь; при необходимости выполняется уменьшение степени коррекции или дистракции, после чего проводится повторный контроль МВП до восстановления параметров. В качестве возможной опции, для повышения информативности рентгенологического или КТ-исследования стоит рассмотреть возможность выполнения интраоперационной миелографии, что позволит повысить информативность визуализации.

6.3 ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ МАЛЬПОЗИЦИЙ ТРАНСПЕДИКУЛЯРНЫХ ВИНТОВ.

Для своевременного выявления потенциально опасных мальпозиций, включая варианты, способные длительно протекать бессимптомно (прежде всего: контакт винта с аортой, сосудами или органами средостения), рекомендуется выполнение послеоперационной компьютерной томографии всем пациентам. При наличии новой или нарастающей неврологической симптоматики, подозрении на мальпозицию по интраоперационным данным, а также при изменении характера болевого синдрома послеоперационная КТ выполняется в первоочередном порядке.

При анализе картины КТ оцениваются направление выявленной перфорации костной стенки корня дуги позвонка (медиальная, латеральная, передняя), глубина выхода винта, уровень имплантации, наличие контакта или опасной близости к органам и сосудам, локализация относительно вогнутой стороны и апикальной зоны сколиотической дуги, а также наличие новых неврологических симптомов.

Важно подчеркнуть различие между интраоперационной и послеоперационной логикой принятия решений. Интраоперационно

предпочтение отдаётся профилактической тактике: при сомнительной медиальной перфорации в зоне повышенного риска (вогнутая сторона, апикальный уровень и смежные сегменты) переустановка выбирается чаще, поскольку она технически проще и безопаснее до завершения коррекции и формирования спондилодеза, а также позволяет минимизировать риск ранних и отсроченных неврологических осложнений. После операции решение принимается в условиях иной клинической ситуации: повторное вмешательство само по себе несёт дополнительные риски, а часть пограничных медиальных выходов ТПВ в диапазоне 2–4 мм при отсутствии неврологического дефицита и признаков компрессии по КТ может оставаться клинически стабильной. Поэтому послеоперационная тактика в этой группе допускает наблюдение при строгом учёте клинико-радиологических критериев и низком пороге готовности к ревизии при появлении симптомов или сомнений в безопасности позиционирования имплантов.

Послеоперационные решения при латеральных и передних отклонениях от безопасной траектории определяются сочетанием клинических проявлений, стабильности конструкции и характера контакта с критическими структурами.

Экстрапедикулярное положение при сохранении винта в пределах тела позвонка соответствует категории НМ и при отсутствии симптоматики расценивается как безопасное. Оптимальная тактика заключается в динамическом наблюдении.

Если винт расположен вне тела позвонка, но при этом отсутствует контакт или опасная близость к сосудам и органам, такая ситуация относится к СМ. Несмотря на то, что непосредственная угроза висцеральных или сосудистых осложнений отсутствует, сохраняется потенциальное снижение опороспособности винта и риск механических проблем. При клиническом благополучии, отсутствии признаков миграции и сохранённой стабильности металлоконструкции допустимо динамическое наблюдение с контролем КТ или рентгенографии через 6 месяцев и повторным контролем через 12 месяцев. При отсутствии признаков вторичной миграции импланта и появления

болевого синдрома, дальнейшее специализированное наблюдение по поводу выявленной мальпозиции, как правило, не требуется, поскольку к этому времени формируется спондилодез и риск смещения винта существенно снижается.

Контакт винта с плеврой при отсутствии признаков её прободения относится к СМ. При отсутствии клинических проявлений допустима выжидательная тактика с динамическим наблюдением.

Контакт или прилежание ТПВ к аорте, полым или сегментарным сосудам, пищеводу, трахее либо органам брюшной полости расценивается как ОМ вне зависимости от наличия жалоб. Тактика предполагает ревизионное вмешательство в плановом порядке, поскольку риск катастрофических осложнений не коррелирует с выраженностью симптомов и может реализоваться отсроченно.

При медиальных перфорациях решающее значение имеет является глубина выхода винта за пределы костной стенки корны дуги позвонка, топография (вогнутая сторона и апикальная зона) и клинический контекст.

Медиальная перфорация менее 2 мм относится к НМ. При отсутствии неврологических нарушений показано наблюдение. Перфорацию в пределах 2–4 мм следует относить к СМ. При этом, алгоритм действий врача определяется клинико-рентгенологической картиной: при отсутствии неврологических нарушений, прямых или косвенных признаков компрессии дурального мешка или корешков спинного мозга по КТ (возможно – в сочетании миелографией) и при стабильном состоянии пациента допустимо наблюдение. В группе повышенного анатомического риска (вогнутая сторона и апикальная зона) такие варианты также сохраняются в категории СМ, но требуют более высокой степени клинической настороженности. Обоснование заключается в том, что послеоперационно решение о ревизии должно учитывать баланс между рисками выполнения ревизионного хирургического вмешательства и рисками отсроченных имплант-ассоциированных осложнений. При отсутствии симптомов и убедительных признаков

компрессии позвоночного канала по КТ часть пограничных перфораций остаётся клинически стабильной, тогда как повторное вмешательство увеличивает суммарные риски для пациента. Поэтому в этой ситуации оправдана тактика динамического наблюдения с малой вероятностью необходимости выполнения плановой ревизии, поводом для которой, могут послужить клинические признаки радикулопатии или нарастание болевого синдрома.

Медиальная перфорация более 4 мм расценивается как клинически значимая. В практическом смысле она соответствует СМ либо ОМ в зависимости от наличия компрессии позвоночного канала или корешковых отверстий по данным КТ и клинических проявлений. При наличии неврологической симптоматики показана ревизия по неотложным показаниям. При её отсутствии рекомендуется рассмотреть плановую коррекцию с учётом повышенного риска отсроченных осложнений ревизионного вмешательства и индивидуальной оценки соотношения рисков и пользы для пациента.

Любая медиальная мальпозиция, сопровождающаяся новой или прогрессирующей неврологической симптоматикой, относится к ОМ и требует немедленной ревизии с устранением мальпозиции ТПВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хирургическая коррекция идиопатического сколиоза у детей и подростков с применением полисегментарной транспедикулярной фиксации обеспечивает выраженную коррекцию деформации, однако в условиях сколиотической деформации сохраняется риск мальпозиции транспедикулярных винтов, прежде всего за счет анатомической variability корней дуг позвонков, выраженной ротации и фронтального наклона в апикальной зоне, а также минимального анатомического резерва на вогнутой стороне дуги [35,129,152]. По данным литературы, частота мальпозиций при использовании техники «free-hand» варьирует в широких пределах, что связано как с неоднородностью популяций и тяжестью деформаций, так и с отсутствием унифицированного подхода к оценке точности имплантации и клинической значимости перфораций [17,24,25,62,77,126]. Дополнительным фактором недоучета является то, что КТ рутинно не используется для послеоперационного контроля, и часть бессимптомных мальпозиций может оставаться не выявленными при стандартной рентгенографии [46]. В этой связи актуальным направлением является внедрение технологий, повышающих воспроизводимость траектории и точность имплантации, включая КТ-навигацию и аддитивные технологии, в том числе индивидуальные 3D печатные модели позвоночника для предоперационного планирования и пространственной ориентации [27,93,95,137,157].

В настоящем исследовании выполнен сравнительный анализ эффективности и безопасности трех подходов к имплантации транспедикулярных винтов при хирургии сколиоза у детей: «free-hand»-техники, применения аддитивных технологий (индивидуальные 3D печатные модели позвоночника) и КТ-навигации. В исследование включено 120 пациентов, распределенных на 3 группы: контрольная группа «free-hand» (45 пациентов), группа «аддитивных технологий» (30 пациентов) и группа «КТ-навигации» (45 пациентов). Всего проанализированы результаты имплантации

2193 транспедикулярных винтов (696, 572 и 925 соответственно) пациентам, страдающим тяжелыми формами сколиоза грудного и поясничного отделов позвоночника с оценкой правильности положения имплантов с применением послеоперационной КТ, регистрацией направления перфорации и стратификацией по степени клинической опасности (НМ, СМ, ОМ) на основе логики классификации Sarwahi с соавт. [129].

Полученные результаты продемонстрировали выраженное влияние применяемой технологии на частоту и структуру мальпозиций. При этом «free-hand»-техника при соблюдении методологии и использовании нейрофизиологического контроля является относительно безопасной, но более зависимой от тяжести деформации и вариабельности индивидуальной анатомии пациента. В контрольной группе пациентов общая частота мальпозиций составила 21,3% (148 из 696 винтов). Распределение по степени опасности было следующим: НМ - 10,8%, СМ - 6,6%, ОМ - 3,9%. По направлению перфорации костной стенки корня дуги позвонка преобладали медиальные –9,2%, далее латеральные – 7,6% и передние – 4,5%. Клиническая значимость части ошибок подтверждается наличием неврологических осложнений (2 случая, 4,4%), ассоциированных с медиальной мальпозицией, а также потребностью в ревизионных вмешательствах в связи с критической близостью винтов к аорте (3 случая, 6,7% от числа пациентов группы). Полученные данные согласуются с литературными наблюдениями о том, что клинический риск определяется не только фактом выхода винта за пределы костных границ корня дуги, но и направлением перфорации, топографией сколиотической деформации и близостью к критически важным структурам [18,35,90,107,129,152]. Отдельного внимания требуют передне-латеральные варианты мальпозиций в грудном отделе, так как даже бессимптомная ее разновидность может создавать угрозу отсроченного сосудистого или висцерального осложнения и потребовать пристального динамического наблюдения тактики наблюдения или ревизионного оперативного вмешательства. Таким образом, «free-hand» техника имплантации ТПВ в

условиях сколиотической деформации позвоночника обеспечивает приемлемый уровень безопасности, однако характеризуется большей долей мальпозиций в целом и большей зависимостью результата от тяжести деформации, и локальных анатомических условий, что требует риск-ориентированного отбора пациентов и уровней имплантации ТПВ.

В группе «аддитивных технологий» общая частота мальпозиций составила 6,1% (35 из 572 винтов), что более чем в 3 раза ниже по сравнению с контрольной группой «free-hand». Распределение по степени опасности мальпозиции сместилась в сторону менее клинически значимых отклонений: НМ - 4,3%, СМ - 1,6%, ОМ - 0,1%. По направлению перфораций преобладали латеральные - 3,2%, медиальные составили 2,6%, передние - 0,3%. Таким образом, применение аддитивных технологий сопровождалось выраженным снижением доли сомнительных и опасных вариантов мальпозиций и практически полным устранением ОМ. Это согласуется с данными литературы о том, что аддитивные технологии в хирургии деформаций позвоночника решают две взаимодополняющие задачи: повышение качества предоперационного планирования и пространственной ориентации (3D модели), а также повышение воспроизводимости траекторий при использовании пациент-специфических решений в сложных анатомических условиях [37,93,137,158]. В настоящем исследовании группа аддитивных технологий характеризовалась более выраженной исходной деформацией, что могло частично влиять на показатели коррекции, однако не нивелировало преимуществ по точности и профилю безопасности имплантации.

В группе «КТ-навигации» общая частота мальпозиций составила 4,97% (46 из 925 винтов), что является минимальным значением среди трех подходов. Распределение по степени опасности характеризовалось доминированием НМ: НМ – 3,8%, СМ – 1,2%, ОМ – 0,1%. По направлению перфорации доли медиальных и латеральных вариантов оказались равными (по 2,3%), передние перфорации составили 0,4%. Таким образом, КТ-навигация обеспечила не только снижение общей частоты мальпозиций по

сравнению с «free-hand» техникой, но и минимизацию клинически опасных вариантов, что соответствует современным данным о повышении точности установки транспедикулярных винтов при использовании интраоперационной КТ-навигации по сравнению с традиционными методами [28,88,95,122,139].

Важным результатом исследования является выявление различной зависимости частоты мальпозиций от параметров деформации в разных группах. В группе «free-hand» установлена сильная корреляция общей частоты мальпозиций с величиной деформации по Cobb ($r=0,784$; $p<0,001$) и с ротацией вершинного позвонка ($r=0,648$; $p<0,001$), что отражает высокую чувствительность метода к анатомическим ограничениям. В группе аддитивных технологий выраженность зависимости снижалась (Cobb: $r=0,419$; $p=0,021$; ротация: $r=0,573$; $p<0,001$), что может указывать на частичную компенсацию анатомических сложностей за счет улучшения предоперационного планирования и ориентации. Напротив, в группе «КТ-навигации» влияние ротации инструментируемого позвонка отсутствовало ($r=0,057$; $p=0,709$), а связь с величиной деформации была умеренной ($r=0,346$; $p=0,02$), что указывает на способность КТ-навигации компенсировать ротационное смещение анатомических ориентиров и сохранять низкую частоту ошибок в условиях выраженных тяжелых сколиотических деформаций.

Разработанная прогностическая модель для «free-hand» техники дополняет полученные результаты и переводит их в практическую плоскость. Показано, что фронтальный наклон и ротация инструментируемого позвонка являются независимыми предикторами мальпозиции: увеличение фронтального наклона повышает вероятность мальпозиции (ОШ 1,027), аналогичный эффект отмечен для ротации (ОШ 1,050). Диагностическая способность модели по ROC-анализу является приемлемой (AUC 0,682), а при пороговом значении вероятности 0,212 достигаются чувствительность 70,5% и специфичность 62,5%. В клиническом смысле модель позволяет выделять пациентов с повышенным риском мальпозиции при «free-hand» технике на

этапе планирования и обоснованно рассматривать применение технологий, снижающих влияние анатомической сложности на точность имплантации. Наиболее практичным является подход стратификации риска, при котором сочетание фронтального наклона и ротации 20° и более на уровне планируемой фиксации следует рассматривать применение КТ-навигации или аддитивных технологий, а также возможность изменения стратегии фиксации (например: отказ от установки транспедикулярного винта на данном уровне или использование крючковых элементов металлоконструкции).

В совокупности, результаты исследования подтверждают следующее. Во-первых, переход от «free-hand» техники к применению аддитивных технологий (индивидуальные 3D-печатные модели позвоночника) или КТ-навигации сопровождается многократным снижением общей частоты мальпозиций и резким сокращением доли потенциально опасных вариантов (СМ и ОМ). Во-вторых, обе технологии обеспечивают сопоставимо низкий уровень клинически опасных перфораций и могут рассматриваться как инструменты повышения безопасности, выбор между которыми должен определяться доступностью оборудования, организационными и экономическими условиями, а также профилем риска конкретного пациента. В-третьих, «free-hand» техника демонстрирует выраженную зависимость от тяжести деформации и параметров пространственного положения инструментируемого позвонка, что диктует необходимость прогнозирования риска и внедрения алгоритмов выбора технологии имплантации. В-четвертых, тактика ведения выявленной мальпозиций после операции должна состоять в комплексной оценке степени и направления перфорации, уровня фиксации, стороны деформации, близости к критическим анатомическим структурам и клинических данных, включая показатели нейрофизиологического контроля, а не только на наличие факта выхода винта за пределы костных границ корня дуги позвонка.

Таким образом, результаты проведенного исследования обеспечивают оптимизацию тактики спондилодеза при хирургической коррекции

сколиотических деформаций у детей на основе стратификации имплант-ассоциированных рисков. Риск-ориентированный выбор технологии установки транспедикулярных винтов с применением КТ-навигации и аддитивных технологий позволяет повысить точность имплантации и снизить долю клинически значимых мальпозиций, а разработанная прогностическая модель рационализирует отбор пациентов и уровней имплантации при планировании «free-hand» техники. Внедрение предложенного подхода направлено на снижение частоты имплант-ассоциированных осложнений, уменьшение потребности в ревизионных вмешательствах и повышение общего уровня безопасности хирургического лечения сколиотических деформаций грудного и поясничного отделов позвоночника у детей.

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°. связан 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 $\leq 1-2$ 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 ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Белова А.Н., и соавт. Нейрофизиологический интраоперационный мониторинг при операциях на позвоночнике и спинном мозге (обзор литературы). РМЖ. 2016;24:1569-1574.
2. Коваленко Р.А., и соавт. Сравнение имплантации транспедикулярных винтов с помощью O-arm-навигации и навигационных матриц в эксперименте на животных. Хирургия позвоночника. 2020;17(4):85-93
3. Кубасов М.В., и соавт. Дозы облучения пациентов при транспедикулярной фиксации позвоночника. Хирургия позвоночника. 2023;20(4):84-91.
4. Косулин А.В., и соавт. Применение трехуровневого навигационного шаблона при грудных полупозвонках у детей старшего возраста. Хирургия позвоночника. 2020;17(1):54-60.
5. Косулин А.В., и соавт. Транспедикулярная фиксация позвоночника с использованием двухуровневых навигационных шаблонов при малых размерах корня дуги. Хирургия позвоночника. 2021;18(2):26-33.
6. Косулин А.В., и соавт. Избирательное применение навигационных шаблонов при идиопатическом сколиозе: технические и хронометрические особенности. Хирургия позвоночника. 2022;19(3):6-13.
7. Косулин А.В., и соавт. Транспедикулярная имплантация с использованием двухкомпонентного навигационного шаблона при субкритических размерах корня дуги. Хирургия позвоночника. 2024;21(4):27-33.
8. Пимбурский И.П., и соавт. Обеспечение безопасности хирургической коррекции сколиозов у детей с применением нейромониторинга и O-arm-навигации. Педиатрия. Consilium Medicum. 2023;(4):269-274.
9. Пимбурский И.П., и соавт. Применение нейронавигационных технологий при тяжелых формах сколиоза у детей. Педиатрия. Consilium Medicum. 2024;(2):130-137.

10. Пимбурский И.П., и соавт. 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.
11. Пимбурский И.П., и соавт. Стратификации риска мальпозиции транспедикулярных винтов при «free-hand» технике имплантации в хирургии сколиоза. Педиатрия. Consilium Medicum. 2026;1:12-17.
12. Прудникова О.Г., и соавт. Классификация мальпозиций винтов при инструментальной фиксации деформаций позвоночника. Хирургия позвоночника. 2025;22(3):6-17.
13. Прудникова О.Г., и соавт. КТ-навигация в хирургии деформаций позвоночника. Гений ортопедии. 2025;31(6):839-849.
14. Тория В.Г., и соавт. Преимущества применения шаблонов-направителей у детей при коррекции врожденной деформации позвоночника и аномалии развития грудной клетки. Педиатрическая травматология, ортопедия и реконструктивная хирургия. 2024;12(2):217-223.
15. Фадеев Е.М., и соавт. Частота и структура осложнений при операциях на позвоночнике. Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2017;5(2):75-83.
16. Челпаченко О.Б. Современные принципы диагностики и хирургического лечения детей с деформациями позвоночника и нестабильностью тазобедренных суставов: специальность 14.01.19 Детская хирургия: диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук. 2020. 300 с.
17. Abul-Kasim K, et al. The rate of screw misplacement in segmental pedicle screw fixation in adolescent idiopathic scoliosis: The effect of learning and cumulative experience. Acta orthopaedica. 2011;82:50-55.
18. Adamski S, et al. Review of currently used classifications for pedicle screw position grading in cervical, thoracic and lumbar spine. Chirurgia Narządów Ruchu i Ortopedia Polska. 2023;88(4):165-171.

19. Addar A, et al. The Debilitating Physical and Emotional Effects of Limb Deformity: A Tertiary Center Observational Study Utilizing the Limb Deformity-Modified Scoliosis Research Society Score (LD-SRS). *Journal of Clinical Medicine*. 2025;14:703.
20. Akazawa T, et al. Accuracy of computer-assisted pedicle screw placement for adolescent idiopathic scoliosis: a comparison between robotics and navigation. *European Spine Journal*. 2023;32:651-658.
21. Al-Mohrej OA, et al. Surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis: Complications. *Annals of Medicine and Surgery*. 2020;52:19-23.
22. Alvi MA, et al. Accuracy of intraoperative neuromonitoring in the diagnosis of intraoperative neurological decline in the setting of spinal surgery-A systematic review and meta-analysis. *Global Spine Journal*. 2024;14:105S-149S.
23. Anil A, et al. A narrative review on pedicle screw instrumentation in the lumbar spine. *Indian Spine Journal*. 2025;8(1):3-12.
24. Ansoerge A SV, 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. Published 2023 Jul 18.
25. Aoude AA FM, et al. Methods to determine pedicle screw placement accuracy in spine surgery: a systematic review. *Eur Spine J*. 2015;24(5):990-1004.
26. Bagó J, et al. Back Pain in Adolescents and Young Adults with Idiopathic Scoliosis-Identifying Factors Associated with Significant Pain-A Multivariate Logistic Regression Analysis. *Journal of Clinical Medicine*. 2024;13(8):2366.
27. Baky FJ MT, et al. Intraoperative Computed Tomography-Guided Navigation for Pediatric Spine Patients Reduced Return to Operating Room for Screw Malposition Compared With Freehand/Fluoroscopic Techniques. *Spine Deform*. 2019;7(4):577-581.
28. Baldwin KD KM, 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.

29. Bang WS, et al. Development of neuromonitoring pedicle screw-results of Electrical Resistance and Neurophysiologic Test in Pig Model. *Neurospine*. 2020;18:117.
30. Barton C, et al. Risk factors for rod fracture after posterior correction of adult spinal deformity with osteotomy: a retrospective case-series. *Scoliosis*. 2015;10(30):30.
31. Basu S, et al. Intraoperative Neuromonitoring in Spine Surgery: Does it Reduce Neural Complications? Current Evidence. *Indian Spine Journal*. 2023;6:15-26.
32. Biscevic M, et al. Intraoperative neuromonitoring in spine deformity surgery: modalities, advantages, limitations, medicolegal issues-surgeons' views. *EFORT Open Reviews*. 2020;5:9-16.
33. Bjerkreim I, et al. Idiopathic scoliosis treated with Cotrel-Dubousset instrumentation: evaluation 10 years after surgery. *Spine*. 2007;32:2103-2110.
34. Boeckenfoerde K, et al. Risk Factors of Proximal Junctional Kyphosis in Adolescent Idiopathic Scoliosis-The Spinous Processes and Proximal Rod Contouring. *Journal of clinical medicine*. 2022;11(20):6098.
35. Burger JA BL, et al. In idiopathic scoliosis distances of spinal cord to thoracic pedicle are within 2 mm in a large region of the thoracic apex. *Sci Rep*. 2024;14(1):14340. Published 2024 Jun 21.
36. Burström G, et al. Augmented and virtual reality instrument tracking for minimally invasive spine surgery: a feasibility and accuracy study. *Spine*. 2019;44:1097-1104.
37. Cecchinato R, et al. Insertion of patient-specific 3D-printed guides based on low-dose CT is more accurate than free-hand technique in spine deformity patients: a prospective, randomized clinical trial. *Eur Spine J*. 2019;28(7):1712-1723.
38. Chang SH, et al. Monitoring of motor and somatosensory evoked potentials during spine surgery: intraoperative changes and postoperative outcomes. *Annals of Rehabilitation Medicine*. 2016;40:470-480.

39. Charalampidis A, et al. Predictors of persistent postoperative pain after surgery for idiopathic scoliosis. *Journal of children's orthopaedics*. 2021;15(5):458-463.
40. Chehrassan M, et al. Understanding the pros and cons of spine surgery for ankylosing spondylitis: experience from a single institution study. *BMC rheumatology*. 2025;9:11.
41. Chen BJ, et al. Importance of intraoperative neuromonitoring for corrective surgery in patients with adolescent idiopathic scoliosis. *J Clin Med*. 2025;14(21):7693.
42. Cho HS, et al. Can augmented reality be helpful in pelvic bone cancer surgery? An in vitro study. *Clinical Orthopaedics and Related Research®*. 2018;476:1719-1725.
43. Cho SK, et al. Can intraoperative spinal cord monitoring reliably help prevent paraplegia during posterior vertebral column resection surgery?. *Spine deformity*. 2015;3:73-81.
44. Christiansen PA, et al. Complications of surgical intervention in adult lumbar scoliosis. *Current reviews in musculoskeletal medicine*. 2016;9:281-289.
45. Cloake T, et al. The management of scoliosis in children with cerebral palsy: a review. *Journal of Spine Surgery*. 2016;2:299.
46. Conrads N GJ, et al. Accuracy of pedicle screw placement using neuronavigation based on intraoperative 3D rotational fluoroscopy in the thoracic and lumbar spine. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2023;143(6):3007-3013.
47. Darońzewski P, et al. Real-Time Neuromonitoring Increases the Safety and Non-Invasiveness and Shortens the Duration of Idiopathic Scoliosis Surgery. *Journal of Clinical Medicine*. 2024;13:1497.
48. de Leeuw TG, et al. Pain during the first year after scoliosis surgery in adolescents, an exploratory, prospective cohort study. *Frontiers in pediatrics*. 2024;12:1293588.
49. Deletis V, et al. Neurophysiological mechanisms underlying motor evoked potentials in anesthetized humans.: Part 1. Recovery time of corticospinal tract direct

waves elicited by pairs of transcranial electrical stimuli. *Clinical neurophysiology*. 2001;112:438-444.

50. Diebo BG, et al. Adult spinal deformity. *The Lancet*. 2019;394:160-172.

51. Edström E, et al. A Novel Augmented-Reality-Based Surgical Navigation System for Spine Surgery in a Hybrid Operating Room: Design, Workflow, and Clinical Applications. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*. 2020;18(5):496-502.

52. Elmeshneb MA, et al. Surgical complications in neuromuscular scoliosis surgery: Systematic review and meta-analysis of the last ten years. *European Spine Journal*. 2024;33:2666-2676.

53. Fan Y, et al. Superior Mesenteric Artery Syndrome Following Scoliosis Surgery: A Systematic Review of Case Reports. *Annals of vascular surgery*. 2021;76:514-535.

54. Fantini GA, et al. Major vascular injury during anterior lumbar spinal surgery: incidence, risk factors, and management. *Spine*. 2007;32:2751-2758.

55. Feng W WW, 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.

56. Floccari LV, et al. Which malpositioned pedicle screws should be revised? *Journal of Pediatric Orthopedics*. 2018;38(2):110-115. doi:10.1097/BPO.0000000000000753.

57. Gertzbein SD RS, et al. Accuracy of pedicular screw placement in vivo. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1990;15(1):11-14.

58. Ghaednia H, et al. Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials. *The Spine Journal*. 2021;21:1617-1625.

59. Halaç O, et al. The Effects of Early-Onset Scoliosis on Morbidity and Mortality of Untreated Patients. *Orthopedic Research and Therapy*. 2024:123.

60. Halsey MF, et al. Neurophysiological monitoring of spinal cord function during spinal deformity surgery: 2020 SRS neuromonitoring information statement. *Spine Deformity*. 2020;8:591-596.

61. Hariharan AR, et al. Complications following surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis: a 10-year prospective follow-up study. *Spine deformity*. 2022;10:1097-1105.
62. Hicks JM, et al. Complications of pedicle screw fixation in scoliosis surgery: a systematic review. *Spine*. 2010;35:E465-E470.
63. How NE, et al. Pseudarthrosis in adult and pediatric spinal deformity surgery: a systematic review of the literature and meta-analysis of incidence, characteristics, and risk factors. *Neurosurgical Review*. 2019;42(2):319-336.
64. Hu H, et al. Application of mixed reality technology in surgery. *Int*. 2019;12:3107-3133.
65. Hussain R, et al. Contribution of augmented reality to minimally invasive computer-assisted cranial base surgery. *IEEE journal of biomedical and health informatics*. 2019;24:2093-2106.
66. Hyun SJ LL, et al. The Incidence of Adding-On or Distal Junctional Kyphosis in Adolescent Idiopathic Scoliosis Treated by Anterior Spinal Fusion to L3 Was Significantly Higher Than by Posterior Spinal Fusion to L3. *Neurospine*. 2021;18(3):457-463.
67. Jeong S, et al. 3D printed pedicle screw guides reduce the rate of intraoperative screw revision in adolescent idiopathic scoliosis surgery. *Spine J*. 2023;23(12):1894-1899.
68. Ji X WL, et al. Incidence and risk factors of proximal junctional kyphosis in adolescent idiopathic scoliosis after correction surgery: a meta-analysis and systematic review. *J Orthop Surg Res*. 2024;19(1):217. Published 2024 Apr 2.
69. Jin M LZ, et al. Does intraoperative navigation improve the accuracy of pedicle screw placement in the apical region of dystrophic scoliosis secondary to neurofibromatosis type I: comparison between O-arm navigation and free-hand technique. *Eur Spine J*. 2016;25(6):1729-1737.
70. Juncker RB, et al. Long-term Postural Stability Changes After Correction of Spinal Deformity: A prospective, controlled pilot study. *Spine*. 2025:10.

71. Katsumi S SA, et al. Accuracy and deviation risk factors of pedicle screws in AIS surgery using intraoperative CT-based navigation: a retrospective study of 1,082 screws. *Eur Spine J.* 2025;34:5343-5352.
72. Kayacı S CT, et al. Aortic Injury by Thoracic Pedicle Screw. When Is Aortic Repair Required? Literature Review and Three New Cases. *World Neurosurg.* 2019;128:216-224.
73. Keshavarzi S, et al. Role of spinal MRI for pre-operative work up in patients with adolescent idiopathic scoliosis: a retrospective case study and narrative review. *Spine Deformity.* 2024:1-10.
74. Kim YJ LL, et al. Free hand pedicle screw placement in the thoracic spine: is it safe?. *Spine (Phila Pa 1976).* 2004;29(3):333-342.
75. Kino K, et al. Health-related quality of life, including marital and reproductive status, of middle-aged Japanese women with posterior spinal fusion using Cotrel-Dubousset instrumentation for adolescent idiopathic scoliosis: Longer than 22-year follow-up. *Journal of Orthopaedic Science.* 2020;25:820-824.
76. Konieczny MR, et al. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis. *Journal of children's orthopaedics.* 2013;7:3-9.
77. Kosmopoulos V SC, et al. Pedicle screw placement accuracy: a meta-analysis. *Spine (Phila Pa 1976).* 2007;32(3):E111-E120.
78. Kundnani VK, et al. Multimodal intraoperative neuromonitoring in corrective surgery for adolescent idiopathic scoliosis: evaluation of 354 consecutive cases. *Indian journal of orthopaedics.* 2010;44:64-72.
79. Kwan KYH, et al. Complications following surgery for adolescent idiopathic scoliosis over a 13-year period: A review of 84,320 patients from the Scoliosis Research Society Morbidity and Mortality Database. *The Bone & Joint Journal.* 2020;102:519-523.
80. Kwan MK, et al. Accuracy and safety of pedicle screw placement in adolescent idiopathic scoliosis patients: a review of 2020 screws using computed tomography assessment. *Spine.* 2017;42:326-335.

81. Lajczak P, et al. Comparison of accuracy of pedicle screw placement for adolescent idiopathic scoliosis using freehand fluoroscopic, navigation, and robotic-assisted techniques: a systematic review and bayesian network meta-analysis. *Neurosurg Rev.* 2025;48(1):257.
82. Lalechou N, et al. The correlation between clinical and epidemiological characteristics of adolescents with idiopathic scoliosis and their quality of life: A pilot cross-sectional study. *International Journal of Health Sciences.* 2024;8(S1):789-802. doi:10.53730/ijhs.v8nS1.14940.
83. Landman Z, et al. Prevalence and predictors of pain in surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *Spine.* 2011;36(10):825-829. doi:10.1097/BRS.0b013e3181de8c2b.
84. Lau KKL, et al. Sensitivity of intraoperative electrophysiological monitoring for scoliosis correction in identifying postoperative neurological deficits: a retrospective chart review of the Scoliosis Research Society morbidity and mortality database. *BMC Musculoskeletal Disorders.* 2025;26:186.
85. Lazaro B, et al. Proximal junctional failure in primary thoracolumbar fusion/fixation to the sacrum/pelvis for adult symptomatic lumbar scoliosis: long-term follow-up of a prospective multicenter cohort of 160 patients. *Journal of neurosurgery. Spine.* 2022;38(3):319-330.
86. Lee BJ BS, et al. Proximal Junctional Kyphosis or Failure After Adult Spinal Deformity Surgery - Review of Risk Factors and Its Prevention. *Neurospine.* 2023;20(3):863-875.
87. Leroy A KR, et al. The Indian Basket Trick: a case of delayed paraplegia with complete recovery, caused by misplaced thoracic pedicle screw. *Springerplus.* 2016;5(1):944. Published 2016 Jun 30.
88. Li C, et al. Comparison of the Accuracy of Pedicle Screw Placement Using a Fluoroscopy-Assisted Free-Hand Technique with Robotic-Assisted Navigation Using an O-Arm or 3D C-Arm in Scoliosis Surgery. *Global spine journal.* 14,2024;(4):1337-1346.

89. Liang W HB, et al. 3D-printed drill guide template, a promising tool to improve pedicle screw placement accuracy in spinal deformity surgery: a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J.* 2021;30(5):1173-1183.
90. Librianto D, et al. Breach Rate Analysis of Pedicle Screw Instrumentation using Free-Hand Technique in the Surgical Correction of Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Journal of Orthopaedic Case Reports.* 2021;11(1):38-44.
91. Lieber AM, et al. Robotic-assisted pedicle screw placement fails to reduce overall postoperative complications in fusion surgery. *The Spine Journal.* 2019;19:212-217.
92. Louie PK, et al. Superior mesenteric artery syndrome as a complication of scoliosis surgery. *Am J Orthop (Belle Mead NJ).* 2017;46:E124-E130.
93. Lu C, et al. Comparison of 3D-printed navigation template-assisted pedicle screws versus freehand screws for scoliosis in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Neurological Surgery Part A: Central European Neurosurgery.* 2023;84(02):188-197.
94. Lu S ZY, et al. Accuracy and efficacy of thoracic pedicle screws in scoliosis with patient-specific drill template. *Med Biol Eng Comput.* 2012;50(7):751-758.
95. Luo M WW, et al. Does Three-dimensional Printing Plus Pedicle Guide Technology in Severe Congenital Scoliosis Facilitate Accurate and Efficient Pedicle Screw Placement?. *Clin Orthop Relat Res.* 2019;477(8):1904-1912.
96. Luo MML, et al. Pedicle screw versus hybrid instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis: A systematic review and meta-analysis with emphasis on complications and reoperations. *Medicine* 96(27):p e7337, July 2017. |.
97. Maalouly J, et al. Retrospective study assessing the learning curve and the accuracy of minimally invasive robot-assisted pedicle screw placement during the first 41 robot-assisted spinal fusion surgeries. *Mini-invasive Surg.* 2021;5:35.
98. Mac-Thiong JM PS, et al. Neurological outcome and management of pedicle screws misplaced totally within the spinal canal. *Spine (Phila Pa 1976).* 2013;38(3):229-237.

99. Marouby S JC, et al. Esophageal perforation caused by a thoracic pedicle screw. *Eur Spine J.* 2021;30(7):2040-2045.
100. Martin-Gomez A, et al. Towards exploring the benefits of augmented reality for patient support during radiation oncology interventions. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization.* 2021;9:322-329.
101. Maruo K AF, et al. Patient-specific guide systems decrease the major perforation rate of pedicle screw placement in comparison to the freehand technique for adolescent idiopathic scoliosis. *Eur Spine J.* 2023;32(9):3105-3112.
102. Marya S, et al. Adolescent idiopathic scoliosis: a review of aetiological theories of a multifactorial disease. *The bone & joint journal.* 2022;104:915-921.
103. Matamalas A, et al. Thirty years later: the lingering effects of adolescent idiopathic scoliosis surgery with third-generation implants on quality of life. *Spine Deformity.* 2025:1-9.
104. McAviney J, et al. The prevalence of adult de novo scoliosis: A systematic review and meta-analysis. *European Spine Journal.* 2020;29:2960-2969.
105. Mikula AL, et al. The use of intraoperative triggered electromyography to detect misplaced pedicle screws: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Neurosurgery: Spine.* 2016;24:624-638.
106. Molina CA, et al. Augmented reality-assisted pedicle screw insertion: a cadaveric proof-of-concept study. *Journal of Neurosurgery: Spine.* 2019;31:139-146.
107. Mulyadi R, et al. Risk of neurologic deficit in medially breached pedicle screws assessed by computed tomography: a systematic review. *Asian Spine Journal.* 2024;18(6):903-912.
108. Murphy RF, et al. Complications following spine fusion for adolescent idiopathic scoliosis. *Current reviews in musculoskeletal medicine.* 2016;9:462-469.
109. Ng MK CC, et al. Intraoperative O-arm navigation yields 100% accuracy in pedicle screw placement for adolescent idiopathic scoliosis: a single-institution study. *J Spine Surg.* 2025;11(4):821-827.

110. Oertel MF HJ, et al. Clinical and methodological precision of spinal navigation assisted by 3D intraoperative O-arm radiographic imaging. *J Neurosurg Spine*. 2011;14(4):532-536.
111. Ollesch B, et al. Complications, results, and risk factors of spinal fusion in patients with myelomeningocele. *Spine deformity*. 2018;6:460-466.
112. Otomo N, et al. Computed tomography-based navigation system in current spine surgery: a narrative review. *Medicina*. 2022;58:241.
113. Papin P AV, et al. Unusual presentation of spinal cord compression related to misplaced pedicle screws in thoracic scoliosis. *Eur Spine J*. 1999;8(2):156-159.
114. Pappalardo G, et al. Superior mesenteric artery syndrome following spine surgery in idiopathic adolescent scoliosis: a systematic review. *European Journal of Medical Research*. 2024;29:410.
115. Park J, et al. Free running and triggered electromyography for surgical planning during spinal cord tumor removal: a case report. *Journal of Intraoperative Neurophysiology*. 2024;6:9-14.
116. Park JH, et al. Intraoperative neurophysiological monitoring in spinal surgery. *World Journal of Clinical Cases: WJCC*. 2015;3:765.
117. Park SJ, et al. Proximal Junctional Failure Development Despite Achieving Ideal Sagittal Correction According to Age-Adjusted Alignment Target in Patients With Adult Spinal Deformity: Risk Factor Analysis of 196 Cases Undergoing Low Thoracic to Pelvic Fusion. *Neurospine*. 2024;21(4):1080-1090.
118. Peterson SL, et al. Intraoperative Triggered Electromyography: Indispensable in Routine Lumbar Fusions?. *Clinical Spine Surgery*. 2022;35:329-332.
119. Qian L, et al. A Review of Augmented Reality in Robotic-Assisted Surgery. *IEEE Trans Med Robot Bionics*. 2020;2(1):1-16.
120. Raj A, et al. Characteristics of patients undergoing revision surgery for proximal junctional failure after adult spinal deformity surgery: revalidation of the Hart-International Spine Study Group proximal junctional kyphosis severity scale. *Journal of neurosurgery. Spine*. 2022;37(3):402-409.

121. Rathod T, et al. Delayed presentation of Wilkie's syndrome after scoliotic curve correction surgery: a case report. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2024;25:329.
122. Rawicki N, et al. Current state of navigation in spine surgery. *Annals of translational medicine*. 2021;9(1):85.
123. Reddy RP, et al. What is the predictive value of intraoperative somatosensory evoked potential monitoring for postoperative neurological deficit in cervical spine surgery?-a meta-analysis. *The Spine Journal*. 2021;21:555-570.
124. Ryalino C, et al. Intraoperative monitoring of the central and peripheral nervous systems: a narrative review. *British Journal of Anaesthesia*. 2024;132:285-299.
125. Sakhrekar R SN, et al. Pedicle screw accuracy placed with assistance of machine vision technology in patients with neuromuscular scoliosis. *Spine Deform*. 2024;12(3):739-746.
126. Samdani AF, et al. Accuracy of free-hand placement of thoracic pedicle screws in adolescent idiopathic scoliosis: how much of a difference does surgeon experience make?. *European spine journal*. 2010;19:91-95.
127. Sandhu HK CK, et al. Spinal screw penetration of the aorta. *J Vasc Surg*. 2013;57(6):1668-1670.
128. Sansur CA, et al. Scoliosis research society morbidity and mortality of adult scoliosis surgery. *Spine*. 2011;36:E593-E597.
129. Sarwahi V WS, et al. Are We Underestimating the Significance of Pedicle Screw Misplacement?. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2016;41(9):E548-E555.
130. Sevuk U MA, et al. Delayed Presentation of Aortic Injury by a Thoracic Pedicle Screw. *J Card Surg*. 2016;31(4):220-230.
131. Shih P, et al. Abdominal complications following posterior spinal fusion in patients with previous abdominal surgeries. *Neurosurgical focus*. 2011;31:E16.
132. Singh A KT, et al. Computer Assisted Navigation Does Not Improve Outcomes in Posterior Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Global Spine J*. Published online August 8, 2024.

133. Smith C, et al. The prevalence of complications associated with lumbar and thoracic spinal deformity surgery in the elderly population: a meta-analysis. *Journal of Spine Surgery*. 2019;5:223.
134. Stecker MM. A review of intraoperative monitoring for spinal surgery. *Surg Neurol Int*. 2012;3(Suppl 3):S174-87.
135. Stepanovich M, et al. (2015, March). Complications of the treatment of adolescent idiopathic scoliosis. In *Seminars in Spine Surgery* (Vol. 27, No. 1, pp. 58-61). WB Saunders.
136. Sucato DJ DC, et al. The position of the aorta relative to the spine: a comparison of patients with and without idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*. 2003;85(8):1461-1469.
137. Sugawara T, et al. Multistep pedicle screw insertion procedure with patient-specific lamina fit-and-lock templates for the thoracic spine: clinical article. *Journal of neurosurgery. Spine* vol. 19,2013;(2):185-90.
138. Suk SI, et al. Pedicle screw instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis (AIS). *European Spine Journal*. 2012;21:13-22.
139. Suri I, et al. Systematic review of surgical success, complications, revision rates, radiation dosage, and operative time of 3D-navigated versus non-navigated spinal procedures. *World Neurosurgery* (2024): 123550.
140. Tan LA AS, et al. The screwed aorta after spinal deformity surgery. *Br J Neurosurg*. 2015;29(2):290.
141. Thirumala PD, et al. Diagnostic accuracy of somatosensory evoked potential monitoring during scoliosis fusion. *Journal of Clinical Neuroscience*. 2016;30:8-14.
142. Thirumala PD, et al. Diagnostic accuracy of combined multimodality somatosensory evoked potential and transcranial motor evoked potential intraoperative monitoring in patients with idiopathic scoliosis. *Spine*. 2016;41:E1177-E1184.
143. Thirumala PD, et al. Diagnostic accuracy of motor evoked potentials to detect neurological deficit during idiopathic scoliosis correction: a systematic review. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2017;26:374-383.

144. Thuet ED, et al. Validity and reliability of intraoperative monitoring in pediatric spinal deformity surgery: a 23-year experience of 3436 surgical cases. *Spine*. 2010;35:1880-1886.
145. Tian W ZC, 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).
146. Toleikis JR, et al. Intraoperative somatosensory evoked potential (SEP) monitoring: an updated position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. *Journal of clinical monitoring and computing*. 2024;38:1003-1042.
147. Ton A, et al. Comparison of Proximal Junctional Failure and Functional Outcomes Across Varying Definitions of Proximal Junctional Kyphosis. *World neurosurgery*. 2021;146:e100-e105.
148. Valič M iD, et al. Malpositioned pedicle screw in spine deformity surgery endangering the aorta: report of two cases, review of literature, and proposed management algorithm. *Spine Deform*. 2020;8(4):809-817.
149. Vávra P, et al. Recent development of augmented reality in surgery: a review. *Journal of healthcare engineering*. 2017;2017:4574172.
150. Walker CT, et al. Neuroanesthesia guidelines for optimizing transcranial motor evoked potential neuromonitoring during deformity and complex spinal surgery: a Delphi consensus study. *Spine*. 2020;45:911-920.
151. Wang PY CC, et al. Distal Junctional Kyphosis after Posterior Spinal Fusion in Lenke 1 and 2 Adolescent Idiopathic Scoliosis-Exploring Detailed Features of the Sagittal Stable Vertebra Concept. *Global Spine J*. 2023;13(4):1112-1119.
152. Wang S, et al. The potential risk of spinal cord injury from pedicle screw at the apex of adolescent idiopathic thoracic scoliosis: magnetic resonance imaging evaluation. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2015;16:310.
153. Yagi M YK, et al. Proximal Junctional Failure In Adult Spinal Deformity Surgery: An In-depth Review. *Neurospine*. 2023;20(3):876-889.

154. Yamada T, et al. Concave Side of Proximal Thoracic Zone Vulnerable to Pedicle Screw Perforation in Adolescent Idiopathic Scoliosis Surgery: Comparative Analysis of Pre- and Intraoperative Computed Tomography Navigation. *J Clin Med*. 2025;14(13):4729.
155. Yang M, et al. Prevalence, Risk Factors, and Characteristics of the Adding-On Phenomenon in Idiopathic Scoliosis After Correction Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Spine*. 2018;43(11):780-790.
156. Yongjun T, et al. Intraoperative triggered electromyographic monitoring of pedicle screw efficiently reduces the lumbar pedicle breach and re-operative rate-a retrospective analysis based on postoperative computed tomography scan. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2023;24:535.
157. Yrjälä T, et al. The Extension of Surgery Predicts Acute Postoperative Pain, While Persistent Postoperative Pain Is Related to the Spinal Pathology in Adolescents Undergoing Posterior Spinal Fusion. *Children*. 2022;9(11):1729.
158. Yu C, et al. Pedicle screw placement in spinal neurosurgery using a 3D-printed drill guide template: a systematic review and meta-analysis. *Journal of orthopaedic surgery and research* vol. 15,1 1. 3 Jan. 2020.
159. Zanin L, et al. Intraoperative Neurophysiological Monitoring in Contemporary Spinal Surgery: A Systematic Review of Clinical Outcomes and Cost-Effectiveness. *Brain Sciences*. 2025;15:768.
160. Zhang P, et al. The application of navigation system based on augmented reality head-mounted devices in spine surgery. *Neuroscience Informatics*. 2022;2:100076.
161. Zurita Perea SN, et al. A Concise Guide to D-Wave Monitoring during Intramedullary Spinal Cord Tumour Surgery. *Medicina (Kaunas)*. 2024;60(8):1242.